



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

**“PROPUESTA DE SELECCIÓN DE CONTROLADOR, SENSORES Y
ACTUADORES PARA UN SISTEMA AS/RS DIDÁCTICO, BASADA EN LA
APLICACIÓN DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO INDUSTRIAL

PRESENTA:

DAMARIS HERNÁNDEZ MARÍN

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. MOISÉS MANZANO HERRERA

CODIRECTOR:

DR. MARIO MÁRQUEZ MIRANDA

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, FEBRERO DE 2021

DEDICATORIA

A Dios por guiarme y ayudarme a lo largo de este camino, por darme la oportunidad y la fuerza para culminar este proyecto, solo a él sea la gloria y la honra.

A mis padres Juan Ángel y Margarita, por siempre brindarme su apoyo y confianza, por no cortarme las alas al emprender este viaje, por estar en cada triunfo y derrota, por enseñarme a depender siempre de Dios, por ser mi motivo para salir adelante.

A todos mis hermanos, por su apoyo incondicional, por siempre dar sin esperar algo a cambio con el único motivo de verme triunfar, por impulsarme a seguir adelante y por su paciencia.

A la Iglesia Príncipe de Paz, a mis pastores José y Yareth por su apoyo absoluto en todas las áreas, por enseñarme siempre a que las cosas no son una casualidad si no que son bendiciones, regalos y oportunidades que Dios nos da.

Gracias a todos, el objetivo logrado también es de ustedes, los amo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a:

Dios por la oportunidad de lograr un objetivo más, por darme siempre lo mejor, mis padres, mis hermanos y amigos en la fe.

Mi director de tesis M.C. Moisés Manzano Herrera, por todo el tiempo invertido. Por sus palabras que me alentaron hasta culminar este proyecto enseñándome que podemos luchar por nuestros sueños hasta alcanzarlos, que absolutamente nada puede ser una limitante para truncarlos. Gracias por compartir sus conocimientos y experiencias.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca por brindarme la oportunidad para formarme como profesional en esta casa de estudios, por el apoyo durante mi estancia. A todos los profesores que aportaron sus conocimientos a lo largo de mi formación profesional.

A mi codirector Dr. Mario Márquez Miranda y sinodales Dr. José Alfredo Carazo Luna, Dr. Salvador Montesinos Gonzáles y M. C. Víctor Manuel Cruz Martínez por todo su tiempo dedicado para la elaboración de este proyecto.

Gracias a todas las personas que estuvieron allí, que dieron todo, gracias por aportar aun lo más mínimo con el único fin de alcanzar mi sueño, por cada noche de desvelo, por cada palabra de ánimo, por brindarme un hombro para llorar, por el lugar que me brindaron al iniciar con este viaje, gracias Esther, doña Carmen, Giovanni, Hna. Yaret, Hno. José, Nohemí, Merab, Abi, Gres, Hna. Esther, Hna. Bere e Israel, los quiero mucho.

A Denisse por siempre apoyarme, por estar al pendiente de mí, por todas las noches de desvelo que pasabas cuando las cosas no iban tan bien, por cada detalle, por cada chiste que hacías con el único fin de verme reír, gracias por cada momento. Te quiero mucho.

María del Carmen por brindarme tu amistad, por darme un lugar donde hospedarme cuando lo necesité, gracias por escucharme muchas veces, por consolarme y animarme, por proveerme de alimento, gracias Mary por siempre estar para mí, te quiero.

A todos mis amigos: Estephany, Melisa, Mireya, Fermín, Lorena e Ingrid por su apoyo durante mi estadía en la Universidad. Gracias.

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis, se aplicó la metodología del Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process-AHP*) para la selección de un controlador, sensores y actuadores, dispositivos que forman parte de la estructura física del sistema AS/RS (*Automatic Storage and Retrieval System*) propuesto para la UTM.

En la etapa inicial se investigó sobre el análisis multicriterio, se estudió el AHP, se analizó el AS/RS propuesto para la UTM, estudiando las características de los principales componentes del sistema AS/RS empleados para su automatización, se revisaron las principales redes de comunicación industrial y sus propiedades, así como también se consultaron los programas de estudio, materias, temas y subtemas que se pueden beneficiar con el uso del AS/RS como un instrumento didáctico.

En una segunda etapa se investigaron los dispositivos disponibles comercialmente y, con base en la información obtenida en la primera etapa, se determinaron los criterios a evaluar para cada componente.

Finalmente, se aplicó el AHP para cada dispositivo, para lo cual se evaluaron los requerimientos subjetivos y objetivos del proyecto, para así elegir las variables de mayor peso a partir de una generación de puntajes. Por último, se obtuvieron los resultados relevantes de la metodología AHP.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
INTRODUCCIÓN	IX
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	12
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2 JUSTIFICACIÓN	13
1.3 HIPÓTESIS	15
1.4 OBJETIVOS	15
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS Y METAS	15
1.5 METODOLOGÍA	17
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	19
2.1 ANÁLISIS MULTICRITERIO	19
2.2 PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO	20
2.2.1 ESQUEMA DEL MODELO JERÁRQUICO	22
2.2.2 APLICACIONES DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)	25
2.3 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO AUTOMATIZADOS	26
2.3.1 SISTEMA AS/RS	26
2.3.2 TIPOS DE SISTEMAS AS/RS	26
2.3.3 COMPONENTES	27
2.4 COMPONENTES DE INSTALACIONES AUTOMÁTICAS	30
2.4.1 SENSORES	30
2.4.2 CRITERIOS A EVALUAR	47
2.4.3 ACTUADORES	48
2.4.4 CRITERIOS	55
2.4.5 CONTROLADORES	55
2.4.6 CRITERIOS	60
2.4.7 REDES DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL	60
2.4.8 PROPIEDADES DE LAS REDES INDUSTRIALES	60

2.4.9	NIVELES DE REDES DE COMUNICACIÓN.....	60
CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA		65
3.1.	ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LAS PARTES DEL SISTEMA AS/RS DE LA UTM	65
3.2	RELACIÓN DE LAS MATERIAS CON EL SISTEMA AS/RS.....	73
3.3	DETERMINAR CRITERIOS Y ALTERNATIVAS.....	78
3.3.1	LISTA DE CARACTERÍSTICAS A ANALIZAR PARA CADA COMPONENTE CONSIDERANDO LA RELACIÓN CON CADA CARRERA	78
3.4	COMPONENTES EN EL MERCADO	81
3.5	SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	85
3.5.1	SELECCIÓN DE SENSORES DISPONIBLES	85
3.5.2	SELECCIÓN DE ACTUADORES DISPONIBLES.....	89
3.5.3	SELECCIÓN DE CONTROLADOR	94
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES.....		100
4.1	CONCLUSIONES	100
4.2	TRABAJO A FUTURO.....	102
CAPÍTULO 5: BIBLIOGRAFÍA		103
ANEXOS		107
ANEXO A:	MATRICES DE SELECCIÓN DE SENSORES.....	107
ANEXO B:	TABLA DE INFORMACIÓN OBTENIDA DE FICHAS TÉCNICAS, PROVEEDORES PARA ACTUADORES Y CRITERIOS GENERALES.	111
ANEXO C:	TABLA DE INFORMACIÓN OBTENIDA DE FICHAS TÉCNICAS ACERCA DE CONTROLADORES.	115

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: PASOS DEL PROYECTO.....	17
FIGURA 2: MODELO JERÁRQUICO PARA LA TOMA DE DECISIONES CON EL AHP.....	23
FIGURA 3: MODELO JERÁRQUICO PARA LA TOMA DE DECISIONES CON SUBCRITERIOS.....	23
FIGURA 4: COMPONENTES DEL SISTEMA AS/RS DISEÑADO PARA LA UTM.....	29
FIGURA 5: SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO.....	30
FIGURA 6: INTERRUPTOR DE FINAL DE CARRERA.....	31
FIGURA 7: COMPOSICIÓN DEL FINAL DE CARRERA, A) EN REPOSO, B) ACCIONADO.....	32
FIGURA 8: A) SENSOR BLINDADO, B) SENSOR NO BLINDADO.....	33
FIGURA 9: COMPONENTES DEL SENSOR DE PROXIMIDAD INDUCTIVO.....	34
FIGURA 10: DETECCIÓN DEL RECORRIDO.....	35
FIGURA 11: DETECCIÓN DE POSICIÓN DE UNA VÁLVULA.....	36
FIGURA 12: DETECCIÓN O AUSENCIA DE PIEZAS METÁLICAS.....	36
FIGURA 13: MAQUINADO DE METALES.....	36
FIGURA 14: SENSOR DE PROXIMIDAD CAPACITIVO.....	37
FIGURA 15: FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR DE PROXIMIDAD CAPACITIVO.....	37
FIGURA 16: SENSOR DE PROXIMIDAD CAPACITIVO SUPERVISANDO EL NIVEL DE LLENADO DE TANQUES.....	38
FIGURA 17: SENSOR DE PROXIMIDAD CAPACITIVO VERIFICANDO EL VOLUMEN DE LLENADO.....	38
FIGURA 18: SENSOR DE PROXIMIDAD ULTRASÓNICO.....	39
FIGURA 19: EJEMPLO DE APLICACIÓN DE UN SENSOR DE PROXIMIDAD ULTRASÓNICO.....	40
FIGURA 20: SENSOR MAGNÉTICO.....	40
FIGURA 21: FUNCIONAMIENTO DE SENSOR DE PROXIMIDAD MAGNÉTICO.....	41
FIGURA 22: COMPOSICIÓN DE UN SENSOR DE PROXIMIDAD ÓPTICO.....	42
FIGURA 23: SENSOR ÓPTICO.....	42
FIGURA 24: RESOLVER.....	44
FIGURA 25: ENCÓDER LINEAL INCREMENTAL.....	45
FIGURA 26: ENCÓDER LINEAL ABSOLUTO.....	45
FIGURA 27: ENCÓDER ROTATIVO INCREMENTAL.....	46
FIGURA 28: ENCÓDER ROTATIVO ABSOLUTO.....	46
FIGURA 29: TACÓMETRO.....	47
FIGURA 30: MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA.....	48
FIGURA 31: COMPONENTES DE ACTUADOR NEUMÁTICO.....	51
FIGURA 32: COMPONENTES DE UN ACTUADOR HIDRÁULICO.....	54
FIGURA 33: : PLC S7-1500, MARCA SIEMENS.....	55
FIGURA 34: COMPONENTES DEL PLC.....	57
FIGURA 35: PLC S 7, MARCA SIEMENS.....	59
FIGURA 36: CONTROLADOR DE MOVIMIENTO CNC, SIMOTION, MARCA SIEMENS.....	59
FIGURA 37: PIRÁMIDE DE COMUNICACIONES.....	61
FIGURA 38: PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE CADA UNO DE LOS NIVELES.....	62
FIGURA 39: ANAQUEL ESTÁTICO.....	66
FIGURA 40: EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE FÁBRICAS DE APRENDIZAJE.....	74
FIGURA 41: JERARQUÍA PARA LA SELECCIÓN DE UN SENSOR.....	86
FIGURA 42: JERARQUÍA PARA SELECCIONAR UN ACTUADOR.....	90
FIGURA 43: JERARQUÍA PARA LA SELECCIÓN DE UN CONTROLADOR.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: MATRIZ DE DECISIÓN.	22
TABLA 2: ESCALA DE PESOS ASIGNADOS A LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	25
TABLA 3: VARIANTES DE SENSORES DE PROXIMIDAD.	43
TABLA 4: TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS.	50
TABLA 5 CLASIFICACIÓN DE ACTUADORES DE NEUMÁTICOS.	53
TABLA 6: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS ACTUADORES HIDRÁULICOS.	54
TABLA 7: DIFERENCIAS ENTRE PLC Y CONTROLADOR DE MOVIMIENTO CNC.	59
TABLA 8: CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL.....	62
TABLA 9: CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTES DEL SISTEMA AS/RS PROPUESTO EN LA UTM.....	65
TABLA 10: PESOS DE POSIBLES MOTORES SELECCIONADOS.....	72
TABLA 11: CARRERAS, MATERIAS, TEMAS Y SUBTEMAS QUE SE ABARCARÁN CON EL USO DE UN SISTEMAS AS/RS.	76
TABLA 12: : LISTA DE SENSORES DISPONIBLES Y POSIBLES A UTILIZAR PARA EL SISTEMA.	82
TABLA 13: LISTA DE ALTERNATIVAS.....	83
TABLA 14: LISTA DE ACTUADORES CON ALGUNOS CRITERIOS.....	83
TABLA 15: LISTA DE ALTERNATIVAS PARA CADA EJE.	84
TABLA 16: LISTA DE PLC CON SUS RESPECTIVOS PRECIOS, SEGÚN SU PROVEEDOR	84
TABLA 17:LISTA DE CONTROLADORES DE MOVIMIENTO CNC CON SUS RESPECTIVOS PRECIOS, SEGÚN SU PROVEEDOR.	85
TABLA 18: MATRIZ COMPARACIÓN POR PARES-CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE SENSORES.	87
TABLA 19: ÍNDICES ALEATORIOS DE CONSISTENCIA.....	88
TABLA 20: CRITERIO DE ACEPTACIÓN.	88
TABLA 21:RESULTADOS DE LA RAZÓN DE CONSISTENCIA.	88
TABLA 22: CUADRO RESUMEN DE CADA ALTERNATIVA RESPECTO A CADA CRITERIO (REÚNE LOS VALORES DEL VECTOR PROMEDIO PARA CADA CRITERIO Y DE LA MATRIZ COMPARACIÓN POR PARES CRITERIOS).....	89
TABLA 23: MATRIZ COMPARACIONES POR PARES CRITERIOS DEL EJE X.	91
TABLA 24: MATRIZ COMPARACIONES POR PARES CRITERIOS DEL EJE Y.	91
TABLA 25: MATRIZ COMPARACIONES POR PARES CRITERIOS DEL EJE Z.	92
TABLA 26: RESULTADOS DE LA RAZÓN DE CONSISTENCIA PARA CADA EJE.....	93
TABLA 27: CUADRO RESUMEN DE CADA ALTERNATIVA RESPECTO A LOS CRITERIO (REÚNE LOS VALORES DEL VECTOR PROMEDIO PARA CADA CRITERIO Y DE LA MATRIZ COMPARACIÓN POR PARES CRITERIOS) DEL EJE X.	93
TABLA 28: CUADRO RESUMEN DE CADA ALTERNATIVA RESPECTO A LOS CRITERIO (REÚNE LOS VALORES DEL VECTOR PROMEDIO PARA CADA CRITERIO Y DE LA MATRIZ COMPARACIÓN POR PARES CRITERIOS) DEL EJE Y.	94
TABLA 29: CUADRO RESUMEN DE CADA ALTERNATIVA RESPECTO A LOS CRITERIO (REÚNE LOS VALORES DEL VECTOR PROMEDIO PARA CADA CRITERIO Y DE LA MATRIZ COMPARACIÓN POR PARES CRITERIOS) DEL EJE Z.	94
TABLA 30: MATRIZ COMPARACIÓN POR PARES CRITERIOS DE PLC.	96
TABLA 31: MATRIZ COMPARACIÓN POR PARES CRITERIOS DE CNC.	97
TABLA 32: RESULTADOS DE LA RAZÓN DE CONSISTENCIA PARA CADA CONTROLADOR.	98
TABLA 33: CUADRO RESUMEN DE CADA ALTERNATIVA RESPECTO A CADA CRITERIO (REÚNE LOS VALORES DEL VECTOR PROMEDIO PARA CADA CRITERIO Y DE LA MATRIZ COMPARACIÓN POR PARES CRITERIOS) DE UN PLC.	98
TABLA 34: CUADRO RESUMEN DE CADA ALTERNATIVA RESPECTO A CADA CRITERIO (REÚNE LOS VALORES DEL VECTOR PROMEDIO PARA CADA CRITERIO Y DE LA MATRIZ COMPARACIÓN POR PARES CRITERIOS) DE UN CNC.	99

INTRODUCCIÓN

La presente investigación hace referencia al tema de la selección de sensores, actuadores y controlador de un sistema AS/RS (*Automatic Storage and Retrieval System*) didáctico, el cual se puede definir como un sistema automático de almacenamiento y recuperación que realiza el almacenamiento así como operaciones de recuperación con velocidad y precisión bajo un grado definido de automatización [1].

En la actualidad, la automatización es de gran ayuda para mantener la productividad y competitividad de las empresas, pues permite satisfacer demandas cambiantes, así como desarrollar y planificar estrategias que integren distintas áreas donde se deban tomar decisiones ya sean de procesos, administrativas, de calidad, capacidad en planta y operación. Esto trae consigo un incremento de la productividad, reducción de costos de producción, disminución de errores humanos, mejoramiento de la calidad, aumento de la mejora de las condiciones de trabajo de los operarios, mayor precisión en los procesos y mayor rapidez de respuesta con los clientes [2] y así evitar la competencia excesiva, logrando hacer una diferenciación de sus productos ante otras empresas. Sin embargo, automatizar no es tan simple como parece, ya que los ingenieros o encargados de área, antes de llegar a la decisión de automatizar, deben realizar una inspección profunda de los procesos que se encuentran dentro de éstas, para determinar dónde se requiere la automatización. Para este fin debe también tomarse en consideración si la operación corresponde a una 4D, es decir, si es tediosa (*Dull*), peligrosa (*Dangerous*), difícil (*Difficult*) o sucia (*Dirty*).

Sin embargo, en muchas ocasiones no se toman en cuenta los aspectos antes mencionados, si no que los empresarios notan que un proceso no se encuentra estable, en este caso es necesario recurrir a herramientas de ingeniería industrial que ayuden a analizar, dirigir, crear, rediseñar, mejorar, implementar y controlar los procesos, eligiendo la tecnología que más se adecue a la empresa.

El tema de almacenamiento ha tomado gran importancia para las empresas a nivel mundial, pues se ha sabido que la distribución de los recursos en un almacén recae en gran parte en las operaciones de preparación de pedidos, éstas pueden llegar a suponer más del 60% de sus costes de explotación. Un tiempo importante invertido en la recolección o *picking*, es aquel dedicado a localizar y transportar las unidades de carga entre las distintas zonas del almacén, estos

movimientos o recorridos pueden ser automatizados por secciones [3]. En la actualidad se sabe que los ingresos de almacenamiento, junto con el sector de transporte y correo incrementaron 1.84% durante el periodo noviembre-diciembre 2017 y presentaron un incremento del 6% anual, según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [4]. Las tendencias del comprador final en el mundo se dirigen hacia un nivel de servicio personalizado, lo que ha provocado que los mercados adopten tecnologías que permitan tener agilidad y el control necesario para alcanzar dichos estándares, y, sobre todo, contar con más aplicaciones y cubrir las necesidades del cliente [4].

Las características principales de este tipo de almacenamiento son: incrementar la capacidad, aumentar la densidad, recuperar el espacio del piso de la fábrica utilizado para almacenar el trabajo en proceso, mejorar la seguridad, reducir el robo, mejorar la precisión en la función del almacenamiento, reducir el costo de producción, incrementar la productividad laboral en operación de almacenado, incrementar el rendimiento, mejorar el control de inventarios, la rotación de existencias y el servicio al cliente [5]. En la actualidad este tipo de sistemas de almacenamiento han tomado gran importancia dentro de la industria mexicana para lograr aumentar la competitividad y la productividad en las empresas, reasignando el personal a otras áreas de la empresa.

Para analizar esta problemática es necesario mencionar sus causas. Una de ellas es la carencia de capital humano para el manejo de este tipo de sistemas en la industria mexicana, por lo tanto, muchas empresas han optado por la capacitación de sus ingenieros, al ver esta situación algunas universidades han mostrado gran interés por este tema, ya que sus estudiantes tienen menor número de posibilidades para integrarse a la industria por falta de conocimiento. Es por eso, que varias instituciones educativas a nivel nacional e internacional han elaborado estrategias didácticas para disminuir el rezago en cuanto al tema, y así reforzar los conocimientos en sus alumnos. Dentro de estas opciones se encuentra el uso de sistemas AS/RS, sistemas integrados o sistemas reconfigurables de manufactura. Algunas de estas instituciones son: Instituto Politécnico Nacional ESIME Zacatenco, Instituto Tecnológico de Monterrey en los campus Toluca, Saltillo, Tampico, Chihuahua, Monterrey, Cuernavaca y Estado de México, Universidad Politécnica del Valle de México Campus Tultitlán, Instituto Tecnológico Superior del Occidente del Estado de Hidalgo, Instituto Tecnológico de San Juan del Río Querétaro,

Instituto Tecnológico de Río Verde San Luis Potosí, Universidad Tecnológica del Norte de Aguascalientes. A nivel internacional se encuentran instituciones como: ETI Francisco de Miranda, Venezuela; Instituto Presbiteriano Mackenzie Sao Pablo, Brasil; Pontifica Universidad Católica de Perú, Pontifica Universidad Católica de Río Grande del Sur Brasil; Servicio Nacional de Aprendizaje de Barranquilla, Bogotá y Medellín; Universidad de Lima en Perú; Universidad Santiago de Chile y Universidad Bío Bío, Chile.

Con la implementación de este sistema en la Universidad Tecnológica de la Mixteca (de aquí en adelante UTM) se estará beneficiando, a priori, a cuatro de las carreras de su oferta educativa, las cuales son: Ingeniería Industrial, Mecánica Automotriz, Mecatrónica y Electrónica; reforzando materias cómo son automatización industrial, autómatas programables, control y automatización.

El presente trabajo se desarrolló a través de 4 capítulos, los cuales se presentan a continuación:

Capítulo 1: Incluye las generalidades del proyecto, el por qué (justificación), el para qué (los objetivos) y el cómo (la metodología).

Capítulo 2: Se comentan conceptos básicos sobre la metodología a utilizar, dispositivos a seleccionar y sistemas de almacenamiento, además de explicar el funcionamiento de cada uno de ellos.

Capítulo 3: Se seleccionan los dispositivos para el proyecto, siguiendo la metodología AHP, la cual es una herramienta multicriterio que permite la selección de tecnologías y equipos en general, útil en diferentes áreas debido a su facilidad de aplicación.

Capítulo 4: Se formulan las conclusiones a las que se ha llegado mediante la metodología aplicada, se presentan los principales resultados y se proyecta el trabajo a futuro.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a que la tecnología ha ido evolucionando, el entorno competitivo para las empresas se ha vuelto un tanto difícil, los cambios tecnológicos son un factor clave en el desarrollo de las compañías, es por eso que muchas de ellas adoptan algunos cambios que se adecuen a sus operaciones, procesos y sistema de almacenamiento, permitiéndoles mantenerse por delante de la competencia [6].

“El impacto tecnológico en muchas industrias ha sido grande y aun mayor para la industria de entregas y almacenes, las cuales deben adaptarse a estos cambios para garantizar una agradable experiencia al consumidor, debido a que muchos de ellos están dispuestos a pagar por la inmediatez de sus productos, para esto, una de las soluciones ha sido incorporar tecnología en sus almacenes integrando así a los sistemas AS/RS” [2].

“En México, compañías creadoras de sistemas de almacenamiento automático como Mecalux y Stocklin, afirman que tienen problemas para encontrar capital humano capacitado para el manejo de este tipo de almacenes. Generalmente las empresas compensan esta falta con cursos intensivos de capacitación para sus ingenieros, lo que no les resulta muy favorable” [7].

“Actualmente la formación de capital humano capaz de manejar estos sistemas puede ser complicada por cuestiones de accesibilidad a la máquina, es por eso que varias universidades de México han ido incorporando nuevas estrategias de enseñanza, una de ellas involucra la creación de sistemas de almacenamiento AS/RS para el desarrollo de prácticas y reforzar conocimientos adquiridos en el aula, en la UTM se imparten cuatro carreras con materias relacionadas al tema de automatización, estas materias son: automatización industrial, autómatas programables, así como control y automatización. Este tipo de sistemas no solo puede servir como material didáctico sino también como apoyo a la investigación” [7].

Cabe resaltar que la UTM ya cuenta con un diseño de la estructura física de un sistema AS/RS [7] para fines didácticos, el cual aún no se ha instrumentado dado que no es una tarea fácil de llevar a cabo, pues no es simplemente una selección de componentes con respecto a sus

ventajas cuantitativas, si no que implica otros criterios de forma cualitativa como lo son las necesidades de la universidad, objetivos de la materia, mantenimiento requerido, presupuestos, etc., lo que hace complicada la selección de controlador, sensores y actuadores para poner en marcha este sistema. Es por eso que al realizar este proyecto se pretende contribuir al desarrollo del sistema dentro de la UTM y da paso a las fases restantes, tales como la manufactura de la estructura física, componentes de seguridad, programación, entre otras.

El alcance de este proyecto se plantea hasta la propuesta del controlador, los sensores y actuadores, componentes fundamentales del sistema AS/RS. La selección se hará por medio de la metodología **AHP** (por sus siglas en inglés *Analytic Hierarchy Process, a partir de aquí AHP*), ésta se empleará como una herramienta de apoyo en la toma de decisiones en los problemas de selección de múltiples criterios agregando diferentes tipos de información tanto cualitativa como cuantitativa, todo esto con el único fin de hacer una adecuada selección de componentes, para así garantizar un desempeño adecuado del sistema AS/RS.

Para el desarrollo de este proyecto de tesis se plantearon las siguientes preguntas:

¿Cuáles son los principios de funcionamiento del AS/RS?

¿Cuáles son los componentes de la estructura del AS/RS diseñado para la UTM?

¿Cuáles son los temas de las materias de ingeniería que pueden utilizar el AS/RS como un instrumento didáctico?

¿Cuáles son los requerimientos a considerar en el AHP?

¿Cuáles son los componentes disponibles comercialmente que cubren con los criterios identificados?

¿Cuáles son los componentes que cubren los requerimientos identificados?

1.2 JUSTIFICACIÓN

“Actualmente las tendencias del comprador final en el mundo han cambiado respecto a un nivel de servicio personalizado, lo que ha provocado que mercados como el mexicano adopten tecnologías que permitan tener agilidad y el control necesario para alcanzar dichos

estándares, y, sobre todo, contar con más aplicaciones y cubrir las necesidades del cliente. Según Gustavo Gómez, Director Delegación CDMX de Mecalux México” [4].

Cabe mencionar que muchas de estas tecnologías se han dirigido a los almacenes, ya que permiten ganar competitividad dentro de la industria, recortando tiempos de respuesta y aumentando la seguridad [4]. Sin embargo, esta tarea en México no ha sido nada fácil de implementar debido a que en nuestro país no cuenta con personal capacitado para el manejo de sistemas de almacenamiento AS/RS.

Es por eso, que algunas universidades en México han desarrollado sistemas de almacenamiento AS/RS que se adecuen a sus espacios sin alterar su funcionamiento principal, con el único fin de formar personas competentes y capaces para el uso de este tipo de sistemas.

En el caso de la UTM ya se tiene el diseño de la estructura física del AS/RS [7] y se cuenta con tornos, fresadoras CNC, cortadora de plasma, electroerosionadora, soldadoras, termoformadora, entre otras máquinas y herramientas útiles para la fabricación del sistema dentro de las instalaciones de la Universidad. Éste una vez fabricado permitirá incorporarlo como apoyo didáctico en materias impartidas en la institución, facilitando así “realizar prácticas de automatización de un proceso en un ambiente controlado y sin riesgos a pérdidas, sin requerir el espacio físico excesivo y con un costo manejable. Contar con un sistema AS/RS generaría grandes impactos en la enseñanza como son: la capacitación en entornos de fabricación de forma realista, modernizar el proceso de aprendizaje y acercarlo a la práctica industrial, aprovechar la práctica industrial mediante la adopción de nuevos conocimientos y tecnologías de fabricación e impulsar la innovación en la fabricación al mejorar las capacidades de los ingenieros. Asimismo, este sistema facilitará apoyar la investigación por parte de profesores en esta área, ya que permitirá generar simulaciones y desarrollar modelos que aborden una problemática en particular. Por otra parte, los alumnos al hacer uso de este equipo reforzarán y adquirirán conocimientos para que una vez que se encuentren laborando puedan desempeñarse más efectivamente, provocando así la innovación dentro de la industria y por ende aportar para el crecimiento económico” [7].

Para poder avanzar en el diseño del sistema AS/RS es necesario realizar una selección correcta del controlador, sensores y actuadores; componentes que permitirán que el sistema

cumpla con su funcionamiento principal, para esto será necesario hacer uso de algún método que facilite esta selección considerando diversos criterios.

Existen varios métodos para la toma de decisiones con criterios múltiples, pero la metodología AHP es una de las más utilizadas en comparación con los otros métodos, pues resulta útil y sencilla de usar para la selección [9]. Ésta se ha utilizado con buenos resultados para la selección y diseño de sensores [9], [10] y [11], con ella se obtienen resultados similares o con una pequeña diferencia en precisión según comparaciones con otros métodos multicriterio [12].

Para hacer uso de esta metodología debe existir previo conocimiento sobre las alternativas para hacer una correcta selección. Para este fin se han cursado las tres materias optativas del área de especialización en manufactura: Manufactura Asistida por Computadora, Sistemas de Manufactura, Automatización Industrial, las cuales aportan el conocimiento requerido.

1.3 HIPÓTESIS

La selección del controlador, actuadores y sensores de un sistema AS/RS didáctico, puede ser posible con la aplicación de la metodología de decisión multicriterio AHP.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Seleccionar mediante el uso de la metodología AHP, el controlador, los sensores y actuadores para la estructura física del sistema AS/RS propuesto para la Universidad Tecnológica de la Mixteca [7], contemplando los requerimientos didácticos de las materias del área de automatización de las carreras de ingeniería industrial, ingeniería mecánica automotriz, ingeniería en mecatrónica e ingeniería en electrónica que se imparten en la universidad.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS Y METAS

OBJETIVOS	METAS
I. Entender el principio de funcionamiento de un AS/RS.	<ul style="list-style-type: none">• Realizar una investigación referente a:<ul style="list-style-type: none">○ Describir conceptualmente el funcionamiento de cada uno de los componentes a estudiar.

- Características de los diferentes tipos de sensores, actuadores y controladores.
- II. Estudiar la estructura física del AS/RS diseñado para la UTM.
 - Crear una tabla con las características más relevantes de las partes diseñadas para el AS/RS, que afecten la selección de los componentes.
- III. Identificar los temas de las materias del área de automatización que pueden emplear el AS/RS como instrumento didáctico.
 - Realizar una investigación sobre las carreras que están relacionadas con la materia de automatización.
 - Visitar la página web de la UTM para consultar los temarios de las carreras allí impartidas.
 - Listar las carreras, materias y temas que puedan utilizar el sistema AS/RS o sus componentes como un instrumento didáctico.
 - Analizar los objetivos de cada materia, así como el perfil del egresado.
- IV. Definir los requerimientos a considerar en el AHP.
 - Establecer parámetros para componentes como: costo, proveedor, precisión, velocidad de respuesta, fiabilidad, mantenimiento, rango de medición y parámetros para fines didácticos como: prestaciones didácticas, tipo de conexión, facilidad para modificar o reconfigurar el dispositivo, entre otros.
- V. Investigar los componentes comerciales que cumplen los requerimientos.
 - Analizar componentes usados en propuestas similares.
 - Crear una lista de los componentes comerciales que cumplan con los requerimientos.

- VI. Selección de componentes con base en los requerimientos identificados. • Aplicar la metodología AHP para la selección de los componentes.

1.5 METODOLOGÍA

“El método de investigación corresponde con la investigación descriptiva, la cual busca especificar propiedades, características y riesgos importantes de cualquier fenómeno que se analice” [13]. La metodología empleada para la selección de dispositivos para el buen desempeño del sistema AS/RS de la UTM se compone de una serie de 7 pasos, como se muestra en la figura 1.

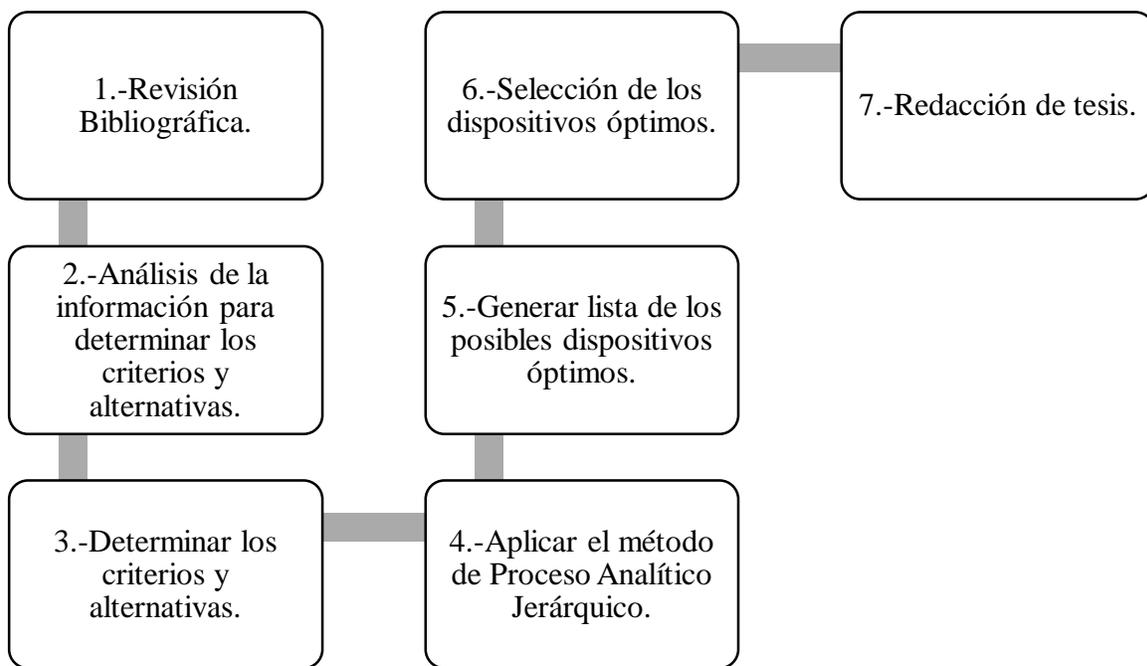


Figura 1: Pasos del proyecto.

En seguida, se describirán cada uno de los pasos con las actividades correspondientes para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto de tesis.

Paso 1: Revisión bibliográfica

Esta parte se basa en el análisis de la información obtenida de artículos científicos, libros, páginas web y documentos de investigación (tesis), con el único fin de comprender cada uno de los temas a desarrollar en este proyecto.

Paso 2: Análisis de la información para determinar los criterios y alternativas

Una vez que se ha entendido cada una de las partes que aborda este proyecto de investigación, se pasó a analizar el diseño de la estructura física del sistema AS/RS propuesto para la universidad, en este apartado se realizó una tabla de los componentes que conforman al sistema con sus respectivas medidas, así como también se analizaron los objetivos de las materias y perfil del egresado de las cuatro carreras relacionadas al tema.

Cabe mencionar que estas dos actividades son relevantes para determinar los criterios a evaluar en los componentes a seleccionar.

Paso 3: Determinar los criterios y alternativas

De acuerdo a las actividades realizadas en los pasos anteriores, se determinaron los criterios que presentaron más peso en la selección, una vez ya determinados los criterios se evaluaron los componentes comerciales con esas especificaciones.

Paso 4: Aplicar el método de proceso analítico jerárquico

Una vez que se tienen la lista de los componentes comerciales se llevó a cabo el método de AHP para la selección de sensores, actuadores y controlador cuya teoría se ha explicado en páginas posteriores.

Paso 5: Generar lista de los posibles dispositivos óptimos

Ya que se ha finalizado el proceso del AHP, de acuerdo a los valores arrojados por el método, se realizó una lista de los componentes con mejor valor (según el método AHP) para el desempeño del sistema AS/RS.

Paso 6: Selección de los dispositivos óptimos

En este paso se realizó con ayuda de la lista obtenida en el paso anterior.

Paso 7: Redacción de tesis

Una vez concluidas las actividades anteriores, se inició con la escritura del documento para cada actividad hasta llegar al resultado, posteriormente, al finalizar las actividades se elaboró un apartado de conclusiones.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 ANÁLISIS MULTICRITERIO

Desde la antigüedad las empresas han buscado incrementar o mantener la eficiencia, la productividad y la competitividad, la toma de decisiones dentro de las empresas no es algo fácil de hacer puesto que mucha de las veces depende la supervivencia de la misma, lo que ha conllevado al desarrollo de modelos de preferencia, es decir, herramientas que permiten abordar el problema de decisión multicriterio de una forma sistemática y científica, buscando favorecer el proceso y ayudar a quien toma la decisión” . Estas nuevas metodologías que apoyan la toma de decisión involucran el estudio de múltiples variables (que pueden llegar a ser cualitativos, cuantitativos o una mezcla de ambos) y criterios de selección.

Para estos casos es necesario hacer uso de metodologías o herramientas que permitan realizar un análisis de las alternativas, ayudando a la eliminación de supuestos y dirigiendo a una solución en función de las preferencias del agente decisor o de los intervinientes en el proceso y de los objetivos predefinidos [14] y [15].

Principalmente consiste en [15]:

- Seleccionar la mejor o las mejores alternativas.
- Aceptar alternativas que parecen buenas y rechazar aquellas que parecen menos buenas.
- Generar una ordenación o ranking de las alternativas consideradas de la mejor a la peor.

“Aquellos problemas en los que las alternativas de decisión son finitas se denominan problemas de decisión multicriterio discreta. Por otro lado, cuando el problema toma un número infinito de valores, y que conduce a un número infinito de alternativas posibles, se llama decisión multiobjetivo” [14].

Principales métodos de decisión multicriterio discretos son [15]:

- Ponderación lineal o *Scoring*.
- Utilidad multiatributo (MAUT).
- Relaciones de sobre clasificación.

- Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

2.2 PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO

Cuando se hace mención de problemas que involucran un número finito de variables se recurre a métodos de decisión multicriterio, el más utilizado actualmente es el AHP, una herramienta sencilla que permite ayudar a las personas en la toma de decisiones ante problemas. “Por su simplicidad y su poder ha sido empleado en cientos de aplicaciones en las cuales se han obtenido importantes resultados” [8].

Como se mencionó anteriormente el método más usado es el AHP desarrollado por Tomas Saaty, que se caracteriza por su flexibilidad, la cual facilita el entendimiento de la situación de los problemas. Esto permite llevar a cabo un proceso ordenado y gráfico de las etapas requeridas en la toma de decisiones.

Asimismo, “el AHP permite analizar por separado la contribución de cada componente del modelo respecto al objetivo general” [15]. Este es uno de los métodos con más aplicabilidad en la actualidad debido a sus características, ha sido muy útil en la selección de sensores como se puede ver en los artículos [11], [16] y [10].

“El AHP nos ofrece un método para medir el grado de congruencia entre las opiniones que proporciona el decisor, pudiendo saber si esta es aceptable o si es necesario reconsiderar los juicios antes de continuar con el proceso de decisión” [17], lo cual proporciona una validación del proceso de selección a medida que este se desarrolla.

“El AHP es una técnica de decisión multicriterio que permite trasladar la realidad percibida por el individuo a una escala de razón en la que se reflejan las prioridades relativas de los elementos considerados” [14].

“El AHP es un método matemático creado para evaluar alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios, está basado en el principio que la experiencia y el conocimiento de los actores, estos últimos son tan importantes como los datos utilizados en el proceso” [8].

“El AHP es una metodología de trabajo lógica y estructurada que optimiza la toma de decisiones complejas cuando existen múltiples criterios o atributos, mediante la descomposición del problema en una estructura jerárquica” [18].

Al hacer uso de la metodología AHP se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Las personas involucradas deben conocer muy bien el problema.
- Si en la estructura jerárquica no se consideran factores importantes, los pesos asignados a los criterios pueden distorsionarse causando errores en los resultados.

El objetivo del AHP es ayudar al decisor a estructurar un problema multicriterio en forma visual, mediante la elaboración de una jerarquía de atributos, la cual puede llegar a tener como mínimo tres niveles [19]:

- I. El propósito u objetivo global del problema, situado en la parte superior.
- II. Los distintos atributos o criterios que definen las alternativas en el medio.
- III. Las alternativas que ocurren en la parte inferior del diagrama.

Una vez construido el modelo jerárquico, se realizan comparaciones a pares entre alternativas según cada criterio y se atribuyen valores numéricos a las preferencias indicadas por las personas que intervienen en el proceso de decisión [19]. Posteriormente realizadas las comparaciones entre las alternativas para cada criterio, se elabora la matriz de decisión que contiene el resultado de los vectores promedios.

“La toma de decisiones multicriterio discreto trabaja con un número finito, generalmente pequeño, de alternativas predeterminadas, $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ del cual se conoce además su evaluación sobre cada uno de los criterios, X_1, X_2, \dots, X_n , de carácter cuantitativo o cualitativo y que se representa a través de la denominada matriz de decisión” [14].

Tabla 1: Matriz de decisión.

	X_1	X_2	...	X_j		X_n
A_1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1j}		X_{1n}
A_2	X_{21}	X_{22}	...	X_{2j}		X_{2n}
...
A_i	X_{i1}	X_{i2}	...	X_{ij}		X_{in}
...
A_m	X_{m1}	X_{m2}	...	X_{mj}		X_{mn}

Fuente: Basada en [14].

A partir de la matriz de decisión, podemos expresar que, X_{ij} es el resultado alcanzado por la alternativa A_i , $j = 1, \dots, n$. A partir de los valores más preferidos por el decisor, sobre cada uno de los atributos, se puede formar la alternativa ideal.

2.2.1 ESQUEMA DEL MODELO JERÁRQUICO

Una de las partes más relevantes del AHP, consiste en la estructura jerárquica del problema de forma visual, etapa en la cual el grupo decisor involucrado debe lograr desglosar el problema por partes en sus componentes principales.

Los pasos a seguir para obtener la estructuración del modelo jerárquico son [9]:

Etapa inicial: Recopilación de datos

- ❖ **Identificación del problema:** es la situación que se desea resolver mediante la selección de una de las alternativas posibles o la priorización de las mismas.
 - **Definición del objetivo:** es una declaración de algo que uno desea alcanzar.

Segunda etapa: Establecer criterios

- ❖ **Identificación de criterios-subcriterios y alternativas:** son los puntos de vista considerados importantes para la resolución de un problema o la consecución de un objetivo.

Establecer la jerarquía, se compone del objetivo y los criterios con los cuales se van a evaluar las alternativas (Figura 2).

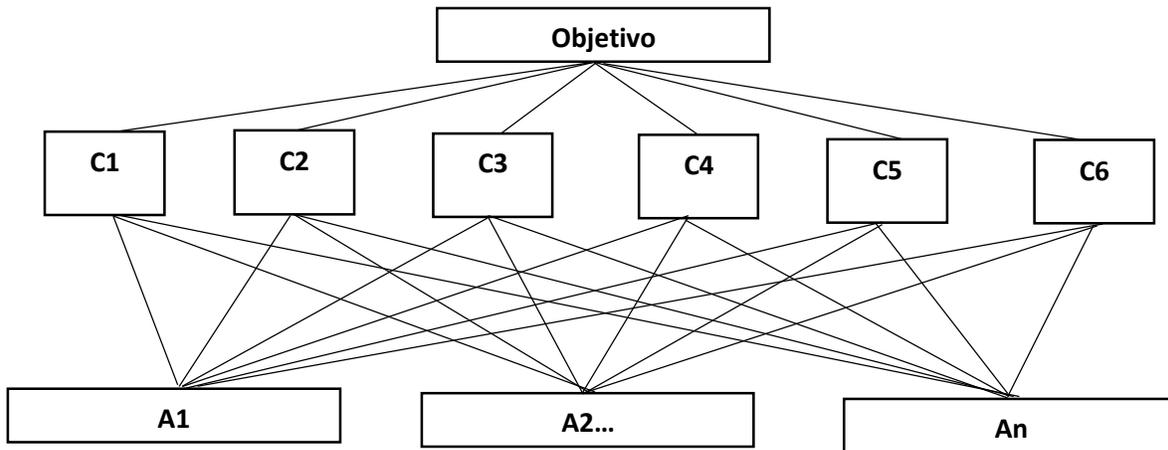


Figura 2: Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el AHP.
Fuente: [9].

En caso de que los criterios no sean lo suficientemente explícitos o claros, pueden incluirse subcriterios más operativos en forma secuencial entre el nivel de criterios y el de las alternativas (Figura 3), lo que origina un modelo jerárquico multinivel.

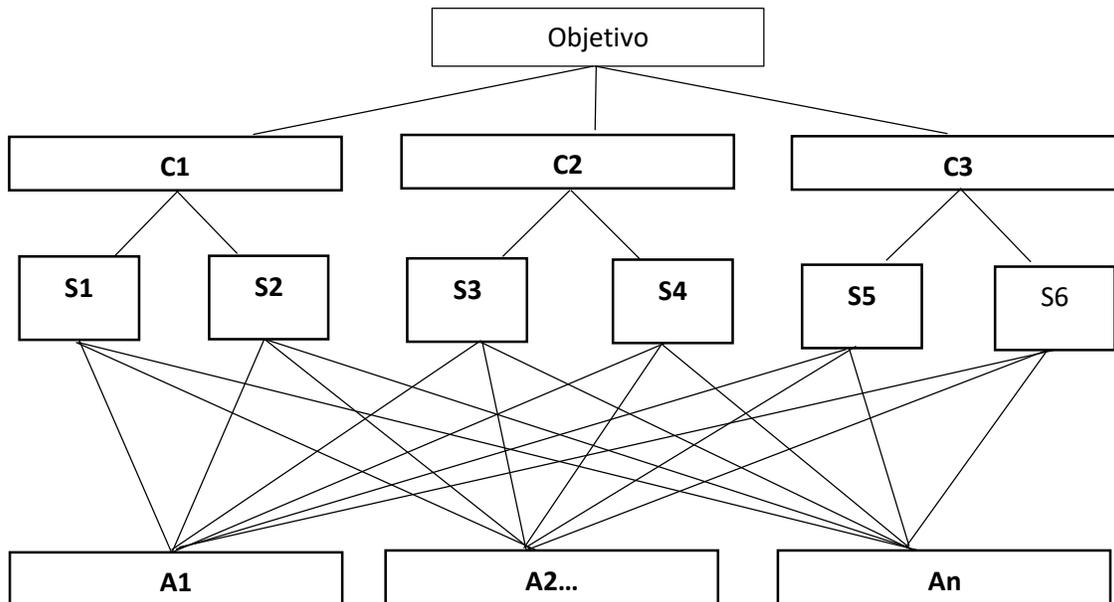


Figura 3: Modelo jerárquico para la toma de decisiones con subcriterios.
Fuente: Elaboración propia basada en [14].

Tercera etapa: Establecer matrices

❖ Realizar las comparaciones entre los distintos criterios de decisión

Para cada una de las opciones a seleccionar, se realiza una comparación de las distintas alternativas respecto a cada criterio. Cada uno de los criterios posee su propia ponderación o importancia para el evaluador y cada una de las alternativas satisface de diferente manera el logro de los criterios;

- Se asignan valores a las alternativas tomando como base el objetivo principal y la importancia dada por el evaluador considerando la escala de pesos de Saaty (véase Tabla 2).
- Se realizan las comparaciones a pares entre alternativas por cada criterio.
- La ponderación final de una alternativa es la suma de sus productos [11].
- Posteriormente se realiza la matriz normalizada para obtener el vector promedio
 - La matriz normalizada se obtiene a partir del valor asignado a cada alternativa entre la ponderación final de la alternativa.
 - Para finalmente obtener el vector promedio.
- Una vez que se obtienen los vectores promedio de cada criterio, se realiza la matriz de comparación por pares-criterios.
 - Obtener lambda máxima, índice de consistencia e índice de aleatorio, para determinar si la consistencia es aceptable (≤ 0.1) en caso contrario deberán examinarse los valores que fueron ingresados en la matriz.
- Se obtiene el vector promedio final, el cual nos indicará cuáles son las mejores alternativas (estas serán las que tengan un número mayor al de las demás).

Tabla 2: Escala de pesos asignados a los criterios de selección.

Pesos asignados a los criterios	Definición	Explicación
1	Igualdad de importancia entre el mismo criterio	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio
3	Moderadamente importante	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente a otro
5	Importante (esencial)	Un elemento domina fuertemente sobre el otro
7	Muy importante	El elemento domina al otro

Fuente: Basado en [20].

2.2.2 APLICACIONES DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)

El Proceso Analítico Jerárquico es una de las técnicas multicriterio con mayor práctica en casi todos los ámbitos de toma de decisiones, logrando ser uno de los más aplicados desde compañías hasta instituciones a nivel internacional debido a su aplicabilidad, ya que abarca desde un nivel táctico, estratégico u operativo [19].

Más adelante, se citan algunas referencias bibliográficas relacionadas al uso del método AHP:

En el artículo [8] y [19] aplica la metodología AHP para la toma de decisión de una localización óptima para construcción de un centro de atención de servicios médicos.

El artículo [11], aplica la metodología AHP en la selección de instrumentos de medición para tener la posibilidad de controlar un sistema, en este caso es aplicado a la selección de sensores para un fotobiorreactor.

El artículo [21] aplica el método AHP para determinar la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral.

El artículo [16] presenta la selección del sensor según la preferencia de criterios que decide qué grupo de sensores debe utilizarse para obtener el mejor resultado mediante el uso de métodos de decisión multicriterios, concluyendo así que la toma de decisiones con criterios múltiples es un buen enfoque para la selección inteligente de sensores.

El artículo [10], hace referencia a la selección del mejor sensor de temperatura y sensores alternativos, basado en AHP, mostrando que el AHP mejora el proceso de evaluación de selección del mejor sensor de temperatura.

En los artículos anteriores, se puede ver que el AHP es un buen método para la selección de sensores, pero hasta el momento no se encontraron artículos con criterios enfocados a la docencia así como también referentes a la selección de actuadores y controladores.

2.3 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO AUTOMATIZADOS

En los últimos años los avances tecnológicos han logrado cambios dentro y fuera de la industria, los sistemas automatizados son de última tecnología, en ellos predomina la rapidez de manipulación para almacenar, recuperar y aprovechar el espacio aéreo. Además reducen o eliminan la cantidad de inversión y participación humana [22].

Estos sistemas se dividen en dos tipos:

- Almacenamiento Automatizado / Sistemas de Recuperación (AS/RS) (*Automated Storage / Retrieval System*).
- Sistemas de almacenamiento de carrusel.

2.3.1 SISTEMA AS/RS

“Un sistema automatizado de almacenaje y recuperación (AS/RS), es un método controlado por computadora para almacenar y recuperar materiales y herramientas, utilizando anaqueles, silos, y apiladoras. Con el soporte de los AGV, un AS/RS puede recibir y entregar materiales sin la intervención de la mano humana” [23].

“Un AS/RS consiste en un conjunto de estanterías y pasillos, un mecanismo de almacenamiento y recuperación que se mueve entre estanterías, y un único punto donde se deposita o se recoge el material llamado *Pick and Deposit* (P&D)” [24].

2.3.2 TIPOS DE SISTEMAS AS/RS

Los tipos principales de almacenamiento son:

- AS/RS de unidad de carga (*Unit Load AS/RS*): “es un gran sistema automatizado controlado por computadora, diseñado para trasladar materiales

sobre plataformas mediante máquinas de S/R que manejan contenedores de unidad de carga” [24].

- *Deep-Plane AS/RS*: “es adecuado cuando se almacenan grandes cantidades de stock con un número pequeño de productos diferentes”[25].
- AS/RS de Minicarga (*Miniload AS/RS*): “es utilizado para manejar pequeñas cargas (partes individuales o provisiones) que están contenidas en arcas o cajones dentro del sistema de almacenaje” [24].
- AS/RS de hombre a bordo (*MAN-ON-BOARD AS/RS*): “permite al operador viajar sobre el carro de la máquina de S/R y tomar artículos particulares directamente de sus posiciones de almacenaje” [24].
- Sistema automatizado de recuperación de artículo (*AUTOMATED ITEM RETRIEVAL SYSTEM*): “estos sistemas almacenan los productos en carriles permitiendo la recuperación de artículos únicamente de forma individual. Para recuperar un producto se empuja el carril dejando caer la mercadería en un transportador para la entrega en la estación de recogida”[24].

2.3.3 COMPONENTES

A continuación, se hace una breve descripción de cada una de las partes a estudiar en este proyecto de investigación sobre el sistema AS/RS diseñado para la UTM (Figura 4):

- Unidad de control: Se encuentra dividida en dos partes, las cuales se describen brevemente a continuación [7]:
 1. Gabinete de control, se encuentra ubicado dentro y fuera del anaquel.
 2. Pantalla de control y teclado, ubicada en el exterior sobre la parte lateral del anaquel. Esta segunda parte queda en contacto directo con el usuario[7].
- El sistema de control tiene como propósito dirigir la maquina S/R (son máquinas para colocar y recuperar los artículos de los estantes) a un compartimento de almacenaje mediante combinaciones basadas en códigos alfanuméricos” [26].

Los sistemas de control pueden ser manejados por una computadora y/o PLC (Controlador Lógico Programable). “El control por computadora permite al AS/RS realizar transacciones de almacenaje en tiempo real, mantener registros de inventario

de manera precisa, monitorear el funcionamiento del sistema y comunicarse de manera sencilla con otros sistemas” [27].

- Maquinaria de almacenamiento: Permite recoger cargas en la estación de entrada para colocarlas en los módulos de almacenamiento y también recuperar cargas para entregarlas en la estación de salida. “La máquina S/R, mediante movimientos horizontales y verticales, debe ser capaz de alinear su carro con los compartimentos de almacenaje” [24].
- Actuador: Permitirá que se genere movimiento entre los elementos a partir de las órdenes dadas por la unidad de control [28].
- Sensor: Permite la interacción con el entorno detectando las acciones o impulsos que proporcionaran información de ciertas variables para poder procesarlas y así generar ordenes o activar procesos [29].
 - Sensor final: Tiene como finalidad indicar el límite del área de trabajo.
 - Sensor de límite: Indica el cero máquina.

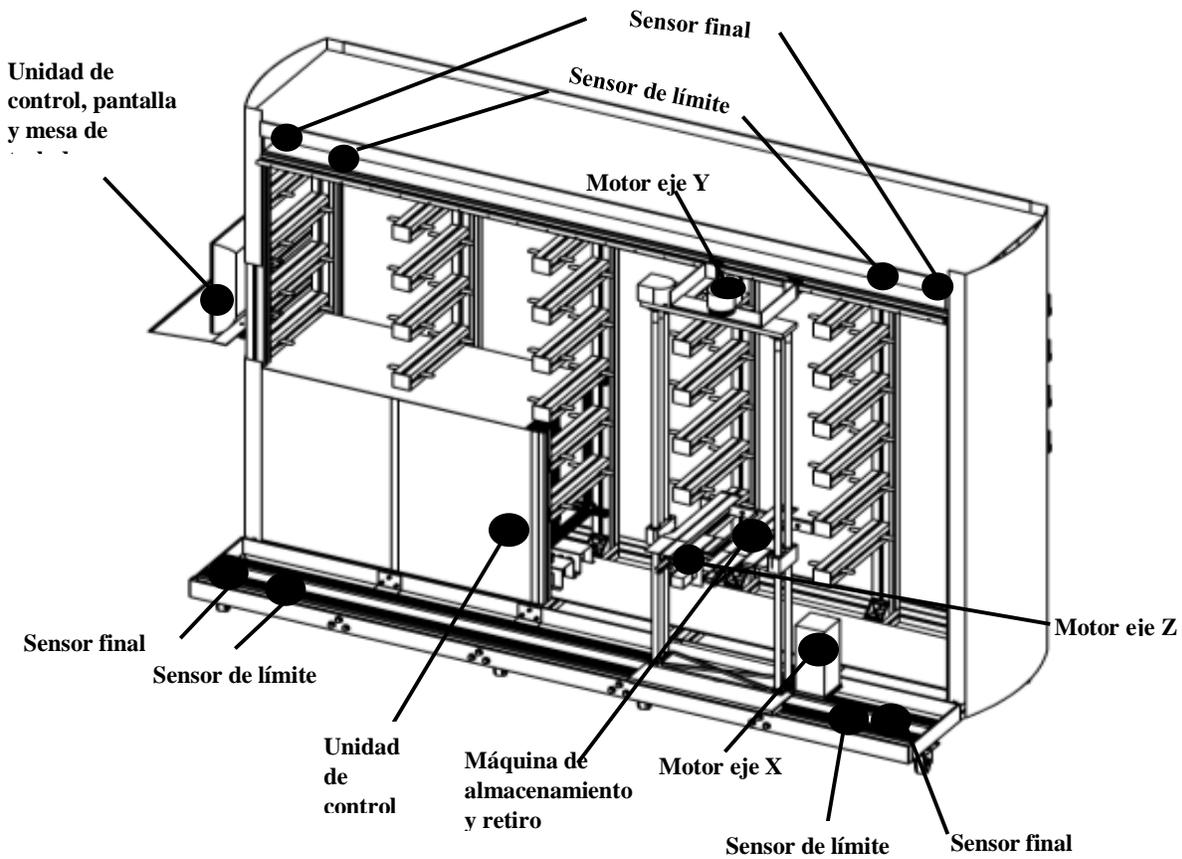


Figura 4: Componentes del sistema AS/RS diseñado para la UTM.

Fuente: Basado en [7].

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO

Ventajas

- Reduce los errores y accidentes en el almacén.
- Reduce el tiempo de manipulación.
- El empleo de los transelevadores permite almacenar a grandes alturas.
- Reduce el costo de personal.

Desventajas

- Inversión inicial muy alta.
- Elevados costes de mantenimiento
- Difícil de modificar una vez realizada su instalación
- La energía eléctrica es indispensable para su funcionamiento

Fuente: Basado en [5].

2.4 COMPONENTES DE INSTALACIONES AUTOMÁTICAS

“Los controles automáticos o sistemas de control constituyen una parte muy importante en la automatización de los procesos industriales, pues estos nos ayudan a controlar variables tales como la presión, temperatura, nivel, flujo, viscosidad, densidad etc., de un proceso” [30].

Una de las muchas aplicaciones de estos sistemas es en los sistemas AS/RS, en los cuales se emplean cada uno de los elementos de los sistemas de control (Figura 5) descritos a continuación.

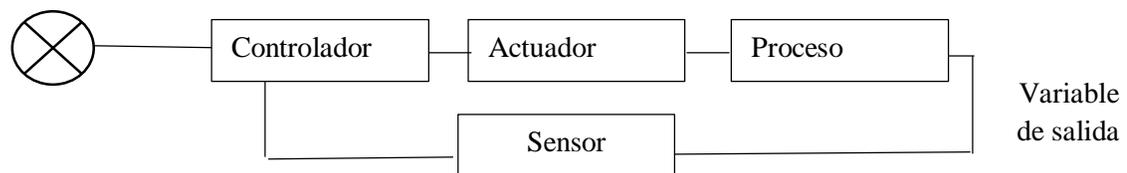


Figura 5: Sistema de control automático.
Fuente Basado en :[31].

2.4.1 SENSORES

Sensores Externos: dispositivo que genera una señal (de alguna característica a estudiar) de una determinada forma física (presión, nivel, temperatura, etc.), convertible en otra señal de una forma física diferente [27].

“Tienen como función ser las entradas del sistema automatizado, se encargan de medir variables externas y enviar información captada en forma de señales eléctricas” [32].

Los sensores externos pueden dividirse en dos tipos [33]:

- a) **De contacto**
- b) **Sin contacto**

a) Sensores de contacto

Interruptor de final de carrera

Para un AS/RS un interruptor de final de carrera tiene como objetivo definir los límites de la zona de trabajo, así como para establecer el cero máquina. Este último es la posición que toma como referencia el sistema para definir el desplazamiento sobre un eje.



Figura 6: Interruptor de final de carrera.

Se puede definir como un “dispositivo electrónico, que acciona de manera mecánica por el contacto de un objeto móvil sobre él, se emplea para detectar la posición concreta y definida de un objeto que se desplaza por una trayectoria fija y conocida” [32], es aplicado como un elemento de seguridad, es por eso que deben ser robustos y confiables [27].

Funciones del final de carrera

- **Como elemento de control**, es utilizado para conocer la posición de un objeto móvil y a partir de ello realizar una serie de órdenes de mando y acciones a realizar, ejemplos de estos son, la puesta en marcha o paro de algunas máquinas [34].
- **Como elemento de seguridad**, puede ser utilizado como un elemento de seguridad y al ser accionado corta el suministro eléctrico parando el sistema [34].
- **Como elemento de prevención de accidentes de seguridad en máquinas**, se emplea en maquinaria peligrosa y tiene como objeto detectar la apertura de algún elemento (puertas, tapas, rejillas, etc.) que permita el acceso de una zona peligrosa [34].

Composición del final de carrera

Un final de carrera consta de las siguientes partes (Figura 7) [34] y [32]:

Contactos eléctricos: puede estar formado por uno o varios contactos.

- **Accionador o dispositivo de ataque:** es el elemento que entra en contacto con el objeto móvil.
- **Cabezal del accionamiento:** elemento que transforma el movimiento del accionador en movimiento de accionamiento de los contactos eléctricos. Este elemento es necesario ya que no necesariamente debe activarse en ambas direcciones.
- **Cuerpo:** es la envoltura que protege a los contactos eléctricos, está insertado en el cabezal de accionamiento. Según el lugar de desplazamiento (posibilidad de impactos) el cuerpo puede ser de material plástico o metálico

- **Fijaciones:** tiene como objetivo la inmovilización del final de carrera, debe colocarse teniendo en cuenta las posiciones que puede adoptar el accionador frente al movimiento del objeto móvil.

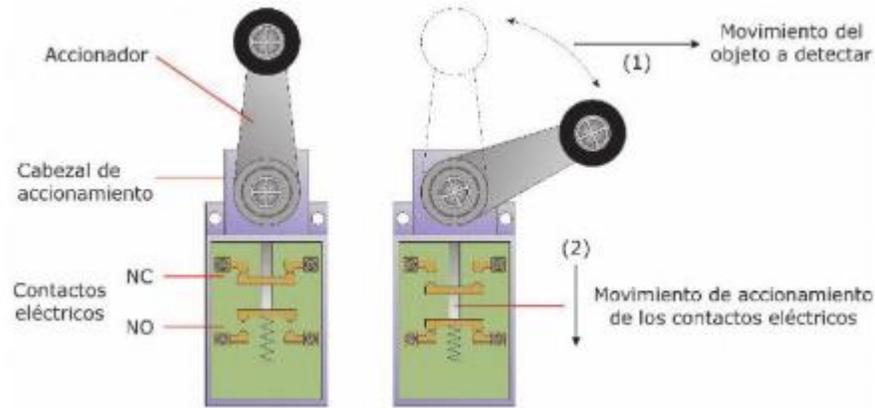


Figura 7: Composición del final de carrera, a) En reposo, b) Accionado.

Fuente: Basado en [32]

Ventajas según [35]:

- Capaces de detectar todo tipo de objetos siempre y cuando sean sólidos, independientemente de su color, volumen, rugosidad, etc.
- No son sensibles a interferencias externas, no les afectan los campos electromagnéticos ni las fuentes de suciedad.

Desventajas según [33]:

- Están sujetos a fallas mecánicas.
- Su tiempo promedio entre fallas es bajo en comparación con sensores sin contacto.
- La velocidad de operación es relativamente lenta en comparación con la velocidad de conmutación de microsensors fotoeléctricos, que es hasta 3000 veces más rápida.

Aplicaciones

Se utilizan en indefinidas aplicaciones en el ámbito industrial y doméstico, como ejemplo se enlistan algunas de ellas [35]:

- En una cinta transportadora para detectar si un objeto ha llegado al final.

- Sobre ejes donde se mueve una mesa, para detectar que está en el tramo final de la mesa.
- Como medida de seguridad en algunas aplicaciones comandadas por encoders. En este caso genera una parada de emergencia, ya que, aunque el encoder esté dando valores correctos, podría estarse acercando a una zona que no debe invadir.

b) Sensores sin contacto

Sensor de proximidad: se emplea para la detección de presencia o ausencia de un objeto; se distinguen dos tipos principales de sensores de proximidad: Inductivo y Capacitivo [33].

Sensor de proximidad inductivo: detectan objetos metálicos que se acercan al sensor sin tener contacto, se basan en el cambio de inductancia que provoca un objeto metálico en un campo magnético [36].

Existen dos tipos de sensores inductivos: blindados y no blindados [34].

- Blindados: permite que el campo electromagnético se concentre frente a la cara activa del sensor, lo que permite que sea montada a ras de una superficie metálica sin que produzca falsas detecciones, cabe mencionar que al hacer uso de este tipo de sensor el campo de detección se acorta.
- No blindados: permite un mayor alcance, pero requieren de una zona libre de metales alrededor de ellos.

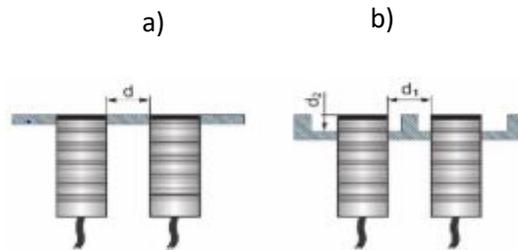


Figura 8: a) Sensor blindado, b) Sensor no blindado.

Fuente: Basado en [34]

Funcionamiento del sensor de proximidad inductivo

Crea un campo magnético mediante una bobina con cara sensible o activa y con una frecuencia alta generada mediante un oscilador. Cuando un objeto metálico se sitúa dentro de su campo de detección, se inducen unas corrientes parasitas en él. El resultado es una reducción en la amplitud de oscilación e incluso su bloqueo. Un circuito de control detecta esta reducción, activando la salida [34].

Composición del sensor de proximidad inductivo

El material del que se encuentra formado el cuerpo del sensor puede llegar a ser de plástico o metálico y con rosca o sin rosca, esto facilita el montaje del sensor mediante un par de tuercas. El cuerpo cuenta con un diodo LED que indica su estado, facilitando su comprobación operativa. Respecto a la salida de la señal, esta se puede llevar a cabo mediante un cableado o un conector [34].

“Internamente, el sensor cuenta con cuatro bloques funcionales: bobina, oscilador, circuito disparador y circuito de salida” [33].

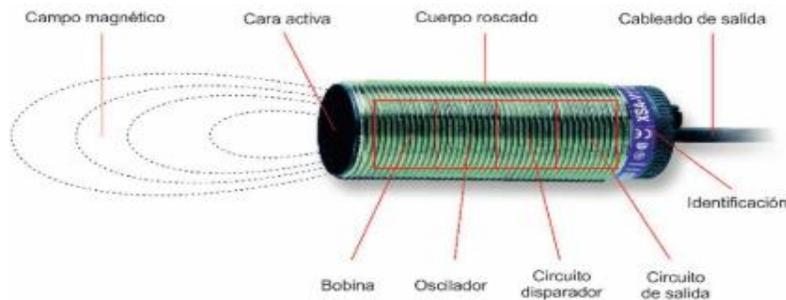


Figura 9: Componentes del sensor de proximidad inductivo.

Fuente: Basado en [34].

Ventajas y desventajas según [34] y [37]:

- **Ventajas**
 - No entran en contacto directo con el objeto a detectar.
 - No se desgastan.
 - Tienen un tiempo de reacción muy reducido.

- Tiempo de vida largo e independiente del número de detecciones.
- Son insensibles al polvo y a la humedad.
- Incluyen indicadores LED de estado y tienen una estructura modular.
- **Desventajas**
 - Solo detectan la presencia de objetos metálicos.
 - Pueden verse afectados por campos electromagnéticos intensos.
 - El margen de operación es más corto en comparación con otros sensores.
 - La distancia del campo de detección es corta y puede ser alterada en función del tipo de material y de la forma del objeto a detectar.
 - A la hora de instalar uno o varios sensores, se debe respetar una serie de distancias con el objeto para que no se interfieran entre ambos o el medio que los rodea, para ello se debe consultar las instrucciones del fabricante sobre el modelo del sensor a instalar.

Aplicaciones

Los sensores de proximidad inductiva son utilizados en varias aplicaciones como las siguientes [37]:

- Detectar el final del recorrido en una tabla de posicionamiento.

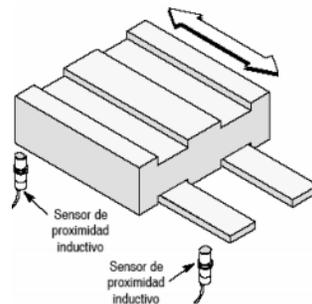


Figura 10: Detección del recorrido.

Fuente: Basado en [37].

- Determinar la velocidad contando los dientes de un engranaje.
- Revisar si una válvula está totalmente abierta o cerrada.

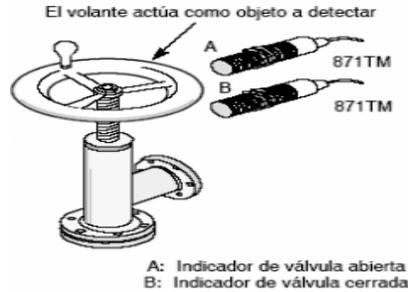


Figura 11: Detección de posición de una válvula.

Fuente: Basado en [37].

- Detectar la presencia o ausencia de una pieza metálica o tarimas en líneas de transporte.

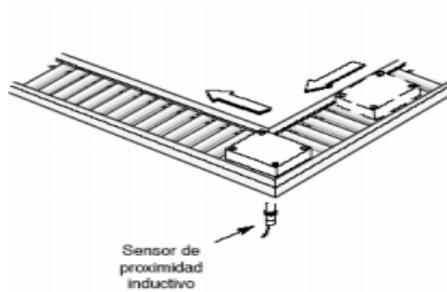


Figura 12: Detección o ausencia de piezas metálicas.

Fuente: Basado en [37].

- Cuando un brazo de robot se desplaza para una operación de toma y colocación, un sensor de proximidad asegura que el brazo tenga realmente una parte en sus pinzas.
- En el maquinado de metales, los sensores de proximidad pueden asegurar que la pieza esté montada en el dispositivo, y que la fresa no está rota.

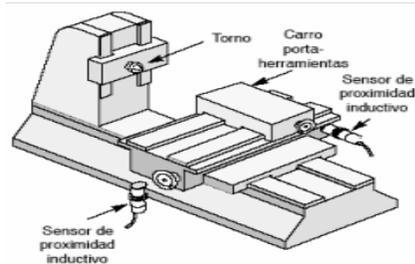


Figura 13: Maquinado de metales.

Fuente: Basado en [37].

- En la industria son utilizados principalmente, para verificar que una parte de la máquina se encuentre en una posición determinada [33].

Sensor de proximidad capacitivo

Detecta un cambio en la capacidad del sensor provocado por una superficie próxima a éste [36].

Funcionamiento del sensor de proximidad capacitivo

Trabaja de manera similar al sensor de proximidad inductivo, aunque el medio de detección



Figura 14: Sensor de proximidad capacitivo.

es muy distinto [35], pues se basa en la capacitancia dieléctrica. La capacitancia es la propiedad de los materiales para almacenar una carga. Un capacitor consiste en dos placas que están separadas por un material aislante, llamado dieléctrico [35].

Una vez que se cierra el interruptor, se almacena una carga entre ambas placas, la distancia entre ellas determina la capacidad del capacitor para almacenar la carga y pueda calibrarse como una función de la carga almacenada, esto ayudará a determinar la posición de conmutación de encendido y apagado [35].

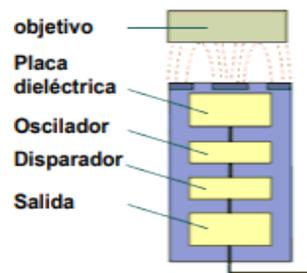


Figura 15: Funcionamiento del sensor de proximidad capacitivo.

Fuente: Basado en [37].

Una placa capacitiva forma parte del interruptor, la cara del sensor es el aislador y el objeto es la otra placa, todos unidos mediante tierra física. El interruptor capacitivo tiene los mismos cuatro elementos que el sensor inductivo, es decir, sensor (el medio dieléctrico), circuito oscilador, circuito detector y circuito de salida de estado sólido. Circuito oscilador: incluye la capacitancia de la placa del objeto externo y de la placa del objeto interno [33].

Ventajas según [33]:

- Pueden detectar objetos no metálicos.
- Pueden detectar objetos de peso ligero o pequeños que no pueden ser detectados por interruptores de límite mecánico.
- Ofrecen un alto índice de conmutación para una respuesta rápida en aplicaciones de conteo de objetos.
- Pueden detectar objetos a través de barreras no metálicas (vidrio, plástico, etc.).
- Tienen larga vida de operación con un número virtualmente ilimitado de ciclos de operación.
- La salida de estado sólido proporciona una señal de conteo libre de rebotes.

Desventajas según [33]

- Les afecta el vapor y la humedad.
- Necesitan un rango extenso para la detección efectiva.

Aplicaciones

Los sensores de proximidad capacitivos son adecuados para:

- Supervisar los niveles de llenado en contenedores de almacenamiento o la verificación del volumen de llenado de contenedores o paquetes cerrados.

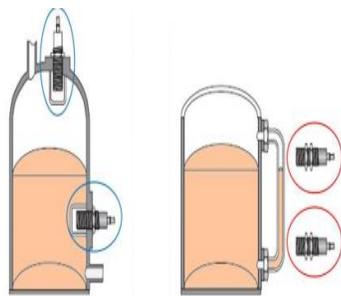


Figura 16: Sensor de proximidad capacitivo supervisando el nivel de llenado de tanques.

Fuente: Basado en [35].

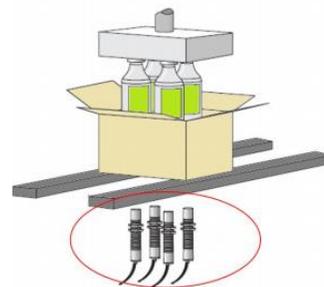


Figura 17: Sensor de proximidad capacitivo verificando el volumen de llenado.

Fuente: Basado en [35].

Sensor de proximidad ultrasónico

Este tipo de sensores tienen como propósito principal la detección de objetos de distintos materiales de diferente forma y color.

Su funcionamiento está basado en la emisión y reflexión de ondas acústicas que emite el emisor, rebotan en el objeto y llegan hasta el receptor. Se mide y se evalúa el tiempo que tarda en desplazarse el sonido desde el emisor al receptor [35].



Figura 18: Sensor de proximidad ultrasónico.

Características [35]

- Alcance del sensor; tiene que ver con la duración del pulso emitido, este tiene que ser corto, pero con una energía suficiente para que llegue a los objetos más lejanos.
- El pulso debe ser corto para poder diferenciar objetos cercanos ya que si es muy lejano y el eco llega cuando aún está emitiendo el pulso no podrá diferenciar que está llegando el eco. De este principio se extrae la distancia mínima del sensor igual a 50 mm.
- Material del objeto a detectar, es independiente de la forma, color y material, además el material puede ser sólido, fluido o en forma de polvo, sin embargo los materiales que no son adecuados para este tipo de sensores, son aquellos que absorben el sonido (por ejemplo tela gruesa, lana, algodón, etc.), sin embargo estos materiales pueden ser detectados por medio de barreras ultrasónicas, poniendo un emisor a un lado y receptor al otro lado del emisor y si no pasa el sonido es porque hay un objeto absorbente.
- Interferencias; se debe tener cuidado al colocar dos sensores ultrasónicos cercanos, ya que estos podrían interferir uno con otro.
 - El sonido ambiente no afecta el funcionamiento del sensor.
 - La suciedad no afecta al sensor.

Aplicaciones

Este tipo de sensores pueden ser utilizados para [35] y [38]:

- Conocer la presencia, distancia, grosor de un objeto.
- Para verificar el nivel de los tanques de cualquier fluido.

- Para detectar si hay objetos transparentes.
- Detección de pallets

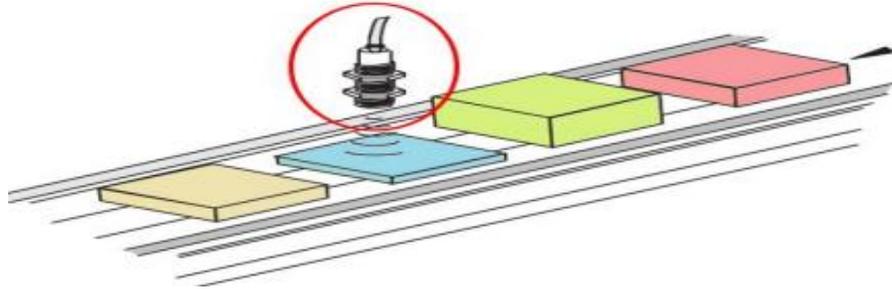


Figura 19: Ejemplo de aplicación de un sensor de proximidad ultrasónico.

Fuente: Basado en [35].

Sensor magnético

Estos sensores reaccionan ante los campos magnéticos de imanes permanentes o electroimanes.



Figura 20: Sensor magnético.

“El método más simple y usual de detectar un campo magnético es utilizar un interruptor Reed. Dos laminillas flexibles de material magnético se unen por medio de un campo magnético externo, estableciendo un contacto eléctrico” [35].

Funcionamiento

“Los sensores magnéticos constan de un sistema de contactos cuyo accionamiento vendrá ocasionado por la influencia de un campo magnético. Los contactos se cerrarán con la presencia del campo magnético provocado por un dispositivo imantado ubicado en el objeto a detectar”[35].

“En el caso de un interruptor Reed, las láminas de contacto están hechas de material ferromagnético y están selladas dentro de un pequeño tubo de vidrio. El tubo se llena con un gas inerte, si se acerca un campo magnético al sensor de proximidad, las láminas se unen por magnetismo y se produce un contacto eléctrico” (véase la figura 21) [35].

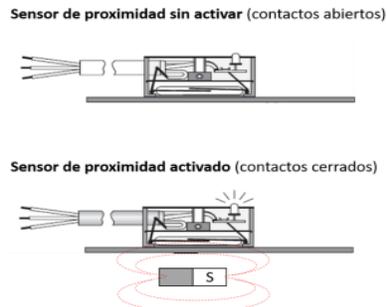


Figura 21: Funcionamiento de sensor de proximidad magnético.

Fuente: Basado en [35].

Ventajas según [35] y [38]

- No necesita entrar en contacto con el objeto a detectar.
- Velocidad de conmutación suele estar sobre 2 ms o incluso más rápido.
- Proporciona un excelente medio para medir con precisión desplazamientos lineales y angulares (por ejemplo, en varillas metálicas, cremalleras), pues pequeños movimientos mecánicos producen cambios medibles en el campo magnético.

Desventajas según [35]

- El objeto a detectar necesita estar muy cerca, pues el alcance máximo de este tipo de sensores es cercano a los 100 mm.
- Solo pueden detectar objetos que contengan imanes ya sean temporales o permanentes.
- Asegurarse que no haya interferencia magnética cerca del sensor.
- Se debe minimizar el flujo de corriente, ya que estos pueden ocasionar un arco de descarga durante la conexión o desconexión y podría quemar las láminas.

Aplicaciones

- Control de procesos, como también en automatización industrial.
- Los sensores magnéticos se encuentran en las estaciones AS/RS, los sensores magnéticos cumplen con la función de indicarle al motor hasta donde desplazarse en un eje, además de indicarle cuando es que está retirando o colocando objetos desde y hacia el almacén.

Sensor óptico

“Emplea fotocélulas como elementos de detección. A veces disponen de un cabezal que contiene un emisor de luz y la fotocélula de detección del haz reflejado sobre el objeto, se utilizan principalmente como detectores de posición” [36].

“Los sensores de proximidad ópticos utilizan medios ópticos y electrónicos para la detección de objetos. Estos utilizan luz roja o infrarroja. Los diodos semiconductores emisores de luz (LED) son la fuente más utilizada en este tipo de sensores, estos son pequeños y robustos, tienen una larga vida útil y pueden modularse fácilmente. Los fotodiodos y fototransistores se utilizan como elementos receptores de la señal óptica”[35].

Funcionamiento

“Este tipo de sensores consisten básicamente en dos elementos principales: el emisor y receptor. Dependiendo del tipo y la aplicación, se requieren complementos a estos como pueden ser reflectores y cables de fibra óptica” [35].

El emisor y el receptor pueden estar en un mismo dispositivo o en dispositivos diferentes, el emisor emite una luz roja o infrarroja, la cual, se propaga en línea recta y puede ser desviada, enfocada, interrumpida, reflejada y dirigida, esta luz es recibida por el receptor y es evaluada electrónicamente.

Composición del sensor óptico

Sus componentes electrónicos se encuentran encapsulados. Cuenta con un potenciómetro para ajustar la sensibilidad. Este suele incluir un diodo emisor de luz (LED), que luce cuando la salida está activa y sirve como verificación del funcionamiento.

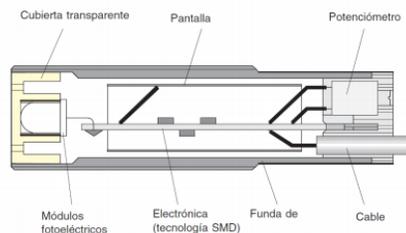


Figura 22: Composición de un sensor de proximidad óptico.



Figura 23: Sensor óptico.

Fuente: Basado en [35].

Los sensores ópticos están expuestos a la contaminación de polvo, virutas o lubricantes durante su funcionamiento. Esta contaminación causa interferencias en la detección de objetos y puede dar falsos positivos, identificando que hay un objeto cuando solo es polvo o viruta [35].

Variantes de sensores de proximidad óptico

Tabla 3: Variantes de sensores de proximidad.

	Sensor de reflexión directa	Sensores de retrorreflexión	Sensores de barrera
Componentes	El emisor y receptor se encuentran instalados en el mismo dispositivo.	Emisor, receptor y reflector (montados en el mismo dispositivo)	Emisor y receptor (montados en dos dispositivos separados)
Funcionamiento		Requiere de un reflector para que pueda reflejar el rayo hacia la dirección de origen. La interrupción del rayo de luz debe ser compensada por la reflexión del objeto.	El objeto debe cubrir la zona de respuesta del sensor ya que si este no la cubre por completo y la luz pasa al receptor, detecta que le llega la luz no identifica que el haz se ha cortado.
Características	<ul style="list-style-type: none"> Alcance, pueden ir desde 50 mm hasta 2 m. Detecta todo tipo de objetos que tengan un cierto grado de reflectividad. Interferencia, son sensibles a la suciedad. Velocidad de conmutación, varía entre 10 ... 2000 Hz. 	<ul style="list-style-type: none"> Alcance, puede ser de 10m. Puede detectar cualquier tipo de objetos, con dificultad en objetos que sean muy reflectantes o transparentes. Velocidad de conmutación, varía entre 10 ... 1000 Hz. 	<ul style="list-style-type: none"> Alcance, puede llegar hasta 100m. Puede detectar todo tipo de objetos siempre y cuando no sea muy transparente. Interferencia, es muy sensible a la suciedad. Velocidad de conmutación, varía entre 20...10000 Hz.
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> Para conocer si el producto se encuentra en la posición correcta o no. 	<ul style="list-style-type: none"> Control de presencia de objetos. Contar objetos que han pasado en una cinta transportadora. 	<ul style="list-style-type: none"> Se usan como barreras de seguridad en prensas, máquinas de corte, o acceso a celdas en las que trabajan robots. Determinar roturas de herramientas.

Fuente: Elaboración propia basada en [35].

Sensores internos

Son utilizados para observar el estado interno de la máquina, es decir su posición, velocidad, aceleración, etc., en un momento determinado. De acuerdo a la información obtenida, el controlador decide acerca del comando de control. Dependiendo de las diferentes cantidades que miden, los sensores se denominan como de posición, velocidad, aceleración o fuerza [33].

Sensores de posición

Miden la posición de cada movimiento, es decir, el ángulo de las articulaciones, a partir de estos se realiza la configuración del ejecutor final y ubican su posición y orientación [33].

Resolvers

“Otorgan señales análogas como salida. Estos consisten en un eje (flecha) giratorio (rotor) y una carcasa estacionaria (estator). Sus señales tienen que convertirse a la forma digital por medio de un convertidor analógico a digital antes de que la señal sea introducida en una computadora” [33].

“Los resolvers emplean rotores de un solo devanado que giran dentro de estatores fijos, el estator tiene tres devanados orientados a 120° uno del otro” [33].



Figura 24: Resolver.

Fuente: Basado en [39].

Encoders

“Son sensores que generan señales digitales en respuesta al movimiento, la cual puede ser leída por algún dispositivo de control. Cuando son usados en componentes mecánicos o motores, estos pueden medir movimientos lineales, velocidad y posición” [33].

“Es un dispositivo óptico digital que convierte el movimiento en una secuencia de pulsos digitales. Mediante el conteo de un solo bit o la decodificación de un conjunto de bits, los pulsos pueden convertirse en medidas relativas o absolutas. De este modo los encóders son de tipo incremental o absoluto. Además, cada tipo puede ser lineal y rotatorio a su vez” [33].

- Encóder lineal incremental: cuenta con una escala transparente con una retícula opaca, el grosor y espacio entre las líneas de la retícula son iguales y se encuentran en el rango de micrones [33].

“La resistencia de las celdas disminuye cada vez que reciben un rayo de luz. De este modo, se genera un pulso cada vez que un rayo de luz es atravesado por la línea opaca. Este pulso se introduce en el controlador que actualiza un contador (un registro de la distancia recorrida)” [33].

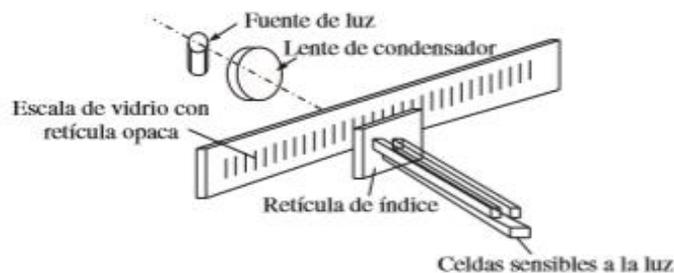


Figura 25: Encóder lineal incremental.

Fuente: Basado en [33].

- Encóder lineal absoluto: similar al incremental, la diferencia es que, el encóder lineal absoluto da un valor absoluto de la distancia recorrida en cualquier momento. Las posibilidades de perder los pulsos a altas velocidades son menores [33].



Figura 26: Encóder lineal absoluto.

Fuente: Basado en [33].

- Encóder rotativo incremental: es semejante al encóder incremental lineal, la diferencia es que las retículas se encuentran en un disco. El valor común del grosor de los espacios transparentes es igual a 20 micrones [33].

Dentro del disco se encuentran dos líneas de retículas en diferentes círculos que detectan el sentido de rotación, permitiendo mejorar la precisión del sensor, hay otro círculo que contiene una marca de retícula, este, sirve para la medición del número de revoluciones completadas [33].



Figura 27: Encóder rotativo incremental.

Fuente: Basado en [33].

- Encóder rotativo absoluto: “parecido al encóder lineal absoluto, solo que en este caso el disco se divide en un número de tiras circulares y cada tira tiene segmentos de arco definidos, este sensor nos proporciona la salida digital (absoluta)” [33].

El encóder es montado directamente sobre el eje del motor o en algún engranaje para aumentar la precisión de medición para evitar ruido en el encóder, a veces se usa una escala gris (permite que solo uno de los bits binarios en una secuencia de códigos cambie entre líneas radiales) [33].

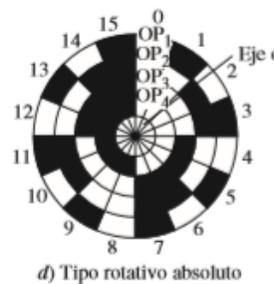


Figura 28: Encóder rotativo absoluto.

Fuente: Basado en [33].

Sensores de Velocidad

“Realiza la medición a partir de medidas de posición consecutivas a intervalos de tiempo constante, calculando la razón de cambio respecto al tiempo de los valores de posición” [33].

Todos los sensores de posición, cuando son utilizados con ciertos límites de tiempo, pueden proporcionar la velocidad (ejemplo: el número de pulsos proporcionados por un encóder de posición incremental dividido entre el tiempo consumido en hacerlo), aunque al hacer uso de este método exige una carga computacional sobre el controlador, y este puede estar ocupado por otras operaciones [33].

Tacómetro: pueden encontrar directamente la velocidad en cualquier momento y sin demasiada carga computacional y además miden la velocidad de rotación de un elemento. [33].



Figura 29: Tacómetro.

2.4.2 CRITERIOS A EVALUAR

Los sensores deben cumplir con criterios para poder ser propuestos en el diseño AS/RS didáctico de la UTM, los criterios que se han considerado hasta el momento son:

- Costo
- Proveedor
- Precisión
- Velocidad de respuesta
- Fiabilidad
- Mantenimiento
- Rango de medición

2.4.3 ACTUADORES

“Corresponde a cualquier mecanismo que permita al efector ejecutar una acción, algunos ejemplos de actuadores son los motores eléctricos (servomotores, motores a pasos, de corriente continua y corriente alterna) cilindros neumáticos y cilindros hidráulicos” [40].

Actuadores Eléctricos

“Transforman la energía eléctrica en energía mecánica, ya sea rotacional o lineal. Son los más usados en la actualidad, debido a que su fuente de alimentación es la energía eléctrica, que se encuentra disponible en la red de distribución eléctrica” [38].

Motores de corriente continua. “Son muy fáciles de controlar, están compuestos por una excitación situada en el estator del motor; dicha excitación es la encargada de crear el campo magnético y por el inducido, que está situado en el rotor” [41].

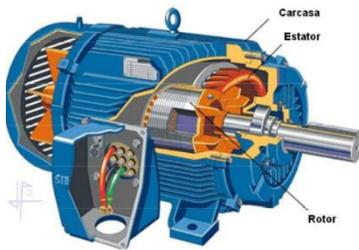


Figura 30: Motor de corriente continua

- **Motores de corriente alterna.** “Utiliza un flujo eléctrico en el cual la intensidad cambia de dirección periódicamente” [32].
- **Variador.** “Dispositivo electrónico de potencia, es capaz de modificar la frecuencia en hercios de alimentación de un motor” [32].
- **Servomotores:** “Sistemas electromecánicos que pertenecen a una clase particular de actuadores eléctricos, encargados de transmitir energía para producir el movimiento” [42].

Ventajas y desventajas

- **Ventajas** [33]
 - Amplia disponibilidad en el suministro de energía.
 - El elemento de accionamiento básico en un motor eléctrico es normalmente más ligero que para la energía de fluidos.
 - Alta eficiencia en la conversión de la energía.
 - En relación con el costo, la precisión y repetibilidad de los robots accionados por energía eléctrica es comúnmente mejor que la de robots accionados por fluidos.

- Por ser relativamente silenciosos y limpios, resultan muy respetuosos con el ambiente.
- Son de fácil mantenimiento y reparación.
- Los componentes estructurales pueden ser de peso ligero.
- El sistema de accionamiento es muy conveniente para el control electrónico.

- **Desventajas [33]**
 - Los robots de accionamiento eléctrico frecuentemente requieren la incorporación de algún tipo de sistema de transmisión mecánica. Esto agrega masa y movimiento no deseable que requieren energía adicional y que pueden complicar el control.
 - Debido a la complejidad más alta del sistema de transmisión, se generan costos adicionales para su adquisición y mantenimiento.
 - Los motores eléctricos no son intrínsecamente seguros. Por lo tanto, no pueden usarse, por ejemplo, en ambientes explosivos.

Tipos de motores eléctricos

Tabla 4: Tipos de motores eléctricos.

Tipo de motor	Aplicaciones	Características
Motores a paso	Robots en el más pequeño y término medio del rango industrial y con los robots de enseñanza y pasatiempo	<ul style="list-style-type: none"> ○ Convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos (avanzar en paso). ○ Son compatibles con muchos dispositivos de retroalimentación, si esto se requiriere, y son usados en configuraciones de servocontrol total en robots industriales de servicio medio. <ul style="list-style-type: none"> ○ No necesita equipos de conversión digital. ○ Económico.
<i>De imanes permanentes</i>		<ul style="list-style-type: none"> ○ Un imán cerámico constituye el rotor. ○ A falta de excitación el eje del motor permanece en la misma posición.
<i>Reluctancia variable</i>		<ul style="list-style-type: none"> ○ Rotor dentado construido a base de láminas ferromagnéticas y un estator donde se disponen bobinas que forman polos. ○ En reposo no existe par en el eje del motor (gira con libertad).
<i>Híbridos</i>		<ul style="list-style-type: none"> ○ Combina motores de imán permanente y de reluctancia variable. ○ Debido a la combinación de estos motores, se obtienen ángulos pequeños de paso con un alto par.
Actuadores de corriente directa		<ul style="list-style-type: none"> ○ Demandan flujo eléctrico de corriente que circula en un solo sentido. ○ Partes fundamentales: rotor (parte móvil de actuador, proporciona la fuerza que actúa sobre el elemento mecánico) y estator (parte fija del actuador, provee el magnetismo necesario para inducir la fuerza electromotriz). ○ Al variar el voltaje de alimentación se puede modificar la velocidad del eje del actuador.
Actuador de corriente alterna		<ul style="list-style-type: none"> ○ Flujo eléctrico en el cual la intensidad cambia de dirección periódicamente. ○ Dependen de la frecuencia de operación del voltaje aplicado para modificar los rangos de velocidad.
Servomotores		<ul style="list-style-type: none"> ○ Son motores paso a paso, pero con una electrónica de control integrada, lo que permite controlar posición y movimiento por grados. ○ Algunas de las ventajas son: exactitud, gran torsión, pequeño tamaño, costo de mantenimiento reducido, carga ligera y curva de velocidad lineal.

Fuente: Elaboración propia basada en [33], [38] y [43].

Actuadores neumáticos

“Transforma la energía acumulada del aire comprimido en trabajo mecánico movimiento rotatorio o movimiento rectilíneo. Estos se clasifican en cilindros o actuadores lineales y motores o actuadores de giro” [38].

Funcionamiento

La energía del aire comprimido puede ser almacenada para poder ser utilizada posteriormente, si se ejerce fuerza sobre el aire contenido en el recipiente cerrado se comprime forzando las paredes del recipiente y la presión que se produce puede aprovecharse para generar fuerza o desplazamiento sobre algún elemento mecánico [33].

Aplicaciones

Los actuadores neumáticos se utilizan por lo general para inducir un movimiento lineal en algunos elementos mecánicos, los cuales conforman un sistema integral en el que fluyen e interactúan diversos dispositivos con la finalidad de automatizar algún tipo de proceso [38]. “También se usan extensamente para realizar los movimientos típico de abrir y cerrar las mordazas en el sujetador (*gripper*)” [33].

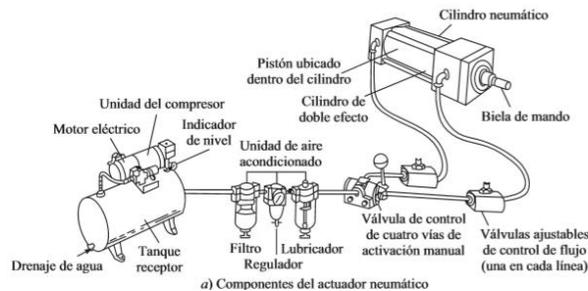


Figura 31: Componentes de actuador neumático.

Fuente: Basado en [33].

Ventajas y desventajas

- **Ventajas según [33]**
 - Los componentes son perfectamente asequibles y por lo regular el aire comprimido ya se encuentra disponible en las instalaciones de las fábricas. Es la forma más económica de todos los actuadores.

- El aire comprimido puede almacenarse y transportarse fácilmente a través de largas distancias.
- El aire comprimido es limpio, a prueba de explosiones e insensible a fluctuaciones de temperatura. Por lo tanto, puede emplearse en muchas aplicaciones.
- Estos actuadores tienen pocas partes móviles, por lo que son muy confiables y ayudan a reducir los costos de mantenimiento.
- Tiene una acción y un tiempo de respuesta muy rápida.
- No requiere de un control eléctrico, en condiciones de humedad no existe peligro de electrocución.
- Control sencillo.
- **Desventajas según [33]**
 - Puesto que el aire es compresible, el control de la precisión en la velocidad y la posición no es fácil de lograr, a menos que se incorporen dispositivos electromecánicos mucho más complejos en el sistema. Esto significa que a menudo sólo está disponible una secuencia limitada que opera con una velocidad fija.
 - Si se usan topes mecánicos, la reanudación del sistema puede ser lenta.
 - Los sistemas neumáticos no son convenientes para mover cargas pesadas bajo control preciso, debido a la compresibilidad del aire.

Tipos de actuadores neumáticos

Tabla 5 Clasificación de actuadores de neumáticos.

	Funcionamiento	Aplicaciones
Cilindro neumático		
<i>Cilindros de simple efecto</i>	Una entrada de alimentación de aire comprimido a una cámara hermética, lo que provoca un movimiento rectilíneo en un solo sentido de un elemento móvil (vástago).	Inducir el movimiento lineal de algunos elementos mecánicos.
<i>Cilindros de doble efecto</i>	Dos entradas de alimentación de aire comprimido, cada una en un extremo de una cámara hermética, provocando movimiento en dos sentidos del vástago, encargado de realizar un trabajo de salida como un retroceso.	
Motores neumáticos	Proporciona energía mecánica de rotación a partir de la fuerza del aire comprimido, el cual, al expandirse provoca una fuerza.	

Fuente: Elaboración propia basado en [38].

Actuadores hidráulicos

Su funcionamiento es semejante al de los actuadores neumáticos, ambos son dispositivos que transforman la energía de un fluido a presión en trabajo mecánico de movimiento circular o rectilíneo, con la única diferencia que los actuadores hidráulicos, el fluido que emplean no es aire, sino algún tipo de aceite mineral [38].

“Este tipo de actuadores están diseñados para operar con precisiones mucho más altas (normalmente entre 70 y 170 bar), son apropiados para aplicaciones de alta potencia” [33].

El sistema de accionamiento hidráulico tiene los siguientes elementos [44]:

- *Tanque Hidráulico*: depósito de aceite requerido para desarrollar la potencia necesaria.
- *Filtros*: el aceite pasa por varios componentes del sistema lo que implica que a este se le puedan agregar partículas metálicas, polvo y/o suciedad, se sabe que el aceite hidráulico es utilizado una y otra vez, para evitar fallas en los componentes del sistema es necesario hacer uso de los filtros ya que estos tienen como función eliminar las impurezas solidas antes de reutilizar el aceite.

- *Bomba:* el aceite requerido en diferentes puntos del sistema hidráulico es bombeado por bombas hidráulicas, bombas de engranajes, de pistón y bombas de desplazamiento común.
- *Válvula de retención:* controla el flujo unidireccional.

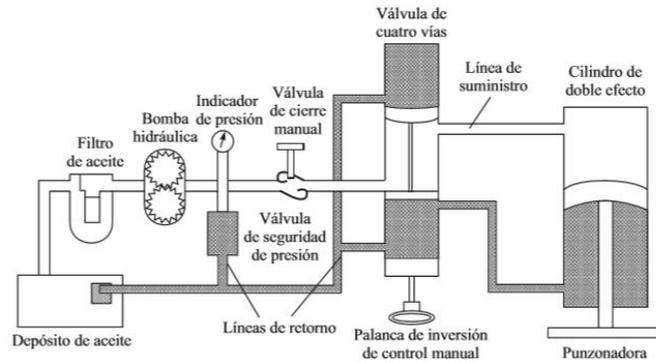


Figura 32: Componentes de un actuador hidráulico.

Fuente: Basado en [33].

Tabla 6: Ventajas y desventajas de los actuadores hidráulicos.

	Ventajas	Desventajas
Características de control	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerza de control, par, posición, velocidad de movimiento fáciles de controlar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de la rigidez y la estabilidad por la compresibilidad del aceite.
	<ul style="list-style-type: none"> • Alto (fuerza/masa), (par/ Inercia), los valores producen buenas respuestas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Movimiento antideslizante a velocidades lentas.
	<ul style="list-style-type: none"> • fácil de controlar por un sistema electrónico. 	
Construcción y características	<ul style="list-style-type: none"> • Cilindros hidráulicos son extremadamente simples. 	<ul style="list-style-type: none"> • La cavitación ocurre fácilmente según el tipo de construcción, a altas velocidades y bajas temperaturas. También dependiendo de la lubricación, la condición de lubricación de la parte deslizante se vuelve muy severa.
	<ul style="list-style-type: none"> • Compacidad por aspecto de densidad de fuerza extremadamente grande. 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia. 	
Características de mantenimiento y otros	<ul style="list-style-type: none"> • No es necesario tener en cuenta la lubricación y el enfriamiento de la unidad principal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere de un cuidado minucioso con respecto a la temperatura y al mantenimiento operativo de la pureza del aceite.
	<ul style="list-style-type: none"> • Sin peligro de explosión. 	

Fuente: Basado en [38].

2.4.4 CRITERIOS

Los criterios que se han considerado en la selección de actuadores según fuentes consultadas [32], [43] y [45] y que se contemplan hasta el momento en este proyecto son:

- Potencia
- Precisión
- Costo
- Documentación
- Peso
- Controlabilidad
- Ubicación del proveedor
- Volumen
- Mantenimiento
- Servicio postventa

2.4.5 CONTROLADORES

Tienen como propósito coordinar los movimientos de la maquina (para este caso hace referencia a la máquina S/R), la cual cumple la función de trasladar el pallet a un posición determinada con precisión, velocidad y aceleración controladas [46].



Figura 33: : PLC S7-1500, Marca SIEMENS.

En este apartado solo se abordarán los temas: Controlador lógico programable (a partir de aquí PLC) y Controlador CNC.

Controlador lógico programable

Actualmente, las fábricas automatizadas deben proporcionar a sus sistemas, alta confiabilidad, gran eficiencia y flexibilidad, para poder lógralas es necesario el uso de un dispositivo llamado PLC [47].

“Un PLC es un controlador basado en microprocesadores que usa instrucciones almacenadas en una memoria programable para implementar secuencias lógicas, temporizadores, controladores y funciones aritméticas utilizando entradas/salidas (I/O) analógicas o digitales, para controlar máquinas y procesos”[5], [30] y [27].

Más adelante, se muestra la clasificación de los PLC en función de sus componentes [48]:

- **PLC Compacto:** dispositivo que integra en un único módulo, todos los componentes del autómata programable (fuente de alimentación, unidad de control, entradas y salidas).

- **PLC Modular:** dispositivo que integra sus componentes que forman el autómata programable en módulos diferentes los cuales se acoplan entre sí mediante conectores especiales.

Componentes de la estructura básica de un PLC

Posteriormente se describen los elementos fundamentales para un PLC y que pueden llegar a variar con respecto a cada modelo [46]-[48] (Figura 35):

- *Fuente de alimentación:* componente que adapta la tensión de alimentación del PLC a la tensión de funcionamiento de sus circuitos internos.
- *Bloques de entrada y salida:*
 - *Bloques de entrada:* se encargan de adaptar y codificar las señales de entrada (sensores inductivos, magnéticos, ópticos, pulsadores, termoresistencias, encoders, etc.), de manera que sean comprensibles para la unidad central de proceso.
 - *Bloques de salida:* codifican las señales procedentes de la unidad central de proceso del PLC, de manera que las amplia y las envía a los dispositivos conectados a las salidas (relés, contactores, luces, etc.).
- **Entradas digitales:** “También llamadas binarias u “on-off”, son las que pueden tomar sólo dos estados: encendido o apagado, estado lógico 1 o 0” [34].
- **Unidad central de proceso (CPU):** cerebro del PLC, tiene como función descifrar las instrucciones dadas en los programas de los usuarios, administrando la comunicación entre los dispositivos de programación y memoria, y entre microprocesador y los bornes de entrada/salida y dependiendo del valor de las entradas, activar o desactivar las salidas [30] y [47].
- **Memorias [34]:**
 - ROM (ROM, EPROM y EEPROM): memorias de solo lectura, su información no se pierde ante la falta de energía.
Memoria y programa del sistema: se encuentra dividida en dos áreas: por un lado, está el programa del sistema (grabado en la ROM) y la memoria que junto con el procesador componen la CPU.

Memoria de tabla de datos: es una memoria tipo RM, aquí se almacena la imagen de las tablas de los estados de entrada y salida junto con las variables de los programas y datos internos.

- Memorias de usuario (RAM): memorias de lectura/escritura y ante un corte de energía pierde su información.

El lugar donde se emplean son en donde se almacena el programa del usuario, cuenta con un respaldo en una batería pequeña.

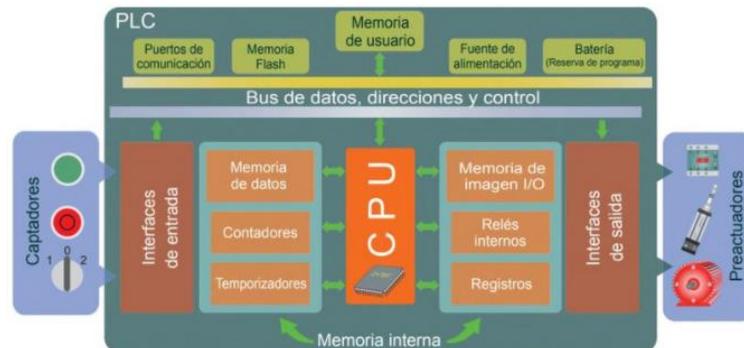


Figura 34: Componentes del PLC.

Fuente: Basado en [49].

Campos de aplicación

El PLC, gracias a sus características especiales de diseño, tiene un amplio campo de aplicación, por ejemplo [47]:

- Procesos de fabricación industrial de cualquier tipo a transformaciones industriales, o control de instalaciones.
- Maniobra de máquinas
- Maquinaria industrial de plástico
- Máquinas transfer
- Maquinaria de embalajes
- Maniobra de instalaciones: instalación de aire acondicionado, calefacción
- Instalaciones de seguridad
- Señalización y control

Gracias a sus limitadas dimensiones, la facilidad de su montaje, la posibilidad de almacenar los programas para su posterior y rápida utilización, hace que su eficacia se estime en procesos con necesidades tales como [20]:

- Espacio reducido
- Procesos de producción periódicamente cambiantes
- Procesos secuenciales
- Maquinaria de procesos variables
- Instalaciones de procesos complejos y amplios
- Chequeo de programación centralizada de las partes del proceso

Controladores de movimiento CNC

Los controladores CNC hacen referencia a un controlador para movimiento que permite el desplazamiento en los ejes X, Y y Z, son capaces de mantener velocidad, posición y control de forma precisa. Un ejemplo de controladores CNC comerciales es de la línea Simotion de la marca SIEMENS, sistema de control de movimiento de alta gama [50], entre otros, FANUC, FAGOR y MITSUBISHI, las cuales nos ofrecen una gran variedad de productos con características simples hasta más complejas.

El controlador de movimiento CNC, actúa como un cerebro en el sistema de control de movimiento, además calcula la trayectoria específica para cada movimiento [51]. Utiliza la trayectoria calculada para determinar el torque necesario que debe enviar al amplificador del motor y así provocar el movimiento [52].

Usualmente al hablar de controladores de movimiento se entiende como el uso de sistemas servo y sistemas a pasos como un musculo para ocasionar movimiento, algunas de sus características son; mantener una velocidad extremadamente precisa, posición y control de toque [53].

Componentes de un control de movimiento

- Software de aplicación: Señala la posición deseada y perfil de control de movimiento.
- Controlador de movimiento: Cerebro del sistema. Toma los perfiles de las posiciones y movimientos deseados y crea las trayectorias que deberán seguir los motores.

- Amplificador o drive: Toma el controlador y genera la corriente necesaria para dirigir el motor.
- Motor: Transforma la energía eléctrica en energía mecánica y produce el torque necesario para moverse a la posición deseada.
- Elementos mecánicos: Incluye deslizadores lineales, brazos robóticos y actuadores especiales (el motor proporciona el torque a algunos dispositivos mecánicos).
- Dispositivo de retroalimentación o sensor de posición: Regularmente es un codificador, tiene como función detectar la posición del motor y reportar el resultado al controlador, de esa manera cierra el lazo con el controlador de movimiento [51].

Comparación entre PLC Y Controladores de Movimiento CNC

Tabla 7: Diferencias entre PLC y controlador de movimiento CNC.

	Ventajas	Desventajas
 <p>Figura 35: PLC S 7, Marca SIEMENS.</p>	Se pueden realizar cambios en las secuencias de operación de los procesos de una manera sencilla y controla ejes simples.	Se requiere un programador de base para su programación.
	Empleo de menor número de recursos humanos.	Se requiere de la inversión de la computadora y de un software.
	Costos de automatización se reducen en comparación con los que tienen control electromecánico a medida que los procesos son más complejos.	La comunicación de un PLC con una computadora requiere de interfaces de comunicación (resultan ser caros).
	El uso de espacio se reduce en comparación al requerido con paneles de relevadores.	El software de programación no es compatibles entre diferentes marcas de PLC, por lo que se requiere de conocimientos.
	Reduce la cantidad de cableado.	
	Economía de mantenimiento. Además de aumentar la fiabilidad del sistema, al eliminar contactos móviles, los mismos autómatas pueden indicar y detectar averías.	
 <p>Figura 36: Controlador de Movimiento CNC, Simotion, Marca SIEMENS.</p>	Control de movimiento de precisión.	Costo inicial muy elevado.
	Rentabilidad a largo plazo.	Recomendado para aplicaciones muy complejas.
	Puede controlar que la máquina esté dentro de una determinada carga de trabajo.	
	Monitorear los componentes que controla y alertar al usuario sobre cualquier anomalía en su rendimiento.	

Fuente: Basado en [54].

2.4.6 CRITERIOS

Según algunas fuentes consultadas como [55] y [54]., los criterios que serán mencionados posteriormente son los que deben considerarse a la hora de seleccionar un PLC:

- Proveedor
- Redes de comunicación
- Velocidad de operación
- Lenguaje de programación
- Memoria de programa
- Número de ejes

2.4.7 REDES DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL

Debido a que la evolución de la tecnología ha sido impactante, la industria se ha ido adaptando a nuevos métodos, lo que implica que las comunicaciones y la transferencia de datos pueda ser compartida y compatible para los diferentes sistemas, procesos e instalaciones para que ésta se encuentre en un nivel de competitividad exigida en los procesos productivos actuales [56].

2.4.8 PROPIEDADES DE LAS REDES INDUSTRIALES

- Manejar tráfico periódico con períodos distintos: transportar la información correctamente dentro del período de muestreo dado.
- Proveer indicación de consistencia temporal.
- Manejar tráfico esporádico con retardo acotado.
- Muestreo de un determinado número de señales en corto tiempo (semisimultáneo).
- Proveer medios para conocer el orden de ocurrencia de los eventos.

2.4.9 NIVELES DE REDES DE COMUNICACIÓN

Existen diferentes tipos de redes de comunicación de datos que cumpla para cada nivel [56]:

- I. *Oficina*: Formado básicamente por ordenadores tanto a nivel de oficina como de ingeniería.
- II. *Planta*: Son ordenadores con aplicaciones específicas para el control del proceso.
- III. *Célula*: Son todos los componentes inteligentes que intervienen directamente en el proceso.

IV. *Campo*: Son todos los dispositivos que provocan los movimientos en el proceso productivo.

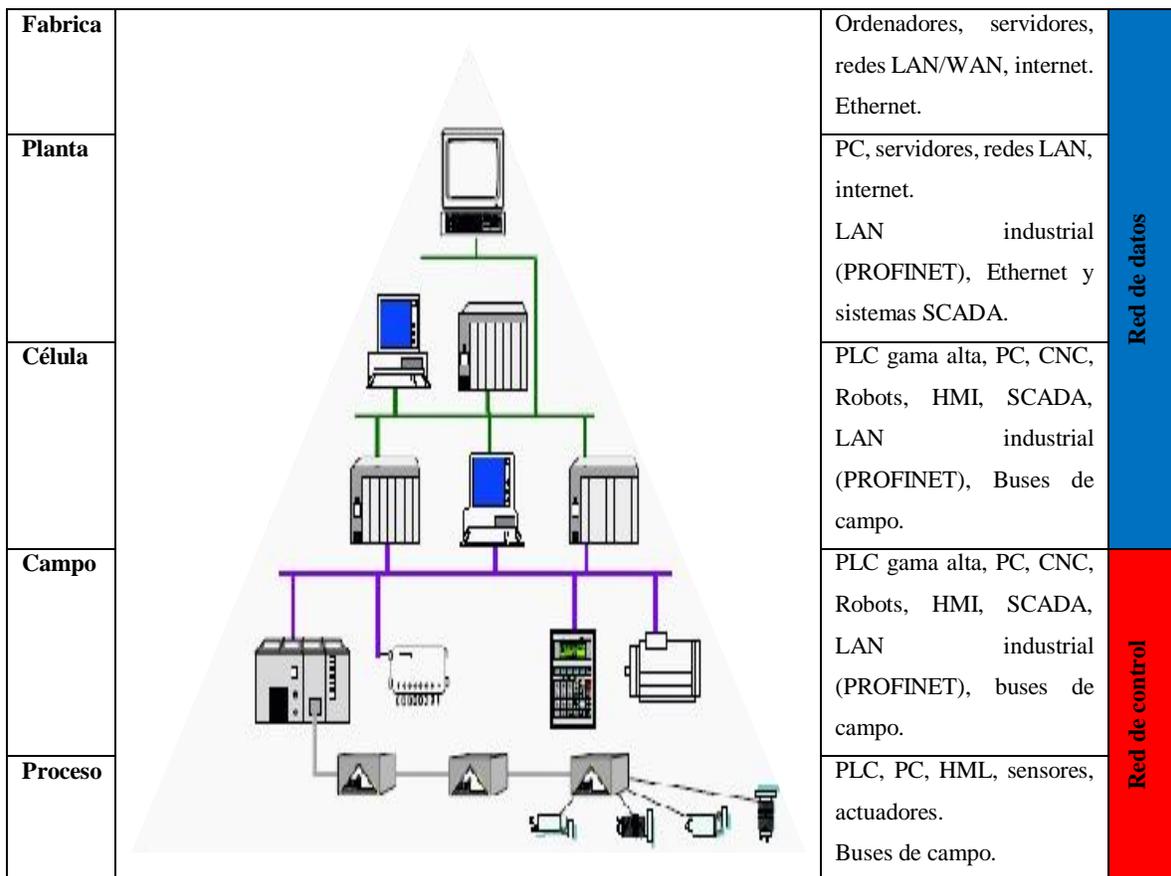


Figura 37: Pirámide de comunicaciones.

Existen tres características principales que determinan la aplicación de las diferentes redes de comunicación, como son [56]:

- i. Volumen de datos: Cantidad de datos que viajan por la red en cada envío.
- ii. Velocidad de transmisión: Velocidad a la que viajan los datos por la red.
- iii. Velocidad de respuesta: Velocidad que hay entre el momento de dar la orden y la respuesta del dispositivo.

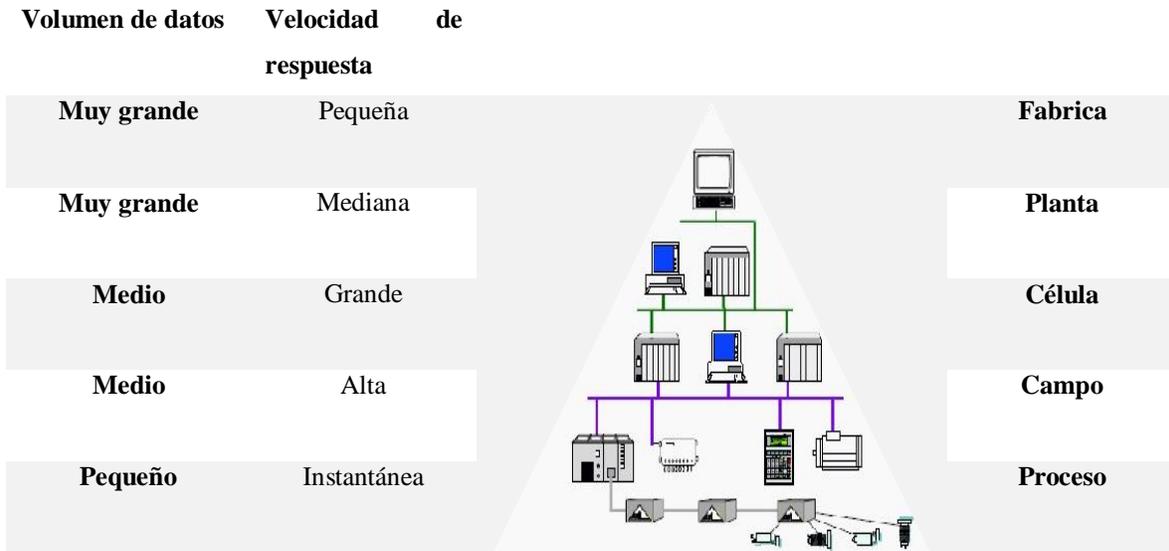


Figura 38: Principales características de cada uno de los niveles.
Fuente: Basado en [56].

En la Tabla 8 se muestran las características más importantes de las redes industriales con mayor utilidad dentro de la industria.

Tabla 8: Características de las redes de comunicación industrial.

Red de comunicación industrial	Protocolos asociados	Característica principal	Ventajas
AS-I	AS-I	Red estándar de mercado, robusta y suficientemente flexible, que cumple con todos los requerimientos para un bus de comunicación industrial.	Montaje sencillo garantiza un funcionamiento muy simple.
			La transmisión de datos y energía por el mismo cable ahorra costes en las conexiones y el montaje.
			Puesta en marcha rápida y sencilla.
			Reacción rápida.
			Con módulos AS-i estándar se pueden operar hasta 124 actuadores y 124 sensores en cable AS-i.
PROFIBUS	PROFIBUS FMS (Fieldbus Message Specification)	Transferencia de gran volumen de datos entre diferentes dispositivos inteligentes conectados en una misma red.	Basado en una estructura Cliente-Servidor.
			Puede trabajar con un volumen de datos elevado.
			Automatización de Propósito General.
	PROFIBUS DP (Distributed Peripheral)	Su aplicación está basada en el intercambio a gran velocidad de un volumen medio de información entre un controlador	Intercambio rápido de datos a nivel de campo.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Red de comunicación industrial	Protocolos asociados	Característica principal	Ventajas
<i>PROFIBUS</i>	PROFIBUS DP <i>(Distributed Peripheral)</i>	Su aplicación está basada en el intercambio a gran velocidad de un volumen medio de información entre un controlador.	Está optimizado para la velocidad, la eficiencia y el bajo costo de la conexión y está especialmente diseñado para la comunicación en los sistemas automatizados con periferia descentralizada.
			Adecuado para la sustitución de la transmisión de señal analógica
	PROFIBUS PA <i>(Process Automation)</i>	Caso ampliado de PROFIBUS DP, diseñado para trabajar en los ámbitos de control de procesos.	Se puede utilizar en entornos potencialmente explosivos de las industrias química y petroquímica.
			PROFIBUS DP actúa como columna vertebral de los segmentos PROFIBUS PA.
			Permite la conexión de sensores y actuadores a una línea de bus común en áreas especialmente protegidas.
Mejora de la seguridad de red y protección de datos.			
<i>PROFINET</i>	PROFINET IO	Aplica una tecnología de conmutación que permite a cualquier estación acceder a la red en todo momento.	Ofrece funcionamiento en “tiempo real” para datos de E/S cíclicos.
			Comunicación entre los autómatas y los aparatos de campo.
			Datos I/O (acceso a datos de periferia a través de direcciones lógicas).
			Registros (almacenamiento de parámetros y datos).
<i>PROFINET</i>	PROFINET CBA <i>(Component Based Automation)</i>	Mayor modularización en la ingeniería de máquinas e instalaciones mediante una máxima descentralización del procesamiento inteligente.	Comunicación entre los autómatas como componentes de sistemas distribuidos.
			Se configura como una red de campo.
<i>ETHERNET</i>	MODBUS TCP/IP	permite el intercambio de bloques de datos binarios entre computadoras, a función principal de TCP es garantizar que todos los paquetes de datos se reciban correctamente, mientras que IP se asegura de que los mensajes se direccionen y en ruten correctamente	Maneja grandes cantidades de datos.
			Protocolo de transporte.
			Transportar los datos de la estructura de mensajes Modbus entre dispositivos compatibles.

Red de comunicación industrial	Protocolos asociados	Característica principal	Ventajas
	<i>ETHERNET/IP</i>	Son una solución abierta estándar para la interconexión de redes industriales que aprovecha los medios físicos y los chips de comunicaciones Ethernet comerciales	<p style="text-align: center;">Diseñada para satisfacer aplicaciones de control compatibles con EtherNet.</p> <hr/> <p style="text-align: center;">Es un estándar para la interconexión de redes industriales que admite la transmisión de mensajes implícita y explícita.</p> <hr/> <p style="text-align: center;">Diseñada para gestionar grandes cantidades de datos de transmisión de mensajes.</p>

Fuente: Elaboración propia basada en [54], [57], [58], [59] y [60].

CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

3.1. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE LAS PARTES DEL SISTEMA AS/RS DE LA UTM

La tabla 9 muestra información sobre piezas que forman parte de la estructura del sistema AS/RS propuesto para la UTM, cabe mencionar que estas características son relevantes para la determinación de algunos criterios en la selección de sensores, actuadores y controlador.

Tabla 9: Características de las partes del sistema AS/RS propuesto en la UTM.

Requerimientos Generales			Requerimientos Específicos		
Requerimiento	Unidad	Valor	Requerimiento	Unidad	Valor
• Sistema AS/RS	Unidad	1	Profundidad	cm	98
			Largo	cm	265
			Altura	cm	190.7
			Peso neto del sistema	kg	113
• Anaquel	Unidad	1	Profundidad total	cm	45.5
			Largo total	cm	170
			Altura total	cm	92.7
			Peso de anaquel	kg	37.7
			Peso máx. a soportar por anaquel	kg	152
• Bahía	Unidad	16	Número de columnas	Unidad	4
			Número de hileras	Unidad	4
			Largo	cm	37.5
			Profundidad	cm	37.5
			Altura	cm	18.175
			Volumen	cm ³	25558.59375
			Número de tipos de carga	Unidad	≤2
• Transelevador cautivo en pasillo			Peso	kg	33.54
			Peso a máx. a soportar	kg	9.44
			Grados de libertad		3

Requerimientos Generales				Requerimientos Específicos		
• Punto de E/S				Largo	cm	39.5
				Profundidad	cm	45.5
				Peso	kg	2.354167
• Pasillo	Unidad	1		Largo	cm	265
				Profundidad	cm	52.5
				Peso a soportar	kg	50.62
• Pallet				Largo	cm	35.5
				Profundidad	cm	35.5
				Altura	cm	1.905
				Peso	kg	2.23
• Carga				Ancho máx.	cm	35.5
				Altura máx.	cm	16.905
				Profundidad máx.	cm	35.5
				Peso máx. de unidad de carga	kg	9.5
				Profundidad	cm	45.5
❖ Unidad de control				Largo	cm	39.5
				Peso	kg	18.8333
Número de motores	Unidades	3				
Número de sensores	Unidades	4<X<26				

Fuente: Elaboración propia basado en [7].

En seguida, se realizará una breve descripción de cada una de las piezas que conforman la estructura del sistema AS/RS mostradas en la tabla anterior:

El sistema de almacenamiento, cuenta con un anaquel estático de línea simple, con un transelevador sencillo, un pasillo único por donde transita la máquina de almacenamiento y retiro, un punto de entrada y salida; así como también la unidad de control, la cual se divide en dos secciones; el gabinete de control y el monitor disponible al usuario [7].



Figura 39: Anaquel estático.

Fuente: Basado en [7].

El sistema AS/RS completo tiene una longitud de 265 cm, altura de 190.7 cm y profundidad de 98 cm, el peso neto de esté es de 113 kg, estas dimensiones fueron propuestas para que exista compatibilidad entre el sistema AS/RS con algunas máquinas que se encuentran en el laboratorio de Tecnología Avanzada en Manufactura (a partir de aquí LabTAM) de esta institución (brazo robótico, fresadora y torno CNC, banda transportadora) considerado la formulación de una célula de

manufactura en un futuro.

El anaquel contiene las columnas, travesaños y cubiertas (Figura 39). El anaquel tiene de largo 170 cm, profundidad de 45.5 cm y altura de 92.7 cm, el peso de este es de 37.7 kg, se requirió que este no tuviera un peso excesivo para poder ser trasladado solo por dos personas en caso que fuera necesario cambiarlo de lugar, puede llegar a soportar 152 kg.

El transelevador es un robot que tiene como finalidad extraer la pieza de su lugar y colocarla en la estación de cargado para que se pueda retirar, tiene un peso de 33.54 kg y el peso máximo a soportar sobre este es de 9.5 kg.

En la parte lateral derecha del anaquel se encuentra el punto de entrada y salida el cual se encarga de realizar un intercambio físico de entradas y salidas.

El pasillo está conformado por la guía superior, la guía inferior y el cajón de soporte del pasillo. Acepta varios mecanismos de accionamiento y permite la instalación del motor de dos maneras: una sobre el carrito guía o a un costado del pasillo si es necesario para accionamientos de transmisión de banda o de tornillo móvil [7].

La unidad de control se divide en dos partes La primera es el gabinete de control y queda ubicado dentro o fuera del anaquel. La segunda, ubicada en el exterior sobre la parte lateral del anaquel, es la pantalla de control y el teclado.

El gabinete de control es de una ventana corrediza de vidrio, con el fin de que el usuario pueda observar los controladores, variadores y paros de emergencia desde fuera del anaquel sin necesidad de interrumpir el funcionamiento de la máquina.

Es importante tener en consideración estas medidas ya que estas, ayudarán en la selección del tamaño del sensor, para que esté pueda acoplarse al sistema sin preocupación de que pueda quedar muy pequeño o muy grande afectando directamente el funcionamiento de cada uno de los componentes, otro aspecto importante además de las dimensiones son los pesos de cada componente que involucra movimiento dentro del sistema (transelevador, efector final) aunado a este el peso máximo de la unidad de carga y pallet, todo esto para determinar criterios para la selección del motor en cada eje.

En la tabla 9 muestra información sobre la cantidad de sensores y motores considerados para el funcionamiento del AS/RS en la tesis “Diseño de la estructura física de un AS/RS para fines didácticos”, la cantidad de sensores mostrados en la tabla es un tanto elevada debido a

que al inicio del diseño de la estructura se proponían sensores para movimiento, peso, carga, límites, etc.

En este proyecto se ha considerado un número menor en comparación con el mostrado en la tabla 9, pues el objetivo al realizar la selección de estos componentes es lograr el movimiento de la máquina S/R, así como también indicar el límite del área de trabajo en los ejes X, Y y Z, y el cero máquina en los ejes X y Y obteniendo la cantidad de 8 sensores de presencia.

El procedimiento para determinar el tamaño del sensor fue el siguiente:

1. Se determinó la posición donde serían colocados los sensores respecto a cada eje X, Y y Z (véase Figura 4).
2. Una vez prevista la posición del sensor:
 - 2.1. Se consulta el plano del riel en el eje X y Y del sistema [7].
 - 2.1.1. Los datos que se obtuvieron de los planos son los siguientes:

Eje x		Escala
Largo (mm)	2473	1:5
Ancho (mm)	185	
Profundidad (mm)	69	

El diámetro del riel nos ayudará a definir el tamaño de la rosca del sensor, puesto que este no debe salir de los límites, para no intervenir con el funcionamiento de la máquina S/R. La longitud nos ayudará a definir a que distancia será colocado el sensor de limite y el final de carrera, la profundidad es igual de importante que las anteriores, ya que nos ayudará al momento de comparar el tipo de colocación de los sensores (Enrasado o no).

3. Posteriormente se realizaron algunos cálculos ya que los planos se encontraban a escala.

Eje x		Escala	mm (real)
Largo (mm)	2473	1:5	12365
Ancho (mm)	185		925
Profundidad (mm)	69		345
Ø	16		80

4. De acuerdo con el resultado obtenido para el diámetro del riel, se optó por un sensor 8M o 12M, debido a que estos tamaños no son exagerados y se ven apropiados para el buen funcionamiento del sistema.
5. Una vez que se obtuvo el tamaño de la rosca del sensor se prosiguió a buscar proveedores (Véase la tabla 12).

Para el caso de los motores se considera la misma cantidad propuesta en la tabla 10, considerando que este número será suficiente para lograr movilizar la carga en cada eje, una vez que se realizó el análisis de la estructura del sistema AS/RS se llegó a la conclusión que la selección de los motores no será algo fácil de determinar, puesto que en este sistema se involucran diferentes aspectos por lo cual el motor debería de cumplir con ciertas características unas de ellas son: el controlar la dirección de movimiento y velocidad, conduciéndonos a servomotores o motorreductores.

Una vez que se sabe qué tipo de motores buscar, se ha considerado también un factor de seguridad, el cual, es parte fundamental a la hora de seleccionar los motores, para ello se requiere de estudios como [61]:

1. Variaciones que pueden ocurrir en las propiedades del material

La composición, resistencia y dimensiones de los elementos están sujetas a pequeñas variaciones durante la manufactura, debido a que las propiedades del material pueden alterarse y, con ello, introducir esfuerzos residuales debido al calentamiento o deformación que puedan ocurrir durante la manufactura, almacenamiento, transporte o construcción del material [61].

2. Tipo de carga

La mayoría de las cargas de diseño son aproximaciones. Además, las alteraciones futuras o cambios en el uso pueden introducir cambios en la carga real [61].

Para este caso se han considerado dos tipos de carga, dinámica y estática: para el primer caso (dinámica), el equipo deberá desplazarse a la zona de entrada y salida para tomar la pieza y colocarla en un lugar disponible, pasará al segundo caso (estática), cuando la pieza no sea requerida o entre una nueva pieza pues no habrá la necesidad de que el equipo realice algún movimiento y se encontrará fijo, pasará de nuevo al primer caso en el momento en que la

pieza sea requerida, pues este deberá trasladarse a donde se encuentra la pieza para después colocarse en la zona de entrada y salida.

3. N° de ciclos de carga durante la vida del componente

Para la mayoría de los materiales el esfuerzo último disminuye al aumentar el número de aplicaciones de carga (este fenómeno se conoce como fatiga y, si se ignora, puede provocar una falla repentina) [61], considerando que todos los grupos de nueve de las carreras que ofrece la universidad harán uso de este equipo durante cinco años realizando cinco prácticas por grupo y semestre, así como también se han considerado 10 piezas/h carga y descarga siendo así 10 ciclos de carga y descarga, todos estos datos deberán ser considerados al momento de determinar la vida útil operativa del equipo así como también tiene mucho que ver el cuidado que se le brinde a lo largo de su vida, según el mantenimiento dado.

4. Error de análisis

Todos los métodos de diseño se basan en ciertas suposiciones simplificadoras que se traducen en que los esfuerzos calculados sean sólo aproximaciones de los esfuerzos reales [61].

5. Tipo de falla que puede ocurrir

Los materiales frágiles comúnmente fallan de manera repentina, sin indicación previa de que el colapso es inminente. Por otra parte, los materiales dúctiles, como el acero estructural, con frecuencia sufren una sustancial deformación, llamada cedencia, antes de fallar, dando así una advertencia de que existe la sobrecarga. Sin embargo, la mayoría de las fallas de estabilidad o por pandeo son repentinas, sea frágil el material o no. Cuando existe la posibilidad de falla repentina, debe emplearse un mayor factor de seguridad que cuando la falla es precedida por señales obvias de advertencia.

En este equipo las fallas más comunes son: el mal uso de la máquina AS/RS (que este opere fuera del área de trabajo normal), en ejes, rodamientos y en algunos casos en el mantenimiento, pues no se realiza el cambio de grasa dentro del tiempo indicado provocando que estos requieran de un esfuerzo mayor para lograr el movimiento del equipo.

6. Deterioro que pueda ocurrir en el futuro por mantenimiento incorrecto o por causas naturales inevitables.

Un factor de seguridad mayor es necesario en localidades donde las condiciones como la corrosión y la putrefacción son difíciles de controlar o hasta de descubrir [61].

7. Importancia de un elemento dado en la integridad de la estructura completa

Los refuerzos y los elementos secundarios pueden diseñarse en muchos casos, con un factor de seguridad menor que el empleado para los elementos principales.

Además del factor de seguridad es necesario tomar en cuenta un factor de pérdidas mecánicas, puesto que se trata de motores y estos involucran elementos importantes para la conservación de potencial de energía en los sistemas de accionamiento.

La potencia se puede mejorar realizando un análisis en cada uno de sus elementos, se sabe que los dispositivos que cumplen con la tarea de causar un cambio en el estado de un material o hacer un trabajo tiene perdidas de energía, las más conocidas son [45] y [62]:

1. Pérdidas de transmisión eléctrica desde el punto de medición al sistema. (Aquí es donde se mide el consumo de energía eléctrica y se determina la factura de energía).
2. Pérdidas de conversión en el modulador de potencia (o convertidor): el convertidor de semiconductores generalmente tiene bajas pérdidas de conversión.
3. Pérdidas del motor eléctrico para convertir la energía eléctrica en energía mecánica: se determinan por la elección del motor (calidad de su diseño y selección de la clasificación correcta) y la calidad del suministro (variaciones de voltaje , desequilibrio, variaciones de frecuencia y armónicos).
4. Pérdidas mecánicas en las partes del sistema de transmisión, como cojinetes, engranajes, embragues y correas.
5. Pérdidas en la carga: la carga es una máquina requerida para realizar una tarea específica como ventilador, bomba y tren.
6. Pérdidas causadas por estrangulamiento u otros medios que controlan el flujo de material al absorber o evitar el exceso de salida.
7. Pérdidas de transmisión mecánica, como pérdidas por fricción para mover material de un lugar a otro. Las pérdidas en la tubería que transporta fluido es uno de esos ejemplos.

Tomando en cuenta cada uno de estos factores y conociendo que el factor de seguridad es obtenido del valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real al que estará sometido se considera adecuado un número mayor que 1, que coincide con el factor de seguridad propuesto en [7], el cual consiste en tomar en cuenta el 50% adicional (1.5 factor de carga extra a soportar).

La búsqueda de los actuadores se basó en la propuesta de [7], ya que de acuerdo a estos se calculó el peso total de la máquina S/R, es por eso que se consideraron como base principal en la búsqueda de otros posibles actuadores respecto a sus características.

La tabla 10 muestra los posibles actuadores para este sistema, partiendo de [7]:

Tabla 10: Pesos de posibles motores seleccionados.

Eje	Marca	Tipo de motor	Modelo
X	Baldor	Servomotor (cuenta con tacómetro)	MT-4090-BLYCE
	Weg		14318233
	Omron		R88M-UE75030V-S1
	Indramat		MKD071B-061-KG1-KN
	Mitsubishi		HG154
			HF154
Y	Bodine Electric company	Motor de engranajes o Motorreductor	42R5BFCE-E1
	Baldor		42A5BEPM-E3
			GF2054
	Marathon		383367561332
	Dayton		6Z082
Z	Panasonic		M4RA1G4L
	Uxcell		DFGA32RI-16.2i
	Greartisan		HJP37RIC
	Walfont		37GB-3530
	Pololu		

Fuente: Elaboración propia.

Para el controlador se contempla un PLC, el cual funcionará como un cerebro, usando una memoria programable para así, controlar a través de módulos de entradas y salidas digitales y analógicas, varios tipos de máquinas o procesos que pudieren ser muy lentas manualmente.

Se realizó una investigación sobre los controladores de movimiento que se encuentran actualmente en el mercado y se compararon considerando algunos criterios para su selección según [55]. Esta comparación se realiza como referencia, pues la UTM cuenta actualmente con un controlador (PLC) de la marca SIEMENS modelo SIMATIC de la serie S7-1500, el cual puede ser incluido en este proyecto, evitando así la compra de otro controlador. Esto último favorecería a la universidad, pues se ahorraría los gastos que involucraría este componente.

Algunos de los criterios importantes en la selección de este tipo de componentes son datos del proveedor, el cual debería de encontrarse dentro del país, ya que un proveedor externo involucraría mayor tiempo de entrega, así como un incremento en gastos de envío.

3.2 RELACIÓN DE LAS MATERIAS CON EL SISTEMA AS/RS

Los avances tecnológicos han provocado que tanto industrias como instituciones educativas modifiquen sus procesos de formación, las industrias se ven obligadas adaptarse a nuevas condiciones de mercado, involucrando tecnología, como consecuencia a esto, las universidades e instalaciones de capacitación se enfrentan al desafío de identificar futuros perfiles de trabajo y requisitos de competencia correlacionados, y tienen que adaptar y mejorar sus conceptos educativo, dando como resultado un nuevo concepto “fábricas de aprendizaje” que consisten en proyectos interdisciplinarios prácticos de diseño de ingeniería mayor con fuertes vínculos e interacciones con la industria [63], dicho concepto ha sido adoptado en varias partes del mundo (Figura 40).

Este nuevo concepto enfatiza la experiencia práctica adquirida al aplicar el conocimiento aprendido en la educación de ingeniería para resolver problemas reales en la industria y diseñar / rediseñar productos para satisfacer las necesidades identificadas.

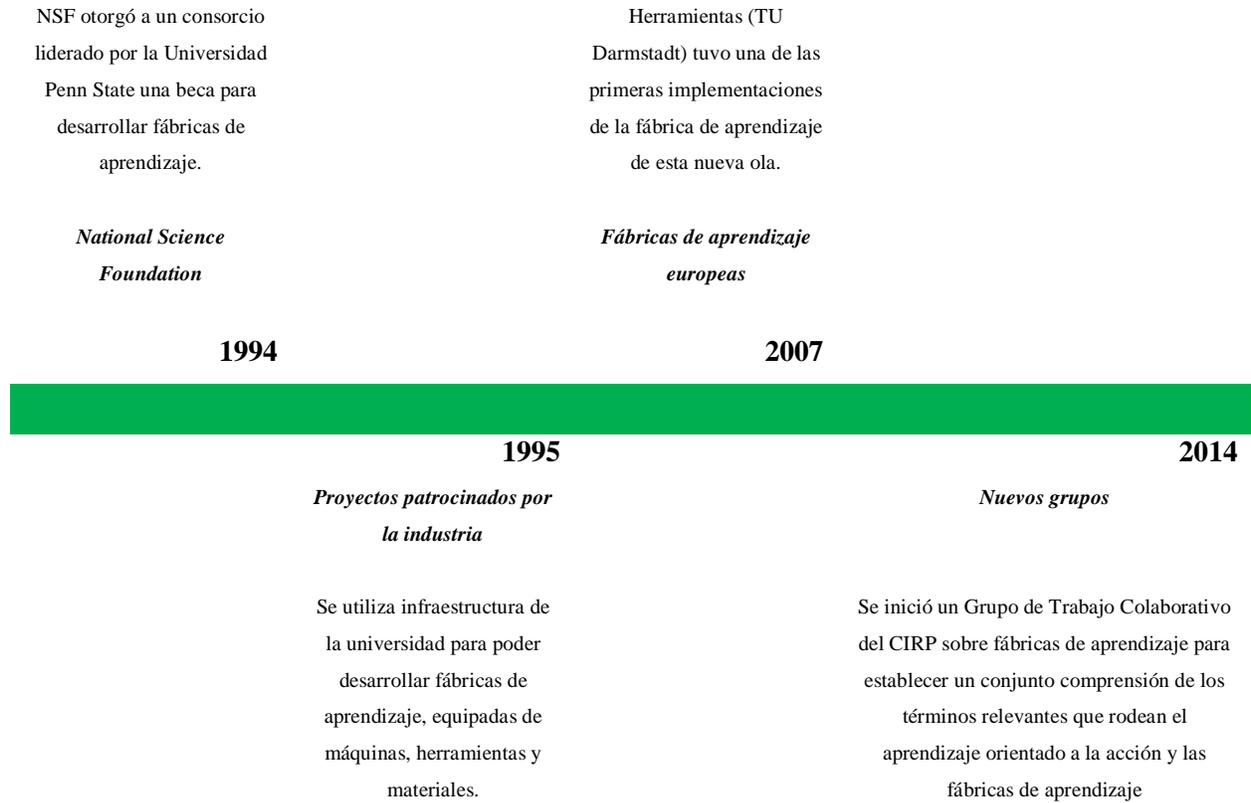


Figura 40: Evolución del concepto de fábricas de aprendizaje.

Debido a los desafíos que se presentaban dentro de las industrias sobre los métodos tradicionales de enseñanza, notaron que éstos eran poco viables ya que mostraban efectos limitados, por lo que se necesitaban nuevos enfoques de aprendizaje [63]:

- Que permitieran la capacitación en entornos de fabricación realista.
- Modernizar el proceso de aprendizaje y que se acercará a la práctica industrial.
- Aprovechar la práctica industrial mediante la adopción de nuevos conocimientos y tecnología de fabricación.
- Impulsar a la innovación en la fabricación al mejorar las capacidades de los ingenieros jóvenes, por ejemplo, capacidad de resolución de problemas, creatividad o capacidad de pensamiento sistémico.

Como se ha mencionado anteriormente muchas instituciones han modificado sus métodos de enseñanza adoptando nuevos conceptos y estrategias para mantenerse a la par con los requerimientos de la industria actual, es por eso que la UTM ha diseñado la estructura física de un AS/RS el cual será útil para poder reforzar conocimientos vistos en clases relacionados

al área de automatización, así como también realizar prácticas con los alumnos para que ellos puedan tener contacto con estos instrumentos eliminando así, sus miedos y sacando nuevas dudas que podrían surgir cuando se encuentren laborando, podrán mejorar sus capacidades ante la resolución de problemas así como también realizar investigaciones académicas.

Una vez que se tuvo el diseño de la estructura del sistemas se prosiguió a la búsqueda de las carreras que serían beneficiadas con el sistemas implementado, se consultó el plan de estudios actual de cada carrera, tomando en cuenta las materias y temas a abarcar con el sistema, objetivo de la materia y perfil del egresado, de acuerdo a la búsqueda, las carreras son: Mecánica automotriz, Mecatrónica, Electrónica e Industrial, es preciso señalar que estas carreras abarcan temas en los cuales el contar con un sistema AS/RS traería grandes beneficios para las mismas.

Los criterios que se consideraron, tendrán una ventaja para cada una de las carreras pues no solo serviría para conocer lo nuevo que hay dentro de las industrias, sino también para reforzar el perfil del egresado pues contarían con un nivel académico competitivo respecto al tema de automatización industrial (véase la tabla 11), cabe mencionar que algunas instituciones ya cuentan con un sistema AS/RS lo que posiciona a sus alumnos a tener una ventaja ante otros.

Tabla 11: Carreras, materias, temas y subtemas que se abarcarán con el uso de un sistemas AS/RS.

Ingeniería	Materias	Temas	Subtemas	Objetivo de la materia	Perfil del egresado	Semestre
Industrial	Automatización Industrial	Concepto de control de procesos	Control en lazo abierto	Proporcionar al alumno una visión global de las diferentes tecnologías que se utilizan en la automatización de procesos de fabricación, prestando un interés especial en el funcionamiento de automatismos sobre controladores lógicos programables.	Desarrollará: -Conocimientos de las ciencias básicas y de la ingeniería a la solución de problemas del desarrollo industrial sustentable; en el ámbito de planeación, diseño, implantación y mejora de sistemas de producción de bienes y servicios; evaluación de proyectos, logística, administración de materiales y factor humano en la empresa. -Habilidad tecnológica y capacidad de analizar, interpretar y modelar sistemas productivos, así como crear su propia fuente de empleo.	10
			Control en lazo cerrado			
		Sensores y actuadores industriales	Eléctricos			
			Neumáticos			
			Hidráulicos			
			Ventajas y desventajas			
		Autómatas programables	Lenguajes de programación			
			Programación en escalera			
			Programación en lista de instrucciones			
			Programación con bloques funcionales			
	Autómatas programables	Automatización con autómatas programables				
		Redes de comunicación industrial				
	Sistemas de manufactura	Introducción a los sistemas de manufactura	Conceptos	Otorgar al estudiante el conocimiento y habilidad aplicando los conceptos y las técnicas de manufactura para seleccionar, diseñar, implementar y evaluar un sistema de manufactura, haciendo uso de diversas técnicas y metodologías.		
			Clasificación			
			Integración			
		Automatización y robots en los procesos de manufactura	Razones para automatizar			
			Tipos y niveles de automatización			
		Sistemas integrados de Manufactura	Manufactura integrada por computadora (CIM)			
Sistemas flexibles de manufactura (SFM)						
Sistemas de información para la manufactura		Sistemas de información para la planeación de la empresa, la manufactura y el control				
	Sistemas de comunicación industrial (buses de campo)					
Electrónica	Controladores Lógicos Programables	Fundamentos de la automatización industrial	Objetivos principales de la automatización	Otorgar al alumno el conocimiento para el manejo de los controladores lógicos programables y sus aplicaciones.	El egresado será capaz de incorporarse en el sector productivo, así como de construir sistemas de hardware-software completos, a través de la síntesis del conocimiento e integración modular de sistemas, utilizando nuevas tecnologías.	10
			Componentes y modelos			
			El autómata o controlador lógico programable (PLC)			
			Fundamentos de diagrama en escalera			
		Estructura de los controladores lógicos programables	Configuraciones típicas de los PLC y diagrama a bloques de un PLC			
			Componentes básicos de un PLC: procesador, memorias, entradas, salidas y fuente de alimentación			
		Conexiones de entrada y salida de un controlador lógico programable	Entradas y salidas en un PLC			
			Tipos de interfaces de entrada y salida de un PLC			
		Programación de controladores lógicos programables	Fundamentos de la programación de los PLC			
			Funciones lógicas y control maestro			

CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Ingeniería	Materias	Temas	Subtemas	Objetivo de la materia	Perfil del egresado	Semestre			
Electrónica	Controladores Lógicos Programables	Programación de controladores lógicos programables	Temporizadores, contadores y registros de corrimiento			10			
			Transferencia de datos y contadores rápidos						
Mecatrónica	Manufactura avanzada	Sistemas de manufactura flexible (SFM)	Conceptos	Otorgar al estudiante los principios para la identificación e implementación de sistemas de manufactura, y desarrollar las habilidades elementales para la programación de máquinas de control numérico y robots industriales.	El egresado será un profesionalista con conocimientos en las áreas de ingeniería mecánica, electrónica, de control y computación, capaz de automatizar procesos, diseñar sistemas mecatrónicos, aplicar herramientas computacionales especializadas.	10			
			Componentes de un SFM						
			Aplicación y beneficios de los SFM						
		Herramientas tecnologías CAD/CAM	Introducción a la tecnología CAM						
	Manufactura integrada por computadora								
	Autómatas programables	Fundamentos de la automatización industrial	Introducción a la automatización	Sensores, actuadores y otros componentes de sistema de control		Otorgar al alumno los principios para la selección e integración de autómatas programables en los procesos industriales, así como desarrollar la habilidad para la aplicación de métodos y técnicas de programación de este tipo de dispositivos.	8		
				Tecnologías de servoamplificadores/controladores para motores eléctricos					
				Definición, arquitectura y principio de funcionamiento de un PLC					
		Estructura de los controladores lógicos programables	Configuraciones típicas de los PLC y diagrama a bloques de un PLC	Componentes básicos de un PLC: procesador, memorias, entradas, salidas y fuente de alimentación					
				Conexiones de entrada y salida de un controlador lógico programable				Entradas y salidas en un PLC	
								Tipos de interfaces de entrada y salida de un PLC	
		Programación de controladores lógicos programables	Fundamentos de la programación de los PLC	Lenguajes de programación: escalera, lista de instrucciones, compuertas lógicas y programación de texto estructurado					
				Funciones lógicas y control maestro					
				Temporizadores, contadores y registros de corrimiento					
				Transferencia de datos y contadores rápidos					
				Introducción a los controladores de automatización programables (PAC's) y redes industriales				Tipos de redes industriales y sus protocolos	Redes sensor-actuador: Asi
									Buses de campo; PROFIBUS, DEVICENet, COMPOBUS Redes Ethernet

Ingeniería	Materias	Temas	Subtemas	Objetivo de la materia	Perfil del egresado	Semestre
Mecánica automotriz	Automatización industrial	La automatización industrial	Automatismos, cables y programas	Que el alumno diseñe modelos utilizando especificación de sistemas secuenciales para, posteriormente, realizarlos mediante lenguajes de programación de autómatas programable industria (PLC).		9
			El autómata lógico programable (PLC)			
		Los controladores lógicos programables	Componentes de un PLC			
			Configuraciones			
			Conexiones de entradas y salidas			
		Sistemas de programación de los autómatas programables	Simulador PLC			
			Lenguaje de esquema de contactos (LADDER)			
			Lenguaje de lista de instrucciones			
		El autómata programable y las comunicaciones industriales	Diseño asistido por computadora			
			Fabricación integrada por computadora: pirámide CIM			
			Comunicaciones industriales			
			Redes de comunicación industrial			
			El autómata programable y las comunicaciones industriales			
			Comunicación entre el PLC y los dispositivos de campo			
			Comunicación entre el PLC y otros sistemas electrónicos de control			

Fuente: Elaboración propia, basada en plan de estudios de cada carrera.

3.3 DETERMINAR CRITERIOS Y ALTERNATIVAS

En este apartado se determinarán los criterios más relevantes a considerar al momento de seleccionar sensores, actuadores y controlador según algunos autores, así como también considerando requisitos para el beneficio académico, posteriormente a esto se estarán presentando las alternativas consideradas hasta el momento.

3.3.1 LISTA DE CARACTERÍSTICAS A ANALIZAR PARA CADA COMPONENTE CONSIDERANDO LA RELACIÓN CON CADA CARRERA

Más adelante, se muestran los criterios que son considerados para la elección de sensores, actuadores y controlador de acuerdo algunas fuentes y datos que fueron encontrados en sus fichas técnicas.

- Sensores

- *Tamaño:* El tamaño es importante, como ya se mencionó anteriormente se busca sensores M8 o M12, debido a los cálculos realizados basados en el diseño del sistema, nos llevó a la conclusión de que no son tamaños exagerados y se ven apropiados para el buen funcionamiento del sistema.
- *Voltaje:* Se busca sensores de voltaje 24 DC, pues es el estándar industrial y más común. Este criterio solo será considerado para la reducción de la lista de alternativas de sensores.
- *Tipo de sensor:* Se buscan sensores sin contacto por las ventajas que proporciona (larga vida), además debe cumplir con los objetivos deseados para el funcionamiento del sistema como: delimitar el área de trabajo, posicionar e indicar el cero máquina.
- *Forma:* La forma es importante puesto que se busca que sean circulares por su facilidad de colocación, en cambio un rectangular requeriría mayor espacio y podría afectar el funcionamiento del sistema. Este criterio solo se utilizó para la reducción de la lista de sensores.

De manera general los criterios a analizar en los sensores son:

- *No. de subtemas que abarca:* Este proyecto busca reforzar los conocimientos adquiridos en clase, para eso se toman en cuenta el número de temas que se abarcarán con este sistema implementado en la institución, al igual que las anteriores este aspecto será considerado fundamental para la selección de sensores, actuadores y controlador
- *Facilidad de conexión:* Debe ser fácil conexión y desconexión para el alumno. Al contar con algún tipo de conector ya sea M8, M12 o cable, se considerará la facilidad y la rapidez para la conexión además de comodidad si el trabajo se realiza manualmente. Este criterio se utilizó para la reducción de lista de sensores.
- *Costo:* Será relevante, ya que la universidad designa ciertas cantidades monetarias para cada proyecto según su importancia o impacto que tendrá, en la elección de los sensores, actuadores y controlador deberá considerarse significativo.

- Actuadores
 - *Peso*: Si el peso se modifica, afectará a la estructura, puesto que en un análisis preliminar se realizaron cálculos para poder aproximar el peso de los actuadores sin afectar la estructura, es por eso que se buscaron actuadores que tuvieran un peso similar o menor al propuesto en [7].
 - *HP*: Es necesario conocer, puesto que si se realiza una carga mayor a la que soporta el actuador podría ocasionar desperfectos al mismo.
 - *RPM*: A pesar de que no tiene tanto peso en la selección, podría tomarse en cuenta, para aumentar la potencia, ya que si se aumentan las RPM se podría lograr un mayor HP.
 - *Tipo de motor*: Se considera importante debido a las ventajas que ofrece, mencionadas anteriormente.

De manera general los criterios son:

- *No. de subtemas que abarca*: Este proyecto busca reforzar los conocimientos adquiridos en clase, para eso se toman en cuenta el número de temas que se abarcarán con el sistema implementado dentro de la institución, este criterio será considerado importante para la selección de sensores, actuadores y controlador.
- *Facilidad de conexión*: A el alumno se le deberá facilitar la conexión y desconexión de los componentes. Por lo que se recomiendan conectores de tipo M8, M12 o cable, son de fácil y rápida conexión además son cómodos para el trabajo manual.
Costo: Será importante, debido a que la universidad asigna ciertas cantidades monetarias para cada proyecto según su importancia o impacto que tendrá, en la elección de los sensores, actuadores y controlador deberá considerarse significativo.

- Controlador
 - *No. Máximo de E/S*: Es importante, pues permitirá el ingreso de la información de todos los dispositivos a controlar. Para este caso es necesario

considerar un número mayor de E/S ya que se prevé una expansión del sistema, incorporando la maquinaria que se encuentra en el LabTAM.

- *Velocidad de procesamiento en bits:* Se debe considerar el tiempo de procesamiento de la información dada y el tiempo de respuesta.
- *Comunicación:* Permitir el intercambio de información a otros niveles de la empresa.

De manera general, los criterios son:

- *No. de subtemas que abarca:* Se reforzarán los conocimientos adquiridos en clase, para eso se toma en cuenta el número de temas que se abarcará con el sistema dentro de la institución, este aspecto será considerado fundamental para la selección de sensores, actuadores y controlador
- *Facilidad de conexión:* A el alumno se le debe facilitar la conexión y desconexión de los componentes. Los componentes deben de contar con un tipo de conector ya sea M8, M12 o cable, se considerará la facilidad y la rapidez para la conexión además de comodidad si el trabajo se realiza manualmente.
- *Costo:* Para este caso no será tomado en cuenta debido a que las solicitudes enviadas a diferentes proveedores no fueron respondidas satisfactoriamente.

3.4 COMPONENTES EN EL MERCADO

Los componentes considerados hasta el momento son aquellos que cumplen con las características requeridas como son: costo, número de subtemas a cubrir y facilidad de conexión, mencionando los más generales. Para conocer la relación de los temas a abarcar con el sistema dentro de la UTM fue necesario conocer el plan de estudios de cada carrera (véase tabla 11).

❖ Sensores

La tabla 12 contiene información obtenida de proveedores y fichas técnicas. Los dispositivos cumplen con los criterios: tipo de sensor, marca, modelo, forma, tamaño, conexión y voltaje, dichos criterios se mencionaron anteriormente de acuerdo a su importancia para la selección.

Tabla 12: : Lista de sensores disponibles y posibles a utilizar para el sistema.

Tipo de sensor	Marca	Modelo	Forma	Tamaño, Ø	Conexión	Voltaje
INDUCTIVO	PEPPERL+ FUCHS	NBB1.5-8GM40-E2-V1	Circular	M8	M12	10-30 VDC
		NBN2.5-8GM50-E0	Circular	M8	M12	5-30 VDC
		NMB1.5-8GM65-E2-FE-V1	Circular	M8	M12	10-30 VDC
		NJ2-F-E02-1.025-V1	Circular	M12	M12	10-30 VDC
	FESTO	SIES-8M-PO-24V-K-0.3-M8D	Circular	M8	M8	10-30 VDC
		SIES-8M-NS-24V-K-5.0-M8D	Circular	M8	Cable	10-30 VDC
		SIEF-M12B-NS-S-L	Circular	M12	M12	10-30 VDC
		SIEH-M12B-PS-S-L	Rectangular	M12	Cable	10-30 VDC
		SIEH-M12B-PS-K-L	Rectangular	M12	Cable	10-30 VDC
		SIES-8M-PO-24V-K-0.3-M8D	Circular	M8	Cable	10-30 VDC
		SIES-8M-NS-24V-K-5.0-M8D	Circular	M8	Cable	10-30 VDC
	OMRON	E2AS08KS02M5B1	Circular	M8	M8	12-24 VDC
		E2A-M12KS04-WP-B1-2M	Circular	M12	M12	12-24 VDC
	TURK	BI2U-EG08-AP6X	Circular	M8	Cable	10-30 VDC
		NI10U-M12-AP6X	Circular	M12	Cable	10-30 VDC
	IFM	IES202	Circular	M8	Cable	10-30 VDC
IFS286		Circular	M12	M12	10-30 VDC	
Capacitivo	PEPPERL+ FUCHS	CBB4-12GH60-E2-V1	Circular	M12	M12	10-36 VDC
		CBB4-12GH70-E2	Circular	M12	Cable	10-36 VDC
	OMRON	E2K-X4ME1 2M	Circular	M12	Cable	10-30 VDC
	TURK	BC3-M12-AP6X	Circular	M12	Cable	10-30 VDC
		BC3-M12-AN6X	Circular	M12	Cable	10-30 VDC

Fuente: Elaboración propia.

Nota: se consideraron solo estas marcas, debido a que no se obtuvo una respuesta favorable por parte de otros proveedores, las marcas seleccionadas cuentan con proveedor en México y podrán realizar envíos fácilmente.

De acuerdo al requisito de facilidad de conexión, se busca sensores con tipo de conexión M8 o M12, aquellos que no cumplen serán descartados, reduciendo la lista de sensores de la siguiente manera (véase tabla 13), la cual será utilizada para emplear la metodología AHP. Para obtener mayor información acerca de criterios faltantes ver Anexo A.

Tabla 13: Lista de alternativas

Tipo de sensor	Marca	Modelo	Forma	Tamaño, Ø	Conexión	Voltaje	Alternativa
INDUCTIVO	PEPPERL+ FUCHS	NBB1.5-8GM40-E2-V1	Circular	M8	M12	10-30 VDC	A1
		NBN2.5-8GM50-E0	Circular	M8	M12	5-30 VDC	A2
		NMB1.5-8GM65-E2-FE-V1	Circular	M8	M12	10-30 VDC	A3
		NJ2-F-E02-1.025-V1	Circular	M12	M12	10-30 VDC	A4
	FESTO	SIES-8M-PO-24V-K-0.3-M8D	Circular	M8	M8	10-30 VDC	A5
		SIEF-M12B-NS-S-L	Circular	M12	M12	10-30 VDC	A6
	OMRON	E2AS08KS02M5B1	Circular	M8	M8	12-24 VDC	A7
		E2A-M12KS04-WP-B1-2M	Circular	M12	M12	12-24 VDC	A8
	IFM	IFS286	Circular	M12	M12	10-30 VDC	A9
Capacitivo	PEPPERL+ FUCHS	CBB4-12GH60-E2-V1	Circular	M12	M12	10-36 VDC	A10

- ❖ **Actuadores:** la tabla 14 presenta la lista de dispositivos posibles que tendrán como propósito generar movimiento al sistema, asimismo contiene solo información de criterios preestablecidos.

Tabla 14: Lista de actuadores con algunos criterios.

Eje	Marca	Tipo de motor	Modelo	Peso (kg)	Velocidad (rpm)	HP	Voltaje
X	Baldor	Servomotor (cuenta con tacómetro)	MT-4090-BLYCE	9.98	2300		100 DC
	WEG		14318233	9.735	1735	1/2	220 DC
	Omron		R88M-UE75030V-S1	4.3	3000	1	380 DC
	Indramat		MKD071B-061-KG1-KN	7	5000	6 3/7	200 DC
	Mitsubishi		HG154	8.3	4000	2	200 DC
HF154		8.3	3000	2	230 DC		
Y	Bodine Electric company	Motor de engranajes o Motorreductor	42R5BFCI-E1	6.8	280	1/6	130 AC
	Baldor		42A5BEPM-E3	6.87	125	1/4	115 AC
	Marathon		GF2054		1725	1/2	230 DC
	Dayton		383367561332	4.05	1725	1/4	115 CA
Z	Panasonic	Motor de engranajes o Motorreductor	6Z082	3.28	50	1/15	100 CA
	Uxcell		M4RA1G4L	0.3	1550	1/746	12 DC
			DFGA32RI-16.2i	0.68	300	1/10	12 DC
	Greartisan		HJP37RIC	0.204	200	7/870	12 DC
	Walfront		37GB-3530	0.2	1600	2/213	12 DC
Pololu		0.416	670	4/785			

Fuente: Elaboración propia

Nota: Los actuadores que se eligieron tienen proveedor fuera de México. Para mayor información ver Anexo B.

La siguiente tabla muestra una reducción considerando criterios como el voltaje, el cual debe ser DC, dando como consecuencia la exclusión de aquellos que no se tiene la información solicitada.

Tabla 15: Lista de alternativas para cada eje.

Eje	Marca	Tipo de motor	Modelo	Peso (kg)	Velocidad (rpm)	HP	Voltaje	Alternativa
X	WEG	Servomotor	14318233	9.735	1735	1/2	220 DC	B1
	Indramat		MKD071B-061-KG1-KN	7	5000	6 3/7	380 DC	B2
Y	Bodine Electric Company	Motor de engranajes o Motorreductor	42R5BFCI-E1	6.8	280	1/6	230 DC	B3
	MARATHON		3.83368E+11	4.05	1725	1/4	230 DC	B5
Z	Uxcell		DFGA32RI-16.2i	0.68	300	1/10	12 DC	B6
	Greartisan		HJP37RIC	0.204	200	7/870	12 DC	B7
	Walfront	37GB-3530	0.2	1600	2/213	12 DC	B8	
	Pololu		0.416	670	4/785	12 DC	B9	

❖ **Controlador**

Solo se cuenta con la lista de controladores y sus características, el costo no es un criterio incluido debido a que los proveedores a quienes se les envió la solicitud no dieron respuesta a la solicitud.

Tabla 16: Lista de PLC con sus respectivos precios, según su proveedor.

	Marca	Serie	CPU	No. Máx. de E/S	Velocidad de procesamiento en bits	Comunicación	Costo total	Carreas beneficiadas	Materias	# subtemas	Alternativa
PLC	SIEMENS	SIMATIC S7-1500	1511-1 PN	32/32 kbyte	60 ns	Profinet		4	6	58	C1
			1513-1 PN		40 ns						C2
			1516-3 PN/DP		10 ns	Profinet y Profibus					C3
	FESTO	CPX-CEC-M1-V3		512/512 bits	200 µs	Modbus TCP	36, 753.37				C4
	OMRON	CP1H-Y20DT-D		272/272 bits	0.7 ms	TCP/IP					C5
	Allen Bradley	SL 500	5/03	512/512 bits	37 µs	Modbus RTU, Ethernet TCP					C6

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Las marcas que se consideraron cuentan con un proveedor en la República Mexicana, no se logró que las empresas respondieran a nuestra solicitud de cotización, es por eso que los componentes aparecen sin precio. Para información más detallada ver Anexo C.

Tabla 17: Lista de controladores de movimiento CNC con sus respectivos precios, según su proveedor.

	Marca	Serie		Número de ejes máx.	Velocidad de operación	Comunicación	Costo total	Carreas beneficiadas	Materias	# subtemas	Alternativa
CNC	Mitsubishi	C80		3	0.222 ms			4	6	40	C7
	Fanuc	32i-B		20		Ethernet-IP/ PROFINET I- O, Modbus TCP					C8
	Fagor	CNC 8060 FL		4	2 ms	Ethernet					C9
	Siemens	D455-2		128	0.125 ms	EtherNet, Profibus, Profinet					C10

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Las marcas que se consideraron cuentan con un proveedor en la República Mexicana, no se logró que las empresas respondieran a nuestra solicitud de cotización, es por eso que los componentes aparecen sin precio. Para información más detallada ver Anexo C.

3.5 SELECCIÓN DE COMPONENTES

La importancia de seleccionar sensores, actuadores y controlador, recaen en el propósito para el que están destinados, así como también en el cumplimiento de previos requisitos mencionados.

3.5.1 SELECCIÓN DE SENSORES DISPONIBLES

Una vez que se tiene la información necesaria sobre los criterios (véase los anexos A) y se ha comprendido el funcionamiento de cada uno de los componentes. Los sensores nos ayudarán a posicionar y delimitar el área de trabajo según sus posiciones en el sistema (ver Figura 4).

Posterior a esto se procede a la elaboración del AHP, donde se realizarán las comparaciones entre alternativas con el único fin de hallar al sensor con la mejor ponderación, para ello se estará empleando información del anexo A, el cual contiene todos los criterios a evaluar para este componente.

Enseguida, se realizarán cada una de las etapas para la selección de los sensores adecuados.

Primer y segunda etapa: Definir el objetivo y establecer los criterios. Se establece la jerarquía, la cual se compone de: objetivo, criterios y alternativas.

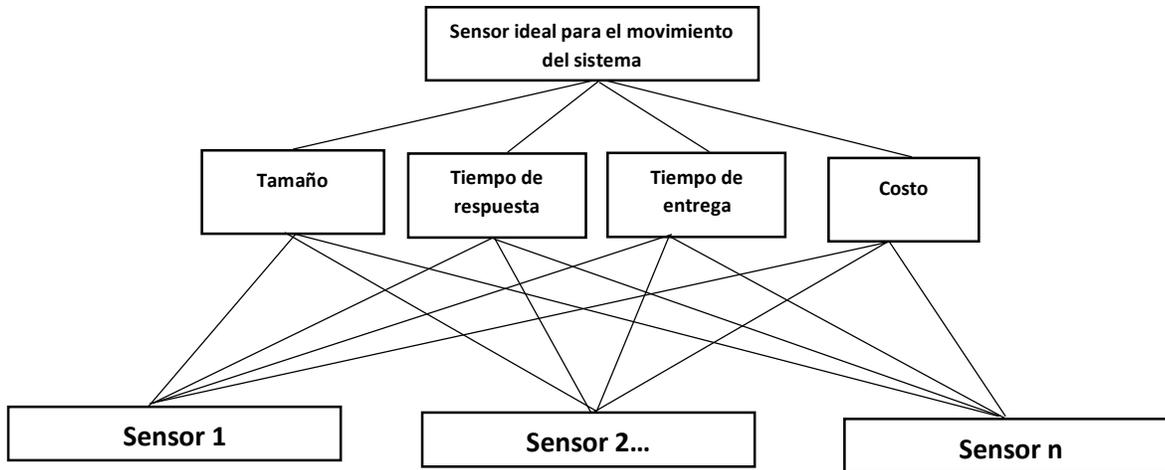


Figura 41: Jerarquía para la selección de un sensor.

Esta jerarquía comprende los diferentes tipos de sensores (para este caso inductivo y capacitivo, véase Anexo A), se contemplaron distintos sensores respecto a su funcionamiento, llevando a la eliminación aquellos con que no contaban con la forma, voltaje y facilidad de conexión, conduciendo a una disminución de la tabla 12, considerando criterios para ser ponderados con el número de alternativas disponibles como:

- Costo
- Tamaño: Considerando tamaños M8 y M12, asignando un mayor valor a M12 por ser más fácil de manipular.
- Tiempo de respuesta: Dando mayor prioridad aquellos que contestaron a la solicitud.
- Tiempo de entrega: Se dará preferencia a aquellos que envíen sus productos en menos de una semana.

Tercera etapa

Se realizan las comparaciones entre los distintos criterios de decisión, tomando como base el objetivo final. Asignando valores de acuerdo a la importancia dada por el evaluador considerando la escala de pesos de Saaty (véase Tabla 2).

La Tabla 18 muestra la comparación de los cuatro criterios (unos contra otros y contra sí mismos) a considerar para la selección de sensores. Al realizar la comparación, se deberá realizar la pregunta ¿El criterio (X), es más o menos importante que el criterio (Y), al elegir

el sensor para cumplir con el objetivo? Si el criterio (X), se compara con el criterio (Y) con un criterio esencial, se le asignará un valor de 5, por lo que al comparar (Y) contra (X) la comparación será el recíproco, es decir, 1/5; si el factor (X) es comparado consigo mismo, el valor será 1.

Posteriormente se normaliza la matriz, para ello se toma el valor asignado de cada criterio y se divide entre la suma total de ese criterio así hasta culminar con los demás, seguidamente se obtiene el promedio para cada criterio obteniendo así el vector promedio.

Tabla 18: Matriz comparación por pares-criterios para la selección de sensores.

Matriz comparación por pares-Criterios									
	Costo	Tamaño	Tiempo de respuesta	Tiempo de entrega	Matriz normalizada				Vector promedio
Costo	1.00	3.00	3.00	3.00	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
Tamaño	0.33	1.00	1.00	1.00	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
Tiempo de respuesta	0.33	1.00	1.00	1.00	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
Tiempo de entrega	0.33	1.00	1.00	1.00	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
Suma o ponderación	2.00	6.00	6.00	6.00					

Se puede observar que el criterio con mayor peso es costo 0.5000, seguidamente de tamaño, tiempo de respuesta y tiempo de entrega con 0.1667.

Para asegurar la consistencia y validez del proceso, se calcula la RC (razón de consistencia) a partir del IC (índice de consistencia), a su vez involucra el valor λ_{max} . Para esto será necesario utilizar las siguientes formulas:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{y} \quad RC = \frac{IC}{IA}$$

Donde:

n = número de criterios de decisión de la matriz, e

IA = índice aleatorio, estimado del promedio del IC de 500 matrices recíprocas generadas de manera aleatoria son las que se observan en la tabla 19.

Tabla 19: Índices aleatorios de consistencia.

n	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Fuente: [11].

Si el resultado de la razón de consistencia es menor o igual a 0.1 (véase tabla 20), el nivel de inconsistencia es aceptable, con un resultado contrario se recomendaría que el evaluador revise sus estimaciones nuevamente.

Tabla 20: Criterio de aceptación.

Rango de criterio	Condición de valoración
$RC \leq 0.1$	Aceptable, se asegura un error mínimo del 1%
$RC > 0.1$	Es necesario replantear la valoración

Los datos obtenidos son los que se muestran en la siguiente tabla

Tabla 21: Resultados de la razón de consistencia.

Lambda Máx.	Índice aleatorio IA, n=4	Índice de consistencia IC	Relación de consistencia	Condición de valoración
4.0006	0.90	0.0002	0.000222222	Aceptable

Las comparaciones entre alternativas de selección respecto a cada criterio se indican en las tablas A 2, A 4, A 6 y A 8, la ponderación final de una alternativa es la suma de sus productos, en seguida se obtiene una matriz normalizada (la cual se obtiene a partir del valor asignado a cada alternativa entre la suma de final de la alternativa) que nos servirá para obtener el vector promedio de ese criterio (ver tabla A 3, A 5, A 7 y A 9).

La siguiente tabla reúne la información de las comparaciones de cada alternativa respecto a cada criterio evaluado, para obtener el total se necesitarán los valores obtenidos de la tabla 18 colocados en la columna de ponderación, multiplicados y sumados por la ponderación de cada alternativa (ver tablas A3, A5, A7 y A9).

Tabla 22: Cuadro resumen de cada alternativa respecto a cada criterio (reúne los valores del vector promedio para cada criterio y de la matriz comparación por pares criterios).

	Costo	Tamaño	Tiempo de respuesta	Tiempo de entrega	Total
A1	0.1687	0.0500	0.0330	0.0387	0.10465
A2	0.1053	0.0500	0.0330	0.0387	0.072926
A3	0.0918	0.0500	0.0330	0.0387	0.066204
A4	0.0146	0.1500	0.0330	0.0387	0.044233
A5	0.0918	0.0500	0.1799	0.2101	0.119245
A6	0.0864	0.1500	0.2234	0.2101	0.140427
A7	0.0317	0.0500	0.1799	0.0387	0.060631
A8	0.0491	0.1500	0.1799	0.1311	0.101406
A9	0.3288	0.1500	0.0717	0.2101	0.236347
A10	0.0317	0.1500	0.0330	0.0453	0.053931
Ponderación	0.5000	0.1667	0.1667	0.1667	

Observando los resultados se mencionan las alternativas con sus respectivos porcentajes iniciando con las de mayor puntuación: **A9** de la marca IFM con un **23.6347%**, seguida de **A6** con un **14.0427%**, posteriormente **A5** con un **11.9245%** estas dos de la marca FESTO, **A1** con un **10.465%**, luego **A8** con un **10.1406%** marca Newark, continuamos con **A2** con un **7.2926%**, más a delante **A3** con **6.6204%** de la marca Pepperl+Fuchs, luego **A7** con un **6.0631%** marca Newark, seguida **A10** con un **5.3931%** de la marca Mouser Electrónica y por ultimo **A4** con un **4.4223%** marca Pepperl+Fuchs, por lo tanto la alternativa **A9** debe ser elegida bajo este método y criterios de evaluación.

3.5.2 SELECCIÓN DE ACTUADORES DISPONIBLES

Con la información obtenida para los actuadores (véase los anexos B) se estará realizando el AHP para seleccionar el actuador que mejor convenga, se debe tomar en cuenta que son distintos tipos de actuadores para cada eje, lo que conlleva a realizar AHP por cada eje.

Se elabora el AHP, el cual contiene el objetivo, seleccionar un actuador óptimo para el eje X, Y y Z (nivel 0), posteriormente en el nivel 1 se encontrarán los criterios y por último en el nivel 2 las alternativas. Se realiza cada una de las etapas para la selección de los actuadores adecuados.

Primer y segunda etapa: Definir el objetivo y establecer los criterios. Se estructura la jerarquía, la cual se compone de: objetivo, criterios y alternativas.

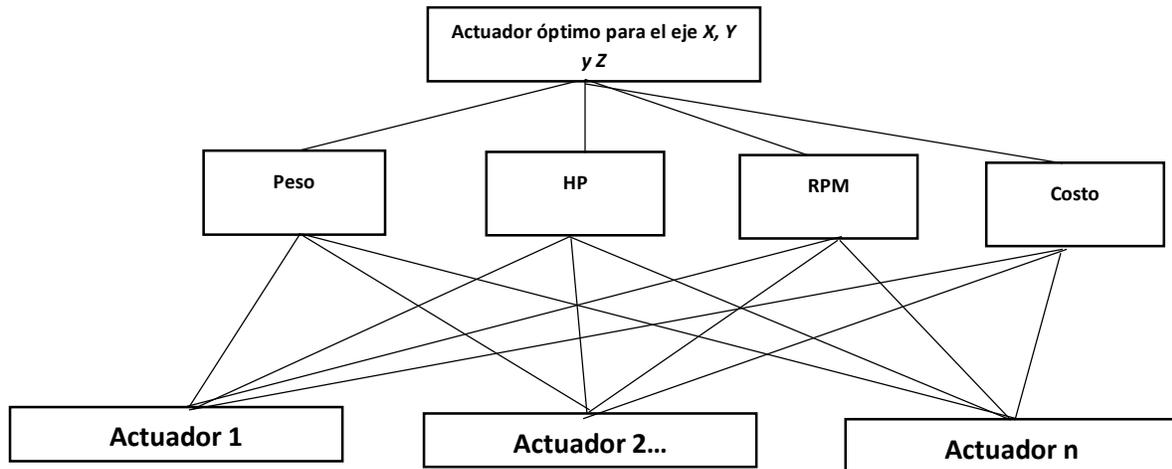


Figura 42: Jerarquía para seleccionar un actuador.

Esta jerarquía comprende los diferentes tipos de actuadores, el Anexo B contiene la información proporcionada por el proveedor para cada motor respecto a cada eje, según reducciones realizadas en la tabla 15, para este dispositivo se consideraron criterios como:

- **Peso:** Si el peso se modifica, afectará a la estructura, puesto que en un análisis preliminar se realizaron cálculos para poder aproximar el peso de los actuadores sin afectar la estructura, es por eso que se buscaron actuadores que tuvieran un peso similar o menor al propuesto en [7].
- **HP:** Es necesario conocer, puesto que si se realiza una carga mayor a la que soporta el actuador podría ocasionar desperfectos al mismo.
- **RPM:** A pesar de que no tiene tanto peso en la selección, podría tomarse en cuenta, para aumentar la potencia, ya que si se aumentan las RPM se podría lograr un mayor HP.

Tercera etapa

Se realizan las comparaciones entre los distintos criterios de decisión, tomando como base el objetivo final. Se asignan valores de acuerdo a la importancia dada por el evaluador considerando la escala de pesos de Saaty (véase Tabla 2).

Las Tablas 23, 24 y 25 muestra la comparación de los cuatro criterios (unos contra otros y contra sí mismos) considerados en la selección de actuadores para el eje X, Y y Z. Realizándose la pregunta ¿El criterio (X), es más o menos importante que el criterio (Y), al elegir el actuador para cumplir con el objetivo? Si el criterio (X), se compara con el criterio (Y) con un criterio esencial, se le asignará un valor de 5, por lo que al comparar (Y) contra (X) la comparación será el recíproco, es decir, 1/5; si el factor (X) es comparado consigo mismo, el valor será 1.

Posteriormente se normaliza la matriz, para ello se toma el valor asignado de cada criterio y se divide entre la suma total de ese criterio así hasta culminar con todos los criterios, seguidamente se obtiene el promedio para cada criterio lo que nos conducirá a la obtención del vector promedio.

Tabla 23: Matriz comparaciones por pares Criterios del eje X.

Matriz comparación por pares-Criterios									
	Peso	RPM	HP	Costo	Matriz normalizada				Vector promedio
Peso	1.00	5.00	5.00	1.00	0.42	0.50	0.50	0.38	0.45
RPM	0.20	1.00	1.00	0.33	0.08	0.10	0.10	0.13	0.10
HP	0.20	1.00	1.00	0.33	0.08	0.10	0.10	0.13	0.10
Costo	1.00	3.00	3.00	1.00	0.42	0.30	0.30	0.38	0.35
Suma o ponderación	2.40	10.00	10.00	2.67					1.00

Se puede observar que el criterio con mayor valoración es Peso con 0.45, seguidamente de Costo con 0.35 y finalmente RPM y HP con 0.10.

Tabla 24: Matriz comparaciones por pares Criterios del eje Y.

Matriz comparación por pares-Criterios									
	Peso	RPM	HP	Costo	Matriz normalizada				Vector promedio
Peso	1.00	3.00	3.00	1.00	0.38	0.30	0.30	0.42	0.35
RPM	0.33	1.00	1.00	0.20	0.13	0.10	0.10	0.08	0.10
HP	0.33	1.00	1.00	0.20	0.13	0.10	0.10	0.08	0.10
Costo	1.00	5.00	5.00	1.00	0.38	0.50	0.50	0.42	0.45
Suma o ponderación	2.67	10.00	10.00	2.40					1.00

Se puede observar que el criterio con mayor valoración es Costo con 0.45, seguidamente de Peso con 0.35 y finalmente RPM y HP con 0.10.

Tabla 25: Matriz comparaciones por pares Criterios del eje Z.

Matriz comparación por pares-Criterios									
	Peso	RPM	HP	Costo	Matriz normalizada				Vector promedio
Peso	1.00	3.00	3.00	1.00	0.38	0.30	0.30	0.42	0.35
RPM	0.33	1.00	1.00	0.20	0.13	0.10	0.10	0.08	0.10
HP	0.33	1.00	1.00	0.20	0.13	0.10	0.10	0.08	0.10
Costo	1.00	5.00	5.00	1.00	0.38	0.50	0.50	0.42	0.45
Suma o ponderación	2.67	10.00	10.00	2.40					1.00

La tabla anterior nos proporciona los pesos para cada criterio, donde el Costo tiene mayor valoración con 0.45, seguida de Peso con 0.35 y finalmente RPM y HP con 0.10

Para asegurar la consistencia y validez del proceso, se calcula la RC (razón de consistencia) a partir del IC (índice de consistencia) para cada eje, a su vez involucra el valor λ_{max} . Para esto será necesario utilizar las siguientes formulas:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{y} \quad RC = \frac{IC}{IA}$$

Donde:

n = número de criterios de decisión de la matriz, e

IA = índice aleatorio, estimado del promedio del IC de 500 matrices recíprocas generadas de manera aleatoria son las que se observan en la tabla 19.

Si el resultado de la razón de consistencia es menor o igual a 0.1 (véase tabla 20), el nivel de inconsistencia es aceptable, con un resultado contrario se recomendaría que el evaluador revise sus estimaciones nuevamente y solucionar la consistencia.

Los datos obtenidos son los que se muestran en la tabla

Tabla 26: Resultados de la razón de consistencia para cada eje.

Eje	Lambda Máx.	Índice aleatorio IA, n=4	Índice de consistencia IC	Relación de consistencia	Condición de valoración
X	4.04	0.90	0.0133	0.0147	Aceptable
Y	4.04	0.90	0.0133	0.0147	Aceptable
Z		0.90	0.0133	0.0147	Aceptable

Las comparaciones entre alternativas de selección respecto a cada criterio se indican en el Anexo B 1, B 2, B 3 y B 4 para el eje X, B 5, B 6, B 7 y B 8 para el eje Y y B 9, B 10, B 11 y B 12 para el eje Z mismas que contienen el vector promedio de cada alternativa.

La siguiente tabla reúne la información de las tablas de comparación de cada alternativa, para obtener el total se necesitarán los valores obtenidos de la tabla 23 colocados en la columna de ponderación, multiplicados y sumados por la ponderación de cada alternativa.

Tabla 27: Cuadro resumen de cada alternativa respecto a los criterio (reúne los valores del vector promedio para cada criterio y de la matriz comparación por pares criterios) del eje X.

	Peso	RPM	HP	Costo	Total
B1	0.25	0.25	0.25	0.88	0.47
B2	0.75	0.75	0.75	0.13	0.53
Ponderación	0.45	0.10	0.10	0.35	

Se puede observar que la diferencia de porcentajes entre alternativas es muy pequeña, iniciando con la de mayor peso: **B2** con un **53%** de la marca Indramat con mayor valoración en Peso, RPM y HP, pero con menor peso en Costo, por lo que se recomienda que los involucrados en la distribución monetaria dentro de la Universidad deberán considerar si es aceptable este motor de lo contrario se estará eligiendo la opción **B1** de la marca WEG con un **47%** que tiene relación estrecha con el motor propuesto en [7] y no afectaría el diseño de la estructura.

Tabla 28: Cuadro resumen de cada alternativa respecto a los criterio (reúne los valores del vector promedio para cada criterio y de la matriz comparación por pares criterios) del eje Y.

	Peso	RPM	HP	Costo	Total
B3	0.20	0.20	0.20	0.08	0.15
B4	0.20	0.20	0.20	0.44	0.30
B5	0.60	0.60	0.60	0.49	0.55
Ponderación	0.35	0.10	0.10	0.45	

Se puede observar en la tabla las alternativas con sus respectivos pesos, se menciona la alternativa con mayor puntuación considerando los criterios: **B5** de la marca Marathon con un **55%**, posteriormente **B4** con un **30%** y finalmente **B3** con un **15 %** ambos de la marca Bodine Electric Company, por lo tanto, se debe elegir la alternativa **B5** según el método AHP y los criterios de evaluación considerados.

Tabla 29: Cuadro resumen de cada alternativa respecto a los criterio (reúne los valores del vector promedio para cada criterio y de la matriz comparación por pares criterios) del eje Z.

	Peso	RPM	HP	Costo	Total
B6	0.13	0.09	0.63	0.32	0.26
B7	0.38	0.09	0.13	0.32	0.30
B8	0.38	0.59	0.13	0.32	0.35
B9	0.13	0.22	0.13	0.05	0.10
Ponderación	0.35	0.10	0.10	0.45	

Se observa en la tabla las alternativas con sus respectivos porcentajes, siendo el primero con mayor puntuación **B8** de la marca Walfront con un **35%**, seguida de **B7** de la marca Greartisan con un **30%**, posteriormente **B6** de la marca Uxcell con un **26 %** y por ultimo **B9** de la marca Pololu con un **10%**. Por lo tanto, se recomienda elegir la alternativa **B8** según la metodología utilizada.

3.5.3 SELECCIÓN DE CONTROLADOR

Una vez que se tiene la información de los controladores (véase los anexos C) y se ha comprendido su funcionamiento dentro del sistema (véase Figura 4). Se procede a la elaboración del AHP, donde se realizarán las comparaciones entre alternativas con el único fin de hallar el controlador más adecuado, el cual será el que tenga la mejor ponderación,

para ello se estará empleando información del anexo C, el cual contiene todos los criterios a evaluar para este componente.

Se procede a realizar cada una de las etapas para la selección de los actuadores.

Primer y segunda etapa: Definir el objetivo y establecer los criterios. Se establece la jerarquía, la cual se compone de: objetivo, criterios y alternativas.

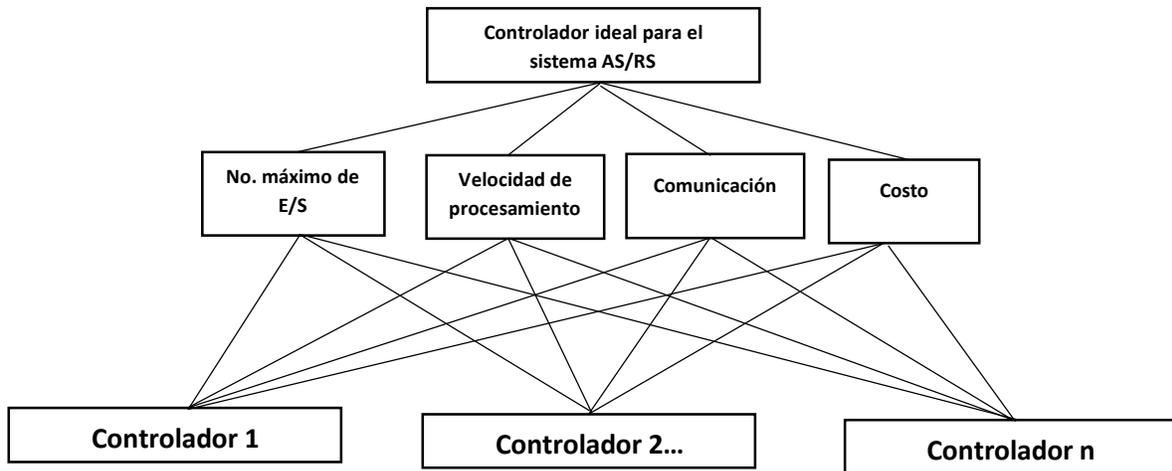


Figura 43: Jerarquía para la selección de un Controlador.

Esta jerarquía comprende los diferentes actuadores dentro del mercado considerados por sus ventajas, eliminando aquellos que no cuentan con los criterios mencionados en el nivel 1, los criterios que serán ponderados con el número de alternativas disponibles son:

- No. Máximo de E/S: Es importante puesto que permitirá el ingreso de la información de todos los dispositivos a controlar. Para este caso es necesario considerar un número mayor de E/S ya que se prevé una expansión del sistema, incorporando la maquinaria que se encuentra en el LabTAM.
- Velocidad de procesamiento en bits: Es importante considerar el tiempo de procesamiento de la información dada y el tiempo de respuesta.
- Comunicación: Permitir el intercambio de información a otros niveles de la empresa.
- Costo: De acuerdo a la información obtenida de cada dispositivo el criterio costo será eliminado puesto que ninguno cuenta con sus respectivos precios para realizar una comparación usando el AHP y no se consideraron criterios

como Tiempo de respuesta y Tiempo de entrega puesto que no se recibió una respuesta por parte de los proveedores.

Tercera etapa

Se realizan las comparaciones entre los distintos criterios de decisión, tomando como base el objetivo principal, asignando valores de acuerdo a la importancia dada por el evaluador considerando la escala de pesos de Saaty (véase Tabla 2).

La Tabla 30 y 31 muestra la comparación de los criterios (unos contra otros y contra sí mismos) a considerar para realizar la selección del controlador. Para realizar la comparación deberá realizarse la pregunta ¿El criterio (X), es más o menos importante que el criterio (Y), al elegir el controlador para cumplir con el objetivo? Si el criterio (X), se compara con el criterio (Y) con un criterio esencial, se le asignará un valor de 3, por lo que al comparar (Y) contra (X) la comparación será el recíproco, es decir, 1/3; si el factor (X) es comparado consigo mismo, el valor será 1.

Posteriormente se normaliza la matriz, para ello se toma el valor asignado de cada criterio y se divide entre la suma total de ese criterio así hasta culminar con todos los criterios, seguidamente se obtiene el promedio para cada criterio lo que nos conducirá a la obtención del vector promedio.

Tabla 30: Matriz comparación por pares Criterios de PLC.

Matriz comparación por pares-Criterios							
	No. Máx. de E/S	Velocidad de procesamiento en bits	Comunicación	Matriz normalizada			Vector promedio
No. Máx. de E/S	1.00	0.20	0.33	0.11	0.13	0.08	0.11
Velocidad de procesamiento en bits	5.00	1.00	3.00	0.56	0.65	0.69	0.63
Comunicación	3.00	0.33	1.00	0.33	0.22	0.23	0.26
Suma o ponderación	9.00	1.53	4.33				1.00

Se puede observar que el criterio con mayor puntuación es Velocidad de procesamiento con 0.63, seguidamente de comunicación con un 0.26 y por último el No. Máximo de E/S con un 0.11.

Tabla 31: Matriz comparación por pares Criterios de CNC.

Matriz comparación por pares-Criterios							
	No. de ejes máximo	Velocidad de operación	Comunicación	Matriz normalizada			Vector promedio
No. de ejes máximo	1.00	5.00	3.00	0.65	0.71	0.60	0.66
Velocidad de operación	0.20	1.00	1.00	0.13	0.14	0.20	0.16
Comunicación	0.33	1.00	1.00	0.22	0.14	0.20	0.19
Suma o ponderación	1.53	7.00	5.00				1.00

Se observa que el criterio con mayor valoración es No. de ejes máximo con 0.66, seguido de Comunicación con un 0.19 y finalmente Velocidad de operación con un 0.16.

Para asegurar la consistencia y validez del proceso, se calcula la RC (razón de consistencia) a partir del IC (índice de consistencia), a su vez involucra el valor λ_{max} . Para esto será necesario utilizar las siguientes formulas:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{y} \quad RC = \frac{IC}{IA}$$

Donde:

n = número de criterios de decisión de la matriz, e

IA = índice aleatorio, estimado del promedio del IC de 500 matrices recíprocas generadas de manera aleatoria son las que se observan en la tabla 19.

Si el resultado de la razón de consistencia es menor o igual a 0.1 (véase tabla 20), el nivel de inconsistencia es aceptable, con un resultado contrario se recomendaría que el evaluador revise sus estimaciones nuevamente y solucionar la consistencia. Los datos obtenidos son los que se muestran en la tabla 32.

Tabla 32: Resultados de la razón de consistencia para cada controlador.

Tipo de controlador	Lambda Máx.	Índice aleatorio IA, n=3	Índice de consistencia IC	Relación de consistencia	Condición de valoración
PLC	3.0553	0.58	0.02765	0.0476	Aceptable
CNC	3.0431	0.58	0.02155	0.0371	Aceptable

Las comparaciones entre alternativas de selección respecto a cada criterio se indican en las tablas C 1, C 2 y C 3 para un PLC y C 4, C 5 y C 6 para un CNC, la ponderación final de una alternativa es la suma de sus productos, en seguida se obtiene una matriz normalizada (la cual se obtiene a partir del valor asignado a cada alternativa entre la suma de final de la alternativa).

La siguiente tabla reúne la información de las tablas de comparación de cada alternativa respecto a cada criterio evaluado, para obtener el total se necesitarán los valores obtenidos de la tabla 30 y 31 colocados en la columna de ponderación, multiplicados y sumados por la ponderación de cada alternativa (ver tablas C 1, C 2 y C 3 para un PLC y C 4, C 5 y C 6 para un CNC).

Tabla 33: Cuadro resumen de cada alternativa respecto a cada criterio (reúne los valores del vector promedio para cada criterio y de la matriz comparación por pares criterios) de un PLC.

	No. Máx. de E/S	Velocidad de procesamiento en bits	Comunicación	Total
C1	0.06	0.06	0.08	0.06622
C2	0.06	0.06	0.08	0.06622
C3	0.06	0.06	0.08	0.06622
C4	0.33	0.32	0.25	0.30472
C5	0.15	0.14	0.25	0.17078
C6	0.33	0.36	0.25	0.32583
Ponderación	0.11	0.63	0.26	

En la tabla de PLC se puede observar las alternativas con su respectivo peso iniciando con las de mayor valoración: **C6** de la marca Allen Bradley con un **32.58%**, seguida de **C4** de la marca FESTO con un **30.47%**, posteriormente **C5** de la marca OMRON con un **17.07%**,

finalmente **C1, C2 y C3** de la marca Siemens con un **6.62%**, por lo tanto, la alternativa **C6** debe ser elegida bajo este método y criterios de evaluación en caso de preferir un PLC.

Tabla 34: Cuadro resumen de cada alternativa respecto a cada criterio (reúne los valores del vector promedio para cada criterio y de la matriz comparación por pares criterios) de un CNC.

	No. Máx. de E/S	Velocidad de procesamiento en bits	Comunicación	Total
C7	0.07	0.09	0.06	0.07075033
C8	0.25	0.09	0.31	0.23786534
C9	0.07	0.59	0.31	0.19631968
C10	0.61	0.22	0.31	0.49506465
Ponderación	0.66	0.16	0.19	

Se observa que la alternativa con mayor valoración es **C10** de la marca Siemens con un **49.50%**, le sigue **C8** de la marca Fanuc con un **23.78%**, posteriormente **C9** de la marca Fagor con un **19.63%** y finalmente **C7** de la marca Mitsubishi con un **7.07%**. Por lo tanto, debe elegirse la alternativa **C10** en caso de elegir un CNC según el método AHP.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

Para finalizar con el trabajo de investigación, el capítulo 4 hace mención de los resultados obtenidos durante la elaboración de la tesis, así como también señala el trabajo a futuro para el mismo.

4.1 CONCLUSIONES

Un sistema AS/RS es un método controlado por computadora para almacenar y recuperar materiales y herramientas, en ellos predomina la rapidez de su manipulación y aprovechamiento del espacio aéreo, puede recibir y entregar materiales sin la intervención humana. Para poder obtener todos los beneficios que otorga un sistema AS/RS es necesario el uso de tecnología dentro de estos, como son sensores, actuadores y controlador.

El objetivo de esta tesis fue seleccionar un controlador, sensores y actuadores para la estructura física del sistema AS/RS propuesto para la UTM mediante el uso de la metodología AHP, contemplando los requerimientos didácticos de las materias del área de automatización.

La metodología empleada fue seleccionada por su simplicidad, flexibilidad, la cual facilita el entendimiento de la situación de los problemas. Esto permite llevar a cabo un proceso ordenado y gráfico de las etapas requeridas en la toma de decisiones, además se conoce que ha sido empleada en cientos de aplicaciones en las cuales se han obtenido importantes resultados.

El objetivo buscado con la implementación del AS/RS dentro de la UTM, es en primera instancia fortalecer los conocimientos adquiridos en el aula, ya que actualmente la formación de capital humano capaz de manejar este tipo de sistemas es muy escasa debido a la complejidad de acceso al sistema. Muchas instituciones han integrado nuevas estrategias de enseñanza, implementando un nuevo concepto conocido como fábricas de aprendizaje, el cual enfatiza la experiencia práctica adquirida al aplicar el conocimiento aprendido en la educación de ingeniería para resolver problemas reales en la industria.

Los dispositivos que fueron propuestos cumplen con propiedades tales que no afectan el diseño de la estructura original del sistema. Esta selección permitió conocer diversos

dispositivos a nivel industrial, así como también características y funcionamiento de cada uno de ellos.

Los logros de este trabajo son:

- ❖ La obtención de los criterios para la selección de sensores:
 - Tamaño: se consideró M8 y M12 (rosca métrica) ya que son tamaños que no afectarán al funcionamiento del sistema, además son de fácil manipulación.
 - Tiempo de respuesta
 - Tiempo de entrega
 - Costo

Lo que arrojó como resultado, bajo el método AHP y criterios de evaluación, que la alternativa **A9** de la marca IFM es la adecuada.

- ❖ Los criterios obtenidos para la selección de actuadores según su eje son:
 - Peso: se consideraron actuadores con pesos menores a 9.98 para el eje X, 6.8 para el eje Y y 0.3 para el eje Z del sistema AS/RS.
 - Potencia (Hp)
 - RPM
 - Costo

Concluyendo así que las alternativas para los distintos actuadores son la alternativa **B2** de la marca Indramat para el eje X, alternativa **B5** de la marca Marathon para el eje Y y alternativa **B8** de la marca Walfront para el eje Z.

- ❖ Los criterios para la selección del controlador son:
 - Número máximo de E/S
 - Velocidad de procesamiento
 - Tipos de comunicación

De la comparación realizada para controladores, se obtiene que la mejor opción de acuerdo los valores obtenidos es un controlador CNC, alternativa **C10** de la marca Siemens con un **49.50%**, seguida de un PLC alternativa **C6** de la marca Allen Bradley con un **32.58%**.

4.2 TRABAJO A FUTURO

Este proyecto es continuación de un tema muy amplio y multidisciplinario, pues una vez que se obtienen los resultados y los posibles dispositivos para el sistema, se pretende contribuir al desarrollo del mismo dentro de la UTM, para esto se recomienda dar continuidad a las fases listadas a continuación, lo cual permitirá incluir aportaciones de ingenieros de otras áreas.

- Manufactura de la estructura física, deberá ser realizado por un ingeniero industrial o en mecatrónica.
- Componentes de seguridad, el cual lo deberá realizar un ingeniero en computación o en electrónica para asegurar que la información sea transmitida de forma adecuada y no pueda ser manipulada por alguien externo a la empresa.
- Programación, podrá ser realizado por un ingeniero industrial o mecatrónico.
- Instalación de los motores seleccionados para posibilitar el funcionamiento del sistema, puede ser realizado por un ingeniero mecatrónico.

Resulta relevante la inclusión del método AHP dentro de los temarios para las diferentes carreras impartidas dentro de la UTM, pues es una herramienta que no se centra solo a un área específica si no que puede ser usada en diversas aplicaciones.

CAPÍTULO 5: BIBLIOGRAFÍA

- [1] Groover, “Automation, production-systems-and-cim,” in *Automated Storage Systems*, 2008, p. 321.
- [2] SIMEF, “Ingeniería industrial y automatización para el éxito de su empresa,” 2016. <http://simef-automation.com.mx/admin/blog/2016/01/21/ingenieria-industrial-y-automatizacion-para-el-exito-de-su-empresa/> (accessed Oct. 29, 2019).
- [3] C. D. E. Jesus and T. Sotomayor, “Ventajas de los sistemas de almacenamiento automatizados,” 2019.
- [4] R. M. S. Ascención, “Equipamiento para almacenes de primer nivel,” *Lógica*, México, 2018.
- [5] Groover, *Automatization, Production Systems and CIM*. 2015.
- [6] Escuela Europea de Management, “¿Cómo analizar los factores tecnológicos de una empresa?,” 2016. Accessed: Feb. 05, 2020. [Online]. Available: <http://www.escuelamanagement.eu/innovacion-estrategica/como-analizar-los-factores-tecnologicos-de-una-empresa>.
- [7] K. López, “Diseño de la estructura física de un AS / RS para fines didácticos ,” Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2015.
- [8] O. Gómez *et al.*, “El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación,” *Sci. Tech.*, vol. 14, no. 39, pp. 247–252, 2008.
- [9] C. A. Yajure, “Comparison of multicriteria methods AHP and Fuzzy AHP in selecting the best technology for the production of electricity from coal,” *Sci. Tech. Año XX*, vol. 20, no. 3, pp. 255–260, 2015.
- [10] T. Al-Hawari, S. Al-Bo’ol, and A. Momani, “Selection of temperature measuring sensors using the analytic hierarchy process,” *Jordan J. Mech. Ind. Eng.*, vol. 5, no. 5, pp. 451–459, 2011.
- [11] S. E. Melchor González, M. Manzano Herrera, J. A. Carazo Luna, C. Vázquez Cid de León, and S. Montesinos González, “Aplicación de AHP en la selección de sensores para la instrumentación de un fotobiorreactor,” *Rev. la Ing. Ind.*, vol. 11, no. 1, pp. 29–36, 2017, [Online]. Available: <https://drive.google.com/drive/folders/0B4GS5FQQLif9ZkJqbzQ1cmJCRW8>.
- [12] M. M. D. Widianta, T. Rizaldi, D. P. S. Setyohadi, and H. Y. Riskiawan, “Comparison of Multi-Criteria Decision Support Methods (AHP, TOPSIS, SAW & PROMENTHEE) for Employee Placement,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 953, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/953/1/012116.
- [13] M. Manzano Herrera, “Aplicación de las redes inalámbricas de sensores en el sector agroalimentario,” *La Alta Tecnol.*, vol. 3, pp. 1–10, 2013.
- [14] F. Llamazares and Redondo, *Influencia de la Política de Incentivos Regionales en el Desarrollo local de los municipios mineros de Castilla y León*. Madrid, 2010.

- [15] S. A. Berumen, “La utilidad de Los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente Usefulness of multiple criteria decision methods (such as AHP) in an environment with growing competitiveness,” *Cuad. Adm.*, vol. 20, no. 34, pp. 65–87, 2007.
- [16] A. Alipoor and F. Hadinejad, “Multi Criteria Decision Making for Optimal Sensor Selection,” *Management*, vol. 5, pp. 498–502, 2011.
- [17] M. Tavella, A. Miropolsky, and R. Manera, “Estudio Comparativo de Métodos Multicriterio para el análisis de la Localización Sustentable de Parques Industriales Regionales,” *Rev. la Fac. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 1, no. 1, pp. 41–48, 2014, [Online]. Available: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/6968>.
- [18] A. Sergio and L. Redondo, “Utilidad de metodos como AHP,” *Cuad. Adm.*, vol. 20, no. 34, pp. 65–84, 2007.
- [19] A. Alonso, A. Hidalgo, and M. Izquierdo, “Proceso Jerárquico AHP,” *El acceso a la Inf. Espac. y las nuevas Tecnol. geográficas*, pp. 579–596, 2006.
- [20] S. E. Melchor González, “Instrumentación de un fotobiorreactor de panel plano tipo AIRLIFT para el cultivo de microalgas,” Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2017.
- [21] C. Aristóteles, “AHP y AHP Difuso en la selección de la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral.,” *Sci. Tech.*, vol. 20, no. 3, pp. 255–260, 2015.
- [22] C. Miramira, “Sistemas de almacenamiento logísticos modernos,” *Ind. Data*, vol. 12, no. 1, pp. 37–40, 2009.
- [23] L. J. Krajewski and L. P. Ritzman, *Administración de operaciones: estrategia y análisis*, Quinta. México, 2000.
- [24] Capilla Falcón Carlos Alberto and P. Z. J. Luis, “Diseño Y Construcción De Un Prototipo De De Almacenamiento / Recuperación (As / Rs),” Universidad de las Fuerzas Armadas, 2014.
- [25] F. Acuña, E. Galarza, C. Capilla, and J. Pulloquina, “Diseño y construcción de un prototipo de Sistema Automatizado de Almacenamiento/ Recuperación (AS/RS), para Sistemas Flexibles de Manufactura en el Laboratorio CNC de la ESPE extensión Latacunga, utilizando procesamiento digital de imágenes.,” 2014.
- [26] R. Rodríguez and J. Martín, “Simulación de un sistema AS / RS,” 2010. doi: ISSN:1889-4771.
- [27] E. M. Pérez, J. M. Acevedo, C. F. Silva, and J. I. A. Quiroga, *Automatas programables y Sistemas de Automatización / PLC and Automation Systems*, Segunda. Barcelona, 2009.
- [28] J. A. S. Sánchez, *Avances en Robótica y Visión por Computador*, Primera. España, 2002.

- [29] A. S. Ruíz, *Guía Práctica de Sensores*. 2010.
- [30] H. D. Vallejo, “PLC, Los Controladores Lógicos Programables,” vol. 3, pp. 3–11, 1970.
- [31] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, Quinta. Madrid, 2010.
- [32] J. C. M. Castillo and M. P. G. García, *Automatismos Industriales*. 2014.
- [33] S. K. Saha, *Introducción a la Robótica*, Mc Graw-Hi. México, 2010.
- [34] J. R. Fernández, “Automatismos Industriales,” *Paraninfo*, 2014. .
- [35] J. Colomer, “Estudio de los Sensores para la Detección de Obstáculos Aplicables a Robots Móviles,” 2018. [Online]. Available: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/80846/6/jacobarTFM0618memoria.pdf>.
- [36] José Antonio Velasquez Costa, “Sensores en la Produccion.”
- [37] G. F. Amador, “Sensores Magnéticos e Inductivos,” Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2005.
- [38] L. G. C. Ramírez, G. S. A. Jiménez, and J. M. Carreño, *Sensores y Actuadores*, Primera. México, 2014.
- [39] Dynapar Engineering, “Encoders & Resolvers: How to Choose the Right Feedback Option,” *Dynapar, Innov. Cust. Deliv.*, pp. 1–5, 2010.
- [40] R. del S. J and S. R, “Sensores, Actuadores y Efectores,” 2011.
- [41] A. S. V. Fernández, R. F. Rodriguez, I. P. Gutiérrez, and A. A. Oliver, *Robótica educativa*. España: RA-MA, 2015.
- [42] F. Reyes Cortés, *Robótica- Control de Robots manipuladores*. México, 2011.
- [43] Compañía Levantina de Reductores, “Cómo seleccionar el mejor motor eléctrico en pequeños accionamientos,” 2017. [Online]. Available: <http://clr.es/blog/es/motor-paso-a-paso-cuando-utilizarlo/>.
- [44] M.D.Desai, *Control System Components*, Kindle. 2008.
- [45] A. Emadi, “7.1 Energy Conservation,” in *Energy-Efficient Electric Motors*, Tercera., New York, 2005, pp. 188–191.
- [46] M. Á. Pulido, *Controladores Lógicos*. Barcelona, 2007.
- [47] M. Moreno, “Controlador Lógico Programable,” *Autom. Micromecánica s.a.i.c*, vol. I, p. 84, 2002.
- [48] R. S. Monzó, *Automatismos Industriales: Conceptos y procedimientos*, Nau Libr. València, 2013.
- [49] Antonio Nuevo García, “Montaje y Mantenimiento Eléctrico-Electrónico,” 2020. .

- [50] Siemens, “SIMOTION - Control de Movimiento | Sistemas de Automatización.” .
- [51] N. Instruments, “Fundamentos de Control de Movimiento Visión General Contenido Software para Configuración , Generación de Prototipos y Desarrollo,” 2019. .
- [52] J. U. Estrella, “Software para Controlador de Movimiento basado en FPGA,” Universidad Autónoma de Querétaro, 2011.
- [53] Cordero, “Sdi>News Control y Automation,” 2019. https://control.sdindustrial.com.mx/news_abril16_notas.html (accessed Feb. 06, 2020).
- [54] G. Gutierrez, A. de la M. Gálvez, E. G. Morales, and R. C. Rodríguez, *Automatización*. 2011.
- [55] R. S. Llopis, J. A. R. Pérez, and C. V. A. Latorre, *Automatización industrial*, Primera. 2010.
- [56] V. Guerrero, R. L. Yuste, and L. Martínez, *Comunicaciones Industriales*, ALFAOMEGA. .
- [57] “Universidad tecnológica equinoccial,” 2016.
- [58] E. Ip, “EtherNet / IP.”
- [59] M. I. U. S. a, “Introduction To Modbus Tcp / Ip,” *Instrumentation*, vol. 44, no. 248, 2005.
- [60] L. Miguel and C. Filiiu, *Automatismos industriales*, 1°. España: Paraninfo, 2014.
- [61] F. P. BEER, *Mecánica de materiales*, Quinta. México, 2009.
- [62] “Pérdidas de energía en el sistema de accionamiento eléctrico.” <https://www.eeeguide.com/energy-losses-in-electrical-drive-system/> (accessed Jul. 23, 2020).
- [63] E. Abele *et al.*, “Learning factories for research, education, and training,” *Procedia CIRP*, vol. 32, no. Clf, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.02.187.

ANEXOS

ANEXO A: MATRICES DE SELECCIÓN DE SENSORES

Tipo de sensor	Marca	Modelo	Forma	Tamaño, Ø	Conexión	Voltaje	Costo Total \$	Carreas beneficiadas	Materias	# sub-temas	Nombre proveedor
INDUCTIVO	PEPPERL+ FUCHS	NBB1.5-8GM40-E2-V1	Circular	M8	M12	10-30 VDC	2113.58	4	6	26	Pepperl+Fuchs México, S.A. de C.V.
		NBN2.5-8GM50-E0	Circular	M8	M12	5-30 VDC	2316.6				
		NMB1.5-8GM65-E2-FE-V1	Circular	M8	M12	10-30 VDC	2442.96				
		NJ2-F-E02-1.025-V1	Circular	M12	M12	10-30 VDC	7037.41				
	FESTO	SIES-8M-PO-24V-K-0.3-M8D	Circular	M8	M8	10-30 VDC	2380.84				FESTO
		SIEF-M12B-NS-S-L	Circular	M12	M12	10-30 VDC	2519.75				
	OMRON	E2AS08KS02M5B1	Circular	M8	M8	12-24 VDC	3234.61				NEWARK
		E2A-M12KS04-WP-B1-2M	Circular	M12	M12	12-24 VDC	2880.38				
	IFM	IFS286	Circular	M12	M12	10-30 VDC	1324.61				IFM
	Capacitivo	PEPPERL+ FUCHS	CBB4-12GH60-E2-V1	Circular	M12	M12	10-36 VDC				3327.48

Fuente: Elaboración propia.

Anexo A 1: Datos de sensores considerados y proveedores necesarios para realizar el AHP.

Tipo de sensor	Marca	Modelo	Tamaño, Ø	Costo Total \$	Datos de proveedor				
					Nombre	Ubicación	Fecha de envío	Tiempo de respuesta	Tiempo de entrega
INDUCTIVO	PEPPERL+ FUCHS	NBB1.5-8GM40-E2-V1	M8	2113.58	Pepperl+Fuchs México, S.A. de C.V.	México	08/02/2020		
		NBN2.5-8GM50-E0	M8	2316.6					
		NMB1.5-8GM65-E2-FE-V1	M8	2442.96					
		NJ2-F-E02-1.025-V1	M12	7037.41					
	FESTO	SIES-8M-PO-24V-K-0.3-M8D	M8	2380.84	Festo	Querétaro		11/02/2020	2-3 Días
		SIEF-M12B-NS-S-L	M12	2519.75					
	OMRON	E2AS08KS02M5B1	M8	3234.61	Newark	Guadalajara		11/02/2020	50 Días
		E2A-M12KS04-WP-B1-2M	M12	2880.38					15 Días
	IFM	IFS286	M12	1324.61	IFM	Monterrey		19/02/2020	5 Días
	Capacitivo	PEPPERL+ FUCHS	CBB4-12GH60-E2-V1	M12	3327.48	Mouser Electronics		Guadalajara	

Fuente: Elaboración propia.

Anexo A 2: Comparación entre alternativas respecto al criterio Costo.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	1.00	3.00	3.00	7.00	3.00	3.00	5.00	5.00	0.20	5.00
A2	0.33	1.00	1.00	7.00	1.00	3.00	5.00	3.00	0.20	5.00
A3	0.33	1.00	1.00	7.00	1.00	1.00	5.00	3.00	0.20	5.00
A4	0.14	0.14	0.14	1.00	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
A5	0.33	1.00	1.00	7.00	1.00	1.00	5.00	3.00	0.20	5.00
A6	0.33	0.33	1.00	7.00	1.00	1.00	5.00	3.00	0.20	5.00
A7	0.20	0.20	0.20	7.00	0.20	0.20	1.00	0.33	0.14	1.00
A8	0.20	0.33	0.33	7.00	0.33	0.33	3.00	1.00	0.14	3.00
A9	5.00	5.00	5.00	7.00	5.00	5.00	7.00	7.00	1.00	7.00
A10	0.20	0.20	0.20	7.00	0.20	0.20	1.00	0.33	0.14	1.00
Suma o ponderación	8.08	12.21	12.88	64.00	12.88	14.88	37.14	25.81	2.57	37.14

Fuente: Elaboración propia.

Anexo A 3: Matriz normalizada y vector promedio del criterio costo.

Matriz normalizada										Vector promedio
0.1238	0.2457	0.2330	0.1094	0.2330	0.2017	0.1346	0.1937	0.0778	0.1346	0.1687
0.0413	0.0819	0.0777	0.1094	0.0777	0.2017	0.1346	0.1162	0.0778	0.1346	0.1053
0.0413	0.0819	0.0777	0.1094	0.0777	0.0672	0.1346	0.1162	0.0778	0.1346	0.0918
0.0177	0.0117	0.0111	0.0156	0.0111	0.0096	0.0038	0.0055	0.0556	0.0038	0.0146
0.0413	0.0819	0.0777	0.1094	0.0777	0.0672	0.1346	0.1162	0.0778	0.1346	0.0918
0.0413	0.0273	0.0777	0.1094	0.0777	0.0672	0.1346	0.1162	0.0778	0.1346	0.0864
0.0248	0.0164	0.0155	0.1094	0.0155	0.0134	0.0269	0.0129	0.0556	0.0269	0.0317
0.0248	0.0273	0.0259	0.1094	0.0259	0.0224	0.0808	0.0387	0.0556	0.0808	0.0491
0.6191	0.4095	0.3883	0.1094	0.3883	0.3361	0.1885	0.2712	0.3889	0.1885	0.3288
0.0248	0.0164	0.0155	0.1094	0.0155	0.0134	0.0269	0.0129	0.0556	0.0269	0.0317

Fuente: Elaboración propia.

Anexo A 4: Comparación entre alternativas respecto al criterio Tamaño.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	1.00	1.00	1.00	0.33	1.00	0.33	1.00	0.33	0.33	0.33
A2	1.00	1.00	1.00	0.33	1.00	0.33	1.00	0.33	0.33	0.33
A3	1.00	1.00	1.00	0.33	1.00	0.33	1.00	0.33	0.33	0.33
A4	3.00	3.00	3.00	1.00	3.00	1.00	3.00	1.00	1.00	1.00
A5	1.00	1.00	1.00	0.33	1.00	0.33	1.00	0.33	0.33	0.33
A6	3.00	3.00	3.00	1.00	3.00	1.00	3.00	1.00	1.00	1.00
A7	1.00	1.00	1.00	0.33	1.00	0.33	1.00	0.33	0.33	0.33
A8	3.00	3.00	3.00	1.00	3.00	1.00	3.00	1.00	1.00	1.00
A9	3.00	3.00	3.00	1.00	3.00	1.00	3.00	1.00	1.00	1.00
A10	3.00	3.00	3.00	1.00	3.00	1.00	3.00	1.00	1.00	1.00
Suma o ponderación	20.00	20.00	20.00	6.67	20.00	6.67	20.00	6.67	6.67	6.67

Fuente: Elaboración propia.

Anexo A 5: Matriz normalizada y vector promedio del criterio Tamaño.

Matriz normalizada										Vector promedio
0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500

Fuente: Elaboración propia.

Anexo A 6: Comparación entre alternativas respecto al criterio Tiempo de respuesta.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	Pesos	
A1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.33	1.00	5	<=5 días
A2	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.33	1.00	3	>5 días<=15 días
A3	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.33	1.00	1	Misma importancia
A4	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.33	1.00		No contestaron
A5	5.00	5.00	5.00	5.00	1.00	1.00	1.00	1.00	5.00	5.00		
A6	5.00	5.00	5.00	5.00	1.00	1.00	1.00	5.00	5.00	5.00		
A7	5.00	5.00	5.00	5.00	1.00	1.00	1.00	1.00	5.00	5.00		
A8	5.00	5.00	5.00	5.00	1.00	1.00	1.00	1.00	5.00	5.00		
A9	3.00	3.00	3.00	3.00	0.20	0.20	0.20	0.20	1.00	3.00		
A10	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.33	1.00		
Suma o ponderación	28.00	28.00	28.00	28.00	5.20	5.20	5.20	9.20	22.67	28.00		

Fuente: Elaboración propia.

Anexo A 7: Matriz normalizada y vector promedio del criterio Tiempo de respuesta.

Matriz normalizada										Vector promedio
0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0385	0.0385	0.0385	0.0217	0.0147	0.0357	0.0330
0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0385	0.0385	0.0385	0.0217	0.0147	0.0357	0.0330
0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0385	0.0385	0.0385	0.0217	0.0147	0.0357	0.0330
0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0385	0.0385	0.0385	0.0217	0.0147	0.0357	0.0330
0.1786	0.1786	0.1786	0.1786	0.1923	0.1923	0.1923	0.1087	0.2206	0.1786	0.1799
0.1786	0.1786	0.1786	0.1786	0.1923	0.1923	0.1923	0.5435	0.2206	0.1786	0.2234
0.1786	0.1786	0.1786	0.1786	0.1923	0.1923	0.1923	0.1087	0.2206	0.1786	0.1799
0.1786	0.1786	0.1786	0.1786	0.1923	0.1923	0.1923	0.1087	0.2206	0.1786	0.1799
0.1071	0.1071	0.1071	0.1071	0.0385	0.0385	0.0385	0.0217	0.0441	0.1071	0.0717
0.0357	0.0357	0.0357	0.0357	0.0385	0.0385	0.0385	0.0217	0.0147	0.0357	0.0330

Fuente: Elaboración propia

Anexo A 8: Comparación entre alternativas respecto al criterio Tiempo de entrega.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	Pesos	
A1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	1.00	0.20	0.20	1.00	5	<=5 días
A2	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	1.00	0.20	0.20	1.00	3	>5 días<=15 días
A3	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	1.00	0.20	0.20	1.00	1	misma importancia No contestaron
A4	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	1.00	0.20	0.20	1.00		
A5	5.00	5.00	5.00	5.00	1.00	1.00	5.00	3.00	1.00	5.00		
A6	5.00	5.00	5.00	5.00	1.00	1.00	5.00	3.00	1.00	5.00		
A7	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	1.00	0.20	0.20	1.00		
A8	5.00	5.00	5.00	5.00	0.33	0.33	5.00	1.00	0.33	1.00		
A9	5.00	5.00	5.00	5.00	1.00	1.00	5.00	3.00	1.00	5.00		
A10	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	1.00	1.00	0.20	1.00		
Suma o ponderación	26.00	26.00	26.00	26.00	4.53	4.53	26.00	12.00	4.53	22.00		

Fuente: Elaboración propia.

Anexo A 9: Matriz normalizada y vector promedio del criterio Tiempo de entrega.

Matriz normalizada										Vector promedio
0.0385	0.0385	0.0385	0.0385	0.0441	0.0441	0.0385	0.0167	0.0441	0.0455	0.0387
0.0385	0.0385	0.0385	0.0385	0.0441	0.0441	0.0385	0.0167	0.0441	0.0455	0.0387
0.0385	0.0385	0.0385	0.0385	0.0441	0.0441	0.0385	0.0167	0.0441	0.0455	0.0387
0.0385	0.0385	0.0385	0.0385	0.0441	0.0441	0.0385	0.0167	0.0441	0.0455	0.0387
0.1923	0.1923	0.1923	0.1923	0.2206	0.2206	0.1923	0.2500	0.2206	0.2273	0.2101
0.1923	0.1923	0.1923	0.1923	0.2206	0.2206	0.1923	0.2500	0.2206	0.2273	0.2101
0.0385	0.0385	0.0385	0.0385	0.0441	0.0441	0.0385	0.0167	0.0441	0.0455	0.0387
0.1923	0.1923	0.1923	0.1923	0.0735	0.0735	0.1923	0.0833	0.0735	0.0455	0.1311
0.1923	0.1923	0.1923	0.1923	0.2206	0.2206	0.1923	0.2500	0.2206	0.2273	0.2101
0.0385	0.0385	0.0385	0.0385	0.0441	0.0441	0.0385	0.0833	0.0441	0.0455	0.0453

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B: TABLA DE INFORMACIÓN OBTENIDA DE FICHAS TÉCNICAS, PROVEEDORES PARA ACTUADORES Y CRITERIOS GENERALES.

Eje	Marca	Tipo de motor	Modelo	Peso (kg)	Velocidad (rpm)	HP	Voltaje	Costo total	Carreas beneficiadas	Materias	# subtemas	Dir. proveedor
X	WEG	Servomotor	14318233	9.735	1735	1/2	220 DC	1,750	4	6	28	México
	Indramat		MKD071B-061-KG1-KN	7	5000	6 3/7	380 DC	13,656				Chicago
Y	Bodine Electric company	Motor de engranajes o Motorreductor	42R5BFCE1	6.8	280	1/6	230 DC	22,900				
	MARATHON		3.83368E+11	4.05	1725	1/4	230 DC	7,739				Estado de México
Z	Uxcell		DFGA32RI-16.2i	0.68	300	1/10	12 DC	597.51				EUA
	Greartisan		HJP37RIC	0.204	200	7/870	12 DC	482.5				EUA
	Walfront		37GB-3530	0.2	1600	2/213	12 DC	309.07				EUA
	Pololu			0.416	670	4/785	12 DC	2,264.56				Canadá

Anexo B 1: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio Peso (kg) del eje X.

	B1	B2	Matriz normalizada		Vector promedio
B1	1.00	0.33	0.25	0.25	0.25
B2	3.00	1.00	0.75	0.75	0.75
Suma o ponderación	4.00	1.33			1.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B 2: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio RPM del eje X.

	B1	B2	Matriz normalizada		Vector promedio
B1	1.00	0.33	0.25	0.25	0.25
B2	3.00	1.00	0.75	0.75	0.75
Suma o ponderación	4.00	1.33			1.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B 3: : Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio HP del eje X.

	B1	B2	Matriz normalizada		Vector promedio
B1	1.00	0.33	0.25	0.25	0.25
B2	3.00	1.00	0.75	0.75	0.75
Suma o ponderación	4.00	1.33			1.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B 4: : Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio Costo del eje X.

	B1	B2	Matriz normalizada		Vector promedio
B1	1.00	7.00	0.88	0.88	0.88
B2	0.14	1.00	0.13	0.13	0.13
Suma o ponderación	1.14	8.00			1.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B 5: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio Peso (kg) del eje Y.

	B3	B4	B5	Matriz normalizada			Vector promedio
B3	1.00	1.00	0.33	0.20	0.20	0.20	0.20
B4	1.00	1.00	0.33	0.20	0.20	0.20	0.20
B5	3.00	3.00	1.00	0.60	0.60	0.60	0.60
Suma o ponderación	5.00	5.00	1.67				1.00

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B 6: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio RPM del eje Y.

	B3	B4	B5	Matriz normalizada			Vector promedio
B3	1.00	1.00	0.33	0.20	0.20	0.20	0.20
B4	1.00	1.00	0.33	0.20	0.20	0.20	0.20
B5	3.00	3.00	1.00	0.60	0.60	0.60	0.60
Suma o ponderación	5.00	5.00	1.67				1.00

Fuente: Elaboración propia

Anexo B 7: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio HP del eje Y.

	B3	B4	B5	Matriz normalizada			Vector promedio
B3	1.00	1.00	0.33	0.20	0.20	0.20	0.20
B4	1.00	1.00	0.33	0.20	0.20	0.20	0.20
B5	3.00	3.00	1.00	0.60	0.60	0.60	0.60
Suma o ponderación	5.00	5.00	1.67				1.00

Fuente: Elaboración propia

Anexo B 8: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio Costo del eje Y.

	B3	B4	B5	Matriz normalizada			Vector promedio
B3	1.00	0.20	0.14	0.08	0.09	0.07	0.08
B4	5.00	1.00	1.00	0.38	0.45	0.47	0.44
B5	7.00	1.00	1.00	0.54	0.45	0.47	0.49
Suma o ponderación	13.00	2.20	2.14				1.00

Fuente: Elaboración propia

Anexo B 9 Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio Peso (Kg) del eje Z.

	B6	B7	B8	B9	Matriz normalizada				Vector promedio
B6	1.00	0.33	0.33	1.00	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
B7	3.00	1.00	1.00	3.00	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
B8	3.00	1.00	1.00	3.00	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
B9	1.00	0.33	0.33	1.00	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Suma o ponderación	8.00	2.67	2.67	8.00					1.00

Fuente: Elaboración propia

Anexo B 10: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio RPM del eje Z.

	B6	B7	B8	B9	Matriz normalizada				Vector promedio
B6	1.00	1.00	0.20	0.33	0.10	0.10	0.13	0.05	0.09
B7	1.00	1.00	0.20	0.33	0.10	0.10	0.13	0.05	0.09
B8	5.00	5.00	1.00	5.00	0.50	0.50	0.63	0.75	0.59
B9	3.00	3.00	0.20	1.00	0.30	0.30	0.13	0.15	0.22
Suma o ponderación	10.00	10.00	1.60	6.67					1.00

Fuente: Elaboración propia

Anexo B 11: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio HP del eje Z.

	B6	B7	B8	B9	Matriz normalizada				Vector promedio
B6	1.00	5.00	5.00	5.00	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
B7	0.20	1.00	1.00	1.00	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
B8	0.20	1.00	1.00	1.00	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
B9	0.20	1.00	1.00	1.00	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Suma o ponderación	1.60	8.00	8.00	8.00					1.00

Fuente: Elaboración propia

Anexo B 12: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio Costo del eje Z.

	B6	B7	B8	B9	Matriz normalizada				Vector promedio
B6	1.00	1.00	1.00	7.00	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
B7	1.00	1.00	1.00	7.00	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
B8	1.00	1.00	1.00	7.00	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
B9	0.14	0.14	0.14	1.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Suma o ponderación	3.14	3.14	3.14	22.00					1.00

Fuente: Elaboración propia

ANEXO C: TABLA DE INFORMACIÓN OBTENIDA DE FICHAS TÉCNICAS ACERCA DE CONTROLADORES.

	Marca	Serie	CPU	No. Máx. de E/S	Velocidad de procesamiento en bits	Comunicación	Costo total	Carreas beneficiadas	Materias	# subtemas	N. de proveedor	Dir. proveedor				
PLC	SIEMENS	SIMATIC S7-1500	1511-1 PN	32/32 kbyte	60 ns	Profinet	36,753.37	4	6	58	SEESA	Puebla				
			1513-1 PN		40 ns											
			1516-3 PN/DP		10 ns	Profinet y Profibus										
	FESTO	CPX-CEC-M1-V3		512/512 bits	200 µs	Modbus TCP								Sistemas y controles	Tehuacán, Puebla.	
	OMRON	CP1H-Y20DT-D		272/272 bits	0.7 ms	TCP/IP									Ataisa solutions for industry S. A de C. V.	Puebla
															OMRON Automatitacion y safety	Cd. de México,
															Sistemas de Control y Automatización, SA de CV	Puebla
	Allen Bradley	SL 500	5/03	512/512 bits	37 µs	Modbus RTU, Ethernet TCP									Automation, SA de CV	Edo. Méx.
															Cosegsa	Veracruz
															IDE automatización	
											Automatización Industria Olivo	Edo. de México				
Marca	Serie		Número de ejes máx.	Velocidad de operación	Comunicación	Costo total	Carreas beneficiadas	Materias	# subtemas	N. de proveedor	Dir. proveedor					
CNC	Mitsubishi	C80	3	0.222 ms			4	6	40	GMI						
														MELCSA	Cd. de México	
	Fanuc	32i-B		20		Ethernet-IP/PROFINET I-O, Modbus TCP							Fanuc America	Queretaro		
	Fagor	CNC 8060 FL		4	2 ms	Ethernet							Mecatrónica y Suministros Industriales S.A de C.V.	Cd. Juárez		
	Siemens	D455-2		128	0.125 ms	EtherNet, Profibus, Profinet								INDUSTRIA ELÉCTRICA DE PUEBLA, S.A. DE C.V.	Puebla	
															SEESA	Puebla

Anexo C 1: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio No. Máximo de E/S de un PLC.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Matriz normalizada						Vector promedio
C1	1.00	1.00	1.00	0.20	0.33	0.20	0.06	0.06	0.06	0.07	0.04	0.07	0.06
C2	1.00	1.00	1.00	0.20	0.33	0.20	0.06	0.06	0.06	0.07	0.04	0.07	0.06
C3	1.00	1.00	1.00	0.20	0.33	0.20	0.06	0.06	0.06	0.07	0.04	0.07	0.06
C4	5.00	5.00	5.00	1.00	3.00	1.00	0.31	0.31	0.31	0.34	0.38	0.34	0.33
C5	3.00	3.00	3.00	0.33	1.00	0.33	0.19	0.19	0.19	0.11	0.13	0.11	0.15
C6	5.00	5.00	5.00	1.00	3.00	1.00	0.31	0.31	0.31	0.34	0.38	0.34	0.33
Suma o ponderación	16.00	16.00	16.00	2.93	8.00	2.93							1.00

Fuente: Elaboración propia

Anexo C 2: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio Velocidad de procesamiento de un PLC.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Matriz normalizada						Vector promedio
C1	1.00	1.00	1.00	0.20	0.33	0.20	0.06	0.06	0.06	0.07	0.03	0.07	0.06
C2	1.00	1.00	1.00	0.20	0.33	0.20	0.06	0.06	0.06	0.07	0.03	0.07	0.06
C3	1.00	1.00	1.00	0.20	0.33	0.20	0.06	0.06	0.06	0.07	0.03	0.07	0.06
C4	5.00	5.00	5.00	1.00	3.00	1.00	0.31	0.31	0.31	0.34	0.30	0.36	0.32
C5	3.00	3.00	3.00	0.33	1.00	0.20	0.19	0.19	0.19	0.11	0.10	0.07	0.14
C6	5.00	5.00	5.00	1.00	5.00	1.00	0.31	0.31	0.31	0.34	0.50	0.36	0.36
Suma o ponderación	16.00	16.00	16.00	2.93	10.00	2.80							1.00

Fuente: Elaboración propia

Anexo C 3: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio Comunicación de un PLC.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Matriz normalizada						Vector promedio
C1	1.00	1.00	1.00	0.33	0.33	0.33	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
C2	1.00	1.00	1.00	0.33	0.33	0.33	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
C3	1.00	1.00	1.00	0.33	0.33	0.33	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
C4	3.00	3.00	3.00	1.00	1.00	1.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
C5	3.00	3.00	3.00	1.00	1.00	1.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
C6	3.00	3.00	3.00	1.00	1.00	1.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Suma o ponderación	12.00	12.00	12.00	4.00	4.00	4.00							1.00

Fuente: Elaboración propia

Anexo C 4: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio No. de ejes máximo de un CNC.

	C7	C8	C9	C10	Matriz normalizada				Vector promedio
C7	1.00	0.20	1.00	0.14	0.07	0.03	0.07	0.10	0.07
C8	5.00	1.00	5.00	0.20	0.36	0.16	0.36	0.13	0.25
C9	1.00	0.20	1.00	0.14	0.07	0.03	0.07	0.10	0.07
C10	7.00	5.00	7.00	1.00	0.50	0.78	0.50	0.67	0.61
Suma o ponderación	14.00	6.40	14.00	1.49					1.00

Fuente: Elaboración propia

Anexo C 5: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio Velocidad de operación de un CNC.

	C7	C8	C9	C10	Matriz normalizada				Vector promedio
C7	1.00	1.00	0.20	0.33	0.10	0.10	0.13	0.05	0.09
C8	1.00	1.00	0.20	0.33	0.10	0.10	0.13	0.05	0.09
C9	5.00	5.00	1.00	5.00	0.50	0.50	0.63	0.75	0.60
C10	3.00	3.00	0.20	1.00	0.30	0.30	0.13	0.15	0.22
Suma o ponderación	10.00	10.00	1.60	6.67					1.00

Fuente: Elaboración propia

Anexo C 6: Comparación entre alternativas, matriz normalizada y vector promedio respecto al criterio Comunicación de un CNC.

	C7	C8	C9	C10	Matriz normalizada				Vector promedio
C7	1.00	0.20	0.20	0.20	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07
C8	5.00	1.00	1.00	1.00	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
C9	5.00	1.00	1.00	1.00	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
C10	5.00	1.00	1.00	1.00	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
Suma o ponderación	16.00	3.20	3.20	3.20					1.00

Fuente: Elaboración propia