

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN PROTOTIPO
ROBOTIZADO CARTESIANO PARA PRÁCTICAS DE PROCESOS INDUSTRIALES DE
ALMACENAMIENTO Y ENSAMBLE**

**FABIAN FRANCISCO RINCÓN TOLOZA
JAVIER EDUARDO VESGA BAUTISTA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
DECANATURA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2009**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN PROTOTIPO
ROBOTIZADO CARTESIANO PARA PRÁCTICAS DE PROCESOS INDUSTRIALES DE
ALMACENAMIENTO Y ENSAMBLE**

**FABIAN FRANCISCO RINCÓN TOLOZA
JAVIER EDUARDO VESGA BAUTISTA**

PROYECTO DE GRADO

**MIGUEL ANGEL REYES OROZCO
DIRECTOR**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
DECANATURA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2009**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma de Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, 05 de Octubre de 2009

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director de proyecto el ingeniero Miguel Ángel Reyes quien con su apoyo y conocimiento nos oriento durante cada una de las etapas del desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero René Carreño, quien fue la persona que nos motivó y confió en nosotros para desarrollar este proyecto. De igual forma, a su hermano, el ingeniero Martin Carreño, quien con su conocimiento y amplia experiencia en la industria de la automatización nos brindó su amistad, su apoyo, y su tiempo para finalizar este proyecto.

A Ludwing Casas, de servicios generales, quien siempre estuvo a nuestra disposición y con sus conocimientos y creatividad nos permitió desarrollar soluciones a problemas presentados en el proyecto.

A todos nuestros familiares y amigos que siempre estuvieron ahí, brindándonos todo su apoyo incondicional y en ocasiones nos animaron a seguir a delante.

A Dios, pues si no fuera por su gracia, su favor y su provisión, nada de lo que somos, y nada de lo que se logró desarrollar hubiera sido posible.

Finalmente, a todas y cada una de las personas que tal vez no recordamos, pero que hicieron parte del desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES	2
1.1 MARCO HISTÓRICO.....	2
1.2 ESTADO DEL ARTE	4
1.3 MARCO CONCEPTUAL.....	7
1.3.2.1 VIGAS	11
1.3.2.2 COLUMNAS	12
1.3.2.3 NEUMÁTICA.....	13
1.3.2.3.1 Sistemas de vacío.....	13
1.3.2.3.2 Sujeción por Pinzas Mecánicas o Grippers	15
1.3.2.3.3 Válvulas.....	16
1.3.3.1 SENSORES	19
1.3.3.2 ACTUADORES.....	25
1.3.3.3 AUTÓMATAS PROGRAMABLES INDUSTRIALES (API) Ó (PLC)	27
1.3.3.3.1 Hardware.....	27
1.3.3.3.2 Software para Programación	30
1.3.3.3.3 Lenguajes de Programación del PLC	31
1.3.4.1 ETHERNET	36
1.3.4.1.1 Modos de Transmisión y Recepción de Mensajes	36
1.3.4.1.2 Topologías de Red.....	37
1.3.4.1.3 Dispositivos	39
1.3.4.2 PROFIBUS.....	49
1.3.4.2.1 PROFIBUS DP (Decentralized Peripherals):	50
1.3.4.2.2 PROFIBUS PA (Process Automation):	50
1.3.4.2.3 PROFIBUS FMS (Fieldbus Message Specification):	51
1.3.4.2.4 DP Maestro Clase 1 (DPM1):.....	51
1.3.4.2.5 DP Maestro Clase 2 (DPM2):.....	51
1.3.4.2.6 DP Esclavo:.....	52
2. METODOLOGIA	53
2.1 DEFINICIÓN DE LA NECESIDAD DEL PRODUCTO.....	53
2.2 CONCEPTO ORIGINAL	54
2.3 DISEÑO CONCEPTUAL.....	54

2.4	ANÁLISIS DE DISEÑO	54
2.5	MODELOS FÍSICOS Y ANALÍTICOS.....	54
2.6	ENSAMBLE Ó MANUFACTURA	56
2.7	PRUEBAS Y EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO	56
3.	DISEÑO.....	57
3.2.1	DISEÑO ESTRUCTURAL – ESTUDIO DE ALTERNATIVAS	58
3.2.2	SELECCIÓN DE EJES	63
3.2.2.1	Eje Z	63
3.2.2.2	Eje Y.....	68
3.2.2.3	Eje X.....	72
3.2.3	VIGAS	73
3.2.4	COLUMNAS	77
3.2.5	ELEMENTOS NEUMÁTICOS EN EL SISTEMA ROBÓTICO CARTESIANO.....	79
4.	ENSAMBLE	85
4.1	COMPONENTES ESTRUCTURALES.....	85
4.2	COMPONENTES ELECTROMECAÓNICOS	96
4.3	COMPONENTES DE CONTROL	101
5.	PUESTA EN MARCHA	106
5.1	PRUEBAS INDIVIDUALES	106
5.2	PRUEBAS INDIVIDUALES VÍA PROFIBUS	111
5.3	PRUEBA CONJUNTO VÍA PROFIBUS.....	116
5.4	PRUEBAS NEUMÁTICAS	122
5.5	PROBLEMAS PRESENTADOS	123
5.6	RUTINAS FINALES	125
6.	PROPUESTA DE INTERCONEXIÓN	133
6.1	INTERCONEXIÓN CIM	136
6.2	INTERCONEXIÓN LABORATORIOS BLOQUE I	138
	CONCLUSIONES	143
	RECOMENDACIONES	144
	BIBLIOGRAFÍA	145
	ANEXOS	147

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A. Parametrización Tarjetas Controladoras de la serie CMMS-ST-C8-7 para los motores paso a paso de la serie EMMS-ST de la marca FESTO.....**148**

ANEXO B. Parametrización Tarjeta Controladora de la serie SEC-AC para servomotores de la serie MTR-AC de la marca FESTO.....**151**

ANEXO C. Configuración Profibus de las Tarjetas Controladoras de los motores paso a paso de la serie CMMS-ST y servomotor de la serie SEC-AC de la marca FESTO dentro del entorno de SIEMENS SIMATIC STEP.....**154**

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. CRONOLOGÍA DE ALGUNOS EVENTOS RELEVANTES EN EL SIGLO XX EN LA ROBÓTICA.....	3
TABLA 2. CLASES DE DIRECCIÓN IP	48
TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DE PROFIBUS	49
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS PROTOCOLOS PROFIBUS.....	51
TABLA 5. RESUMEN PROBLEMAS PRESENTADOS.....	124

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. PATO DE VAUCANSON.....	2
FIGURA 2. ROBOT AFMA - UNIVERSIDAD BLAISE PASCAL.....	4
FIGURA 3. TRIPTERON - UNIVERSIDAD LAVAL.....	5
FIGURA 4. SISTEMA CORTADOR DE CUERO - UNAM	6
FIGURA 5. CELDA DE MANUFACTURA - UNIVERSIDAD DE PAMPLONA-COLOMBIA	6
FIGURA 6. CIM.....	7
FIGURA 7. FASE I	8
FIGURA 8. FASE II	8
FIGURA 9. TIPO CARTESIANO	9
FIGURA 10. TIPO ANGULAR.....	9
FIGURA 11. TIPO POLAR	9
FIGURA 12. TIPO SCARA.....	10
FIGURA 13. EFECTO VÉNTURI	14
FIGURA 14. GENERADOR DE VACÍO CON SISTEMA DE EXPULSIÓN	14
FIGURA 15. TIPOS DE VENTOSAS	15
FIGURA 16. TIPOS DE GRIPPER	15
FIGURA 17. MECANISMO GRIPPER ANGULAR	16
FIGURA 18. MECANISMO GRIPPER PARALELO.....	16
FIGURA 19. VÁLVULA DE ACCIONAMIENTO MANUAL TH DE FESTO	17
FIGURA 20. VÁLVULA DE ACCIONAMIENTO MECÁNICO LO DE FESTO.....	18
FIGURA 21. VÁLVULA DE PILOTAJE NEUMÁTICO-VL DE FESTO.....	18
FIGURA 22. ELECTROVÁLVULA BIESTABLE VUVB DE FESTO	19
FIGURA 23. FUNCIONAMIENTO SENSOR DE PROXIMIDAD MAGNÉTICO	21
FIGURA 24. SENSOR MAGNÉTICO DE PROXIMIDAD	21
FIGURA 25. FUNCIONAMIENTO SENSOR INDUCTIVO.....	22
FIGURA 26. SENSOR DE PROXIMIDAD INDUCTIVO.....	23
FIGURA 27. DIAGRAMA PRESÓSTATO TIPO HALL	24
FIGURA 28. PRESÓSTATO	24
FIGURA 29. DIAGRAMA DE UN RESOLVER	25
FIGURA 30. RESOLVER	25
FIGURA 31. MOTOR PASO A PASO.....	26
FIGURA 32. SERVOMOTOR	26
FIGURA 33. CPU SIEMENS S7-300	28
FIGURA 34. MEMORIA SIEMENS.....	29
FIGURA 35. MODULO DE ENTRADAS/SALIDAS DIGITALES	29
FIGURA 36. INTERFAZ DE COMUNICACIÓN PROFIBUS	29
FIGURA 37. FUENTE DE ALIMENTACIÓN PLC S7-300.....	30
FIGURA 38. EJEMPLO DE KOP	32
FIGURA 39. EJEMPLO GRAFCET	34
FIGURA 40. JERARQUÍA BUSES DE CAMPO.....	35
FIGURA 41. MODO SEMI-DUPLEX	36

FIGURA 42. MODO FULL-DUPLEX	37
FIGURA 43. RED ESTRELLA.....	37
FIGURA 44. RED ANILLO	38
FIGURA 45. RED BUS.....	39
FIGURA 46. CABLE COAXIAL	40
FIGURA 47. PAR TRENZADO.....	40
FIGURA 48. FIBRA ÓPTICA	41
FIGURA 49. CONECTOR RJ-45.....	41
FIGURA 50. CONECTOR SC	42
FIGURA 51. CONECTOR ST.....	42
FIGURA 52. CONECTOR LC.....	43
FIGURA 53. CONECTOR MT-RJ.....	43
FIGURA 54. CP 343-1 ADVANCED-INTERFAZ ETHERNET SIEMENS	44
FIGURA 55. HUB O CONCENTRADOR.....	45
FIGURA 56. SWITCH O CONMUTADOR	46
FIGURA 57. ROUTER O ENRUTADOR	47
FIGURA 58. DESIGNACIÓN DE BITS EN DIRECCIÓN IP	48
FIGURA 59. CABLE PROFIBUS Y PUERTO RS-485.....	50
FIGURA 60. METODOLOGÍA DE DISEÑO	53
FIGURA 61. SISTEMA TIPO PUENTE GRUA	55
FIGURA 62. SISTEMA TIPO PORTICO	55
FIGURA 63. MODELO INICIAL	58
FIGURA 64. PROPUESTA INICIAL	59
FIGURA 65. SISTEMA PÓRTICO	60
FIGURA 66. PROPUESTA SISTEMA PÓRTICO	60
FIGURA 67. SISTEMA PUENTE GRÚA	61
FIGURA 68. PROTOTIPO SISTEMA PUENTE GRÚA.....	62
FIGURA 69. PROPUESTA FINAL SISTEMA PUENTE GRÚA.....	63
FIGURA 70. MODELO EJE Z.....	64
FIGURA 71. DATOS MECÁNICOS DNCE	65
FIGURA 72. CURVAS SERVOMOTOR MTR-AC	66
FIGURA 73. PARÁMETROS DE LA CARGA EN POSITIONING DRIVES	67
FIGURA 74. RESULTADOS EJE Z POSITIONING DRIVES.....	68
FIGURA 75. MODELO EJE Y	68
FIGURA 76. DATOS MECÁNICOS DGE 25-800 EJE Y	70
FIGURA 77. DATOS MOTOR EMMS-ST-87M-SE.....	71
FIGURA 78. CURVAS MOTOR EMMS-ST-87M-SE	71
FIGURA 79. RESULTADOS EJE Y-POSITIONING DRIVES	72
FIGURA 80. DIAGRAMA DE FUERZAS Y MOMENTOS SOBRE VIGA	74
FIGURA 81. NOMOGRAMA FESTO PARA SELECCIÓN DE PERFIL DE VIGAS.....	75
FIGURA 82. PERFIL 40X80	76
FIGURA 83. PROPIEDADES PERFIL 80X80.....	78
FIGURA 84. PROPUESTA VEHÍCULO	80
FIGURA 85. MODELO VEHÍCULO.....	80
FIGURA 86. VACUUM SELECTOR	81

FIGURA 87. DATOS PIEZA.....	82
FIGURA 88. VENTOSA SELECCIONADA.....	82
FIGURA 89. SELECCIÓN DE PINZAS DE SUJECIÓN.....	83
FIGURA 90. VIGAS Y COLUMNAS.....	85
FIGURA 91. EJE X ACTIVO.....	85
FIGURA 92. EJE Y	86
FIGURA 93. ACOUPLE EJE Z EN EJE Y	86
FIGURA 94. ACOUPLE EJE Y EN EJE X.....	87
FIGURA 95. EJES X-Y	87
FIGURA 96. ESTRUCTURA ENSAMBLADA	88
FIGURA 97. ESTRUCTURA CON TRAVESAÑOS	89
FIGURA 98. PIE DE APOYO-CAPA SILICONA INDUSTRIAL.....	90
FIGURA 99. PIE DE APOYO-CAPA DE CAUCHO	90
FIGURA 100. ESTRUCTURA FINAL	91
FIGURA 101. HOLGURA ENTRE SENSOR Y GRIPPER	91
FIGURA 102. INTERFERENCIA SENSOR GRIPPER Y PLACA	92
FIGURA 103. PRESÓSTATO GRIPPER	93
FIGURA 104. CORROSIÓN EN VÁSTAGOS	94
FIGURA 105. VÁSTAGO RECTIFICADO Y GRASA.....	95
FIGURA 106. CONTROLADOR CMMS-ST-C8-7.....	96
FIGURA 107. MOTOR EMMS-ST-87M-SE	97
FIGURA 108. SENSORES MAGNÉTICOS.....	97
FIGURA 109. SENSOR MAGNÉTICO EJE Z	98
FIGURA 110. ACOUPLE SERVO A EJE Z	98
FIGURA 111. SENSOR INDUCTIVO EJE X.....	99
FIGURA 112. MOTOR EJE Y ACOPLADO.....	99
FIGURA 113. GENERADOR DE VACÍO Y VÁLVULA 4/2	100
FIGURA 114. INSTALACIÓN GENERADOR DE VACÍO Y VÁLVULA 4/2	100
FIGURA 115. CPU 315F-2PN/DP Y MÓDULO SM323.....	101
FIGURA 116. GABINETES TABLERO DE CONTROL Y POTENCIA.....	101
FIGURA 117. BORNERAS ABB 12 AWG	102
FIGURA 118. INSTALACIÓN GABINETES	102
FIGURA 119. MONTAJE DE CONTROLADORES DE MOTORES Y PLC	103
FIGURA 120. CABLEADO DE EQUIPOS	103
FIGURA 121. CONEXIONES DE POTENCIA Y RESOLVER DE MOTORES	104
FIGURA 122. CABLE Y CONECTOR PROFIBUS	104
FIGURA 123. CONEXIONES PROFIBUS ENTRE MOTORES Y PLC.....	105
FIGURA 124. HOMING	107
FIGURA 125. HOMING EN EJECUCIÓN.....	107
FIGURA 126. HOMING EXITOSO	108
FIGURA 127. SECUENCIA DE DESPLAZAMIENTO	108
FIGURA 128. REALIZACIÓN SECUENCIAS DE DESPLAZAMIENTOS	109
FIGURA 129. PARÁMETROS DE ACCIONAMIENTO EN WMEMOC	110
FIGURA 130. COMUNICACIÓN PROFIBUS ENTRE MOTOR EJE X Y PLC.....	111
FIGURA 131. START HOMING	112

FIGURA 132. EJE X REFERENCIADO.....	113
FIGURA 133. POSICIÓN Y VELOCIDAD.....	113
FIGURA 134. DESPLAZAMIENTO EJECUTADO.....	114
FIGURA 135. COMUNICACIÓN ENTRE PLC Y UNIDAD SEC-AC.....	115
FIGURA 136. SUPERVISIÓN EJE Z.....	116
FIGURA 137. RED PROFIBUS DE EQUIPOS.....	117
FIGURA 138. RED PROFIBUS OK.....	118
FIGURA 139. HOMING EN XYZ.....	119
FIGURA 140. ACCIONAMIENTO EN XYZ.....	120
FIGURA 141. ERROR EN POSICIONES.....	121
FIGURA 142. SUJECCIÓN CHASIS POR VACÍO.....	122
FIGURA 143. VÁLVULA GRIPPER ACTIVADA Y CAÍDA DE PRESIÓN.....	123
FIGURA 144. MODELO LÍNEAS DE ESPERA.....	126
FIGURA 145. DIAGRAMA DE FLUJO MODO AUTOMÁTICO.....	127
FIGURA 146. INTERFAZ HMI MODO AUTOMÁTICO.....	128
FIGURA 147. SECUENCIA GRAFCET MODO AUTOMÁTICO.....	128
FIGURA 148. MODELO SECUENCIA PALETIZADO.....	129
FIGURA 149. DIAGRAMA DE FLUJO MODO PALETIZADO.....	130
FIGURA 150. INTERFAZ HMI MODO PALETIZADO.....	130
FIGURA 151. SECUENCIA GRAFCET MODO PALETIZADO.....	131
FIGURA 152. INTERFAZ HMI MODO MANUAL-JOG.....	131
FIGURA 153. SUPERFICIE PARA LOS DIFERENTES MODOS.....	132
FIGURA 154. COMUNICACIÓN ETHERNET-WINCC.....	132
FIGURA 155. MODELO CAD DE LA CALLE DE SELECCIÓN.....	133
FIGURA 156. CALLE DE SELECCIÓN FINALIZADA.....	134
FIGURA 157. CPU 315F-2PN/DP.....	135
FIGURA 158. COMUNICACIÓN ENTRE LOS PROCESOS.....	136
FIGURA 159. SWITCH SIEMENS-SCALANCE X005.....	137
FIGURA 160. RED CON SCALANCE X005.....	137
FIGURA 161. SCALANCE X204-2.....	138
FIGURA 162. CP 243-1, MÓDULO ETHERNET PARA S7-200.....	139
FIGURA 163. SCALANCE X414-3E.....	139
FIGURA 164. RED FINAL CON TODOS LOS PROCESOS.....	140
FIGURA 165. CABLE PAR TRENZADO SIEMENS-IE FC RJ45 CABLE 4X2.....	141
FIGURA 166. CONECTOR IE FC RJ45 PLUG 4X2.....	141
FIGURA 167. CABLE PRECONECTADO IE TP CORD.....	142
FIGURA 168. EJECUTANDO SECUENCIA.....	150
FIGURA 169. POSICIONES EN WMEMOC.....	153

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Diseñar, construir, programar y poner en marcha un prototipo de un sistema robótico con desplazamiento cartesiano en tres ejes, para desarrollar prácticas de procesos industriales de ensamblaje y almacenamiento como complemento de los laboratorios de automatización y procesos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Diseñar y construir un prototipo de un sistema robótico de desplazamiento cartesiano, con carreras útiles aproximadas a 1000 X 700 X 350mm en los ejes X-Y-Z respectivamente, realizadas mediante accionamientos tipo servomotor y motores paso-paso y gobernado por un controlador lógico programable (PLC).
- Desarrollar una programación, basada en el lenguaje de un controlador lógico programable, que permita ejecutar al menos dos rutinas didácticas de procesos industriales, tomando como caso de práctica, los movimientos para ensamblaje y almacenamiento de un vehículo de juguete previamente seleccionado, las cuales servirán como experiencias de laboratorio para la facultad de Ingeniería Industrial y/o mecánica.
- Proponer una infraestructura preliminar (básica) que permita a futuro, la interconexión de este sistema robótico a otros sistemas automatizados dentro de una línea didáctica de ensamble, mediante protocolo Ethernet o similar, recomendando alguna tecnología apropiada.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN
PROTOTIPO ROBOTIZADO CARTESIANO PARA
PRÁCTICAS DE PROCESOS INDUSTRIALES DE
ALMACENAMIENTO Y ENSAMBLE

AUTOR(ES): FABIAN FRANCISCO RINCÓN TOLOZA
JAVIER EDUARDO VESGA BAUTISTA

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): MIGUEL ANGEL REYES OROZCO

RESUMEN

El objetivo de este proyecto es la construcción y programación de un prototipo robotizado cartesiano para la simulación de procesos de ensamblaje y almacenamiento de un vehículo de juguete. Fue construido con piezas prefabricadas seleccionadas a partir de criterios de diseño, así como conservando la didáctica del uso de varias tecnologías de control y accionamientos. El resultado es una estructura con carreras útiles de 1200X800X400mm en los ejes XYZ respectivamente, controlados por un PLC SIEMENS S7-300 vía Profibus, y con sistemas neumáticos para manipulación de piezas. Finalmente, este sistema, gracias a sus equipos y estructura, se encuentra en plena capacidad de acoplarse a procesos industriales de mayor complejidad, gracias a sus tecnologías de comunicación, como lo son Profibus y Ethernet.

PALABRAS CLAVES:

Procesos Industriales de Ensamblaje y Almacenamiento, Robot Cartesiano

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

ABSTRACT OF THESIS PROJECT

TITLE: DESIGN, CONSTRUCTION AND START UP OF A
ROBOTIZED CARTESIAN PROTOYPE FOR INDUSTRIAL
PROCESSES OF STORAGE AND ASSEMBLING
PRACTICES

AUTHOR(S): FABIAN FRANCISCO RINCÓN TOLOZA
JAVIER EDUARDO VESGA BAUTISTA

FACULTY: Mechanical Engineering

DIRECTOR: MIGUEL ANGEL REYES OROZCO

ABSTRACT

The aim of this project is the construction and programming of a cartesian robotized prototype for the simulation of assembling and storage processes of a toy car. It was constructed with pre-manufactured pieces selected from design criteria, as well as considering the use of various drives and control technologies. The result is a structure with useful strokes of 1200X800X400mm in the XYZ axes respectively, controlled by a SIEMENS S7-300 PLC via Profibus, and with pneumatic handling systems. Finally, this system, thanks to its devices and structure, is fully capable of coupling to more complex industrial processes, thanks to its communication technologies and protocols such as Profibus and Ethernet.

KEYWORDS:

Industrial Processes of Assembling and Storage, Cartesian Robot.

V° B° THESIS DIRECTOR

INTRODUCCIÓN

La competitividad en la Industria ha llevado al mundo a un nuevo nivel, en donde se hace necesario buscar métodos de producción más rápidos y eficientes.

En un país como Colombia, donde la industria ha comenzado a transformarse y la automatización de procesos ha empezado a tomar fuerza, se hace necesario que las Universidades inviertan en nuevos laboratorios que permitan preparar nuevos campos de acción en sus estudiantes como es el caso de la Universidad Pontificia Bolivariana que por medio de proyectos de índole multidisciplinar y semilleros de investigación le ha dado luz verde este a varios de estos proyectos, de los cuales el presente hace parte de ellos; en el que se beneficiaran en un inicio la facultad de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Industrial.

Para desarrollar este proyecto se empleó una metodología de diseño y construcción basadas en cálculos de diseños y selección de partes prefabricadas que cumplieran con los requerimientos del sistema, seguido de esto, se automatizó el prototipo por medio de un controlador lógico programable (PLC) que permite desarrollar rutinas de manera que se logren efectuar las practicas de laboratorios para las facultades mencionadas anteriormente, y por ultimo dejar abierta la tecnología y el prototipo de manera modular para combinarlos junto con otros módulos de la misma rama de automatización que se encuentran en la Universidad Pontificia Bolivariana con el fin de formar celdas de procesos más complejos y llevar las prácticas de laboratorio a un nivel de complejidad mayor.

La programación hecha en este prototipo permitió desarrollar y adquirir una serie de nuevos conocimientos y competencias que quedan a partir de la fecha disponibles para los estudiantes de Ingeniería Mecánica e Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana.

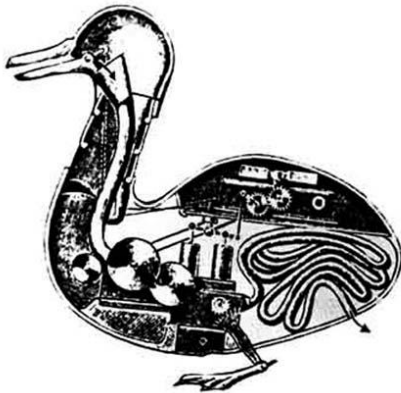
1. GENERALIDADES

1.1 Marco Histórico

La historia de la robótica, e incluso de la automatización, se puede remontar hasta el siglo IV a.C., en donde el filósofo y matemático griego Arquitas de Tarento construyó un autómeta consistente en una paloma de madera que rotaba por si sola gracias a un surtidor de agua o vapor y simulaba el vuelo¹. En el siglo I, Hero de Alejandría construyó una serie de dispositivos que actuaban en función de la acción del agua, vapor y de equilibrio de pesos.

Mucho más adelante, a mediados del siglo XVIII el francés Jaques Vaucanson, construyó lo que se consideró un hito en la historia de la automática, se trata de un pato mecánico de más de 400 piezas móviles, capaz de graznar y comer de la mano del público, completando de forma total la digestión (ver Figura 1). En el museo de autómetas de Grenoble existe una copia del pato de Vaucanson.

Figura 1. Pato de Vaucanson



Fuente: (SANCHEZ, y otros, 2007), p 73.

A medida que transcurrió la historia, se hicieron más inventos de este tipo, cuyo único fin era el de entretener a un determinado público, ninguna de estas máquinas fueron creadas con fines de producción. Pese a ello, la experiencia adquirida, las habilidades desarrolladas y las innovaciones que se fueron produciendo, permitieron que el desarrollo

¹ (TORRES, y otros, 2002), p3.

de todos estos mecanismos y automatismos contribuyeran a la llegada de la revolución industrial, y a la búsqueda de creaciones con fines productivos.

Es realmente en el siglo XX, después de la Segunda Guerra Mundial que se dieron grandes desarrollos en la automática para aplicaciones productivas en las crecientes industrias de la época. Por ejemplo, con el desarrollo de la electrónica, los avances de técnicas como la mecánica, la hidráulica, la neumática y la electricidad, se da origen a las primeras máquinas-herramientas de control numérico. Además de ello, junto con la introducción de computador, dichas máquinas logran controlar de manera más precisas sus trayectorias, velocidades hasta llevarlas a puntos óptimos de operación.

Estos y algunos otros trabajos desarrollados en la segunda mitad del siglo XX, presumen el comienzo de la robótica industrial moderna como hoy se conoce.

En la Tabla 1, se listan algunos de los acontecimientos más relevantes a lo largo de la historia de la robótica.

Tabla 1. Cronología de algunos eventos relevantes en el siglo XX en la robótica

FECHA	ACONTECIMIENTO
1952	El Instituto Tecnológico de Massachusetts desarrolla una máquina prototipo de control numérico.
1954	Goertz desarrolla un manipulador maestro-esclavo de tipo eléctrico; además incorpora a éste sensores de fuerza.
1959	Aparece el primer robot comercial, conocido como <i>Unimate</i> . Este robot es controlado por interruptores de final de carrera y levas.
1962	Un robot Unimate con transmisión hidráulica que utilizaba control numérico para el control del manipulador se instala en la fábrica de General Motors.
1968	El Instituto de investigación de Stanford desarrolla el robot móvil <i>Shakey</i> ; el cual estaba dotado de diversos tipos de sensores como cámaras de visión y sensores táctiles, era capaz de moverse y reconocer objetos.
1971	La Universidad de Stanford crea un pequeño brazo robot con accionamiento eléctrico.
1973	Bolles y Paul, del Instituto de investigación de Stanford, utilizaron un brazo robot controlado por computador que usaba realimentación visual y de fuerza para el montaje en la industria del automóvil.
1974	Kawasaki instala un robot para soldadura por arco para estructuras de motocicletas.
1976	La NASA hace uso en el espacio del primer brazo robot.
1982	IBM introduce el robot RS-1 para montaje.
1997	El robot Mars Pathfinder desarrollado por la NASA explora y recoge muestras de la superficie de Marte.

2001	Construido por MD. Robotics, una empresa canadiense, el sistema manipulador para la estación espacial, SSRMS, es lanzado al espacio para realizar tareas de ensamblaje en la estación espacial internacional.
------	---

Fuente: adaptación de (TORRES, y otros, 2002), p 7-8.

1.2 Estado del Arte

La robótica es una ciencia en la que cada día se realizan múltiples avances y desarrollos en diferentes partes del mundo, para todo tipo de aplicaciones, desde las industriales, hasta las domésticas.

En la actualidad, en diferentes partes del mundo, en muchas universidades se hace notorio que gran parte de los desarrollos en investigación en el campo de la robótica se basa en los de tipo cartesiano.

Por Ejemplo, en Francia se encuentre el robot AFMA con 6 grados de libertad². Este robot hace parte del grupo de automática, visión y robótica GRAVIR (**G**Roupe d'**A**utomatique: **V**ision et **R**obotique), que pertenece al laboratorio de ciencias y materiales para la electrónica y la automática LASMEA (**L**aboratoire des **S**ciences et **M**atériaux pour l'**E**lectronique et d'**A**utomatique) de la Universidad Blaise Pascal.

Figura 2. Robot AFMA - Universidad Blaise Pascal



Fuente: <http://www.lasmea.univ-bpclermont.fr/spip.php?article340>

² (UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL)

Este robot está destinado para los tres campos de investigación del grupo GRAVIR, que son:

- **Sistemas de percepción:** percepción multisensorial, sensores inteligentes, entre otros.
- **Visión artificial:** geometría para visión, identificación visual.
- **Control:** control de vehículos autónomos; modelamiento, identificación y control de máquinas complejas.

En Canadá, en la Universidad Laval, dentro de los múltiples desarrollos realizados en el laboratorio de robótica se encuentra el Tripteron, que es un robot paralelo, el cual, por la disposición de sus ejes, es equivalente a un sistema cartesiano pero que cuenta con las ventajas de un sistema paralelo, como por ejemplo las altas velocidades que se pueden lograr en el conjunto.³

Figura 3. Tripteron - Universidad Laval

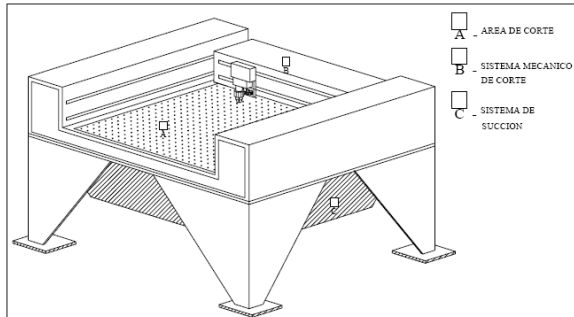


Fuente: <http://robot.gmc.ulaval.ca/fr/recherche/theme104.html>

Pasando a Latinoamérica, en México se encuentra un sistema cartesiano de 4 grados de libertad, desarrollado en la Universidad Autónoma de México (UNAM) para suplir las necesidades de la industria del calzado, específicamente, el corte de cuero. Éste sistema cuenta con los tres ejes cartesianos X-Y-Z, más un cuarto eje giratorio Φ , al cual se le acopla el sistema cortador de cuero.

³ (UNIVERSITÉ LAVAL)

Figura 4. Sistema cortador de cuero - UNAM



Fuente: (MORALES MATA, y otros)

Colombia también hace parte de los países en donde se hacen desarrollos concernientes al campo de la robótica y la automatización. En la Universidad de Pamplona, por ejemplo, se ha implementado una pequeña celda de manufactura en la que se recrea manipulación de piezas según su material. Es un conjunto de varios subprocesos, en donde cada uno es gobernado por un PLC exclusivo para cada uno de ellos, los cuales se encuentran enlazados mediante protocolos de comunicación. Aquí también se encuentra acoplado un sistema cartesiano para la manipulación de piezas, así como un robot de 6 grados de libertad.

Figura 5. Celda de manufactura - Universidad de Pamplona-Colombia



Fuente: (ARDILA REY, y otros, 2007), p 17.

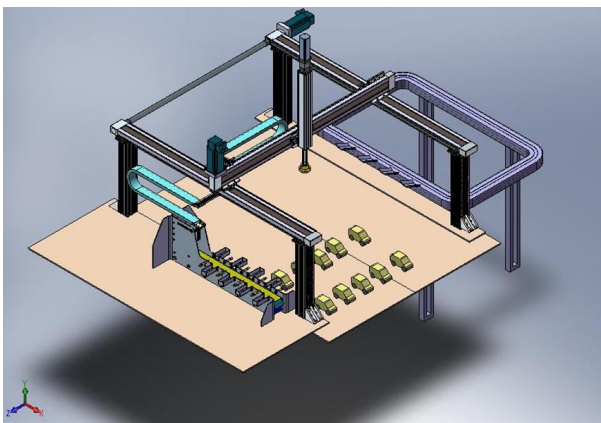
De igual forma, en la Universidad Autónoma de Bucaramanga, UNAB, se ha desarrollado un sistema cartesiano para el paletizado de objetos. Este sistema se encarga de buscar elementos dentro de una matriz y ubicarlos en una posición indicada por el operario, esto permite el control de objetos dentro de una bodega⁴. Es posible que haya alguna similitud entre este sistema y el propuesto en este proyecto, la diferencia es que además de realizar esta tarea, como se ha hablado anteriormente, también participa dentro de un proceso en etapa de construcción, de un Centro Integrado de Manufactura (CIM), además de las ventajas que ofrece al poder comunicarse con otros sistemas mediante redes de comunicación industrial.

Lo anterior demuestra que hay desarrollo e investigación en estos temas, y que además el país no se está quedando atrás con estos tópicos, y la Universidad Pontificia Bolivariana no es la excepción.

1.3 Marco Conceptual

Este sistema Robótico Cartesiano hace parte de un macro proyecto de la Universidad Pontificia Bolivariana que consiste en la construcción de una celda de manufactura conformada por la calle de selección que ya existe en el laboratorio I-206 (fase uno), el presente proyecto (fase dos) y una calle de ensamblaje que será la fase tres. Al Macro Proyecto se le ha asignado como nombre inicial CIM (Centro Integrado de Manufactura) en el cual se ha contemplado el siguiente esquema (Figura 6):

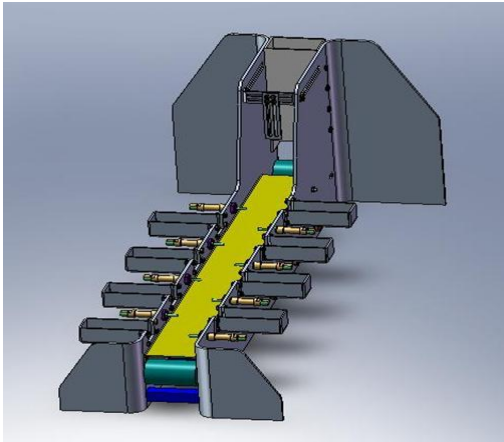
Figura 6. CIM



Fuente: Los Autores.

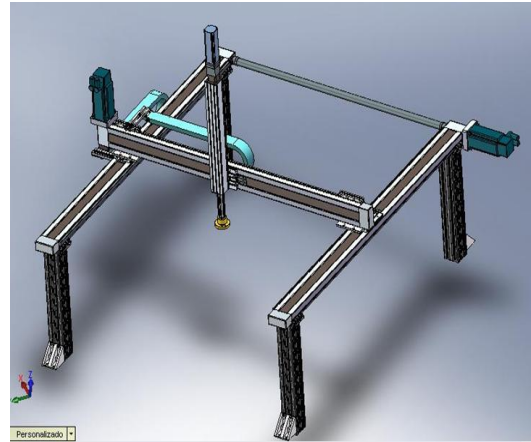
⁴ (CUEVAS MARTINEZ, y otros, 2006)

Figura 7. FASE I



Fuente: Los autores

Figura 8. FASE II



Fuente: Los autores

El sistema Robótico Cartesiano como proyecto contempla la necesidad de conocer sobre algunos tópicos, los cuales son de gran relevancia no sólo para el desarrollo del mismo, sino también para comprender la magnitud que estos temas hoy día implican en la industria, y la aplicación que este ofrece a la misma.

1.3.1 Robótica y Automatización industrial

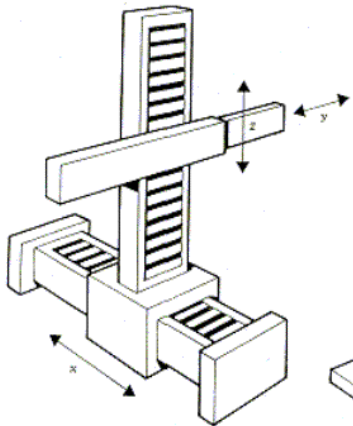
La robótica es una disciplina que en estas últimas décadas ha tomado una importancia muy relevante en el entorno del hombre. Muchas de las cosas que usamos a diario fueron ensambladas por algún tipo de robot en un determinado proceso. Los robots han sido implementados para desarrollar tareas que el hombre no pueda hacer por sus limitaciones físicas, tales como fuerza (pues no puede soportar grandes cargas), rapidez y precisión tanto en el procesamiento de información, como en la ejecución de dichas tareas, además de la manipulación de objetos o sustancias que pueden ser perjudiciales para la salud del hombre⁵.

Dentro del medio de los robots, una de las maneras de clasificarlos es por medio de sus configuraciones cinemáticas, en ellas encontramos los del tipo: *cartesiano, cilíndrico, esférico o polar, SCARA, angular o antropomorfo, paralelo*. En este caso, se desarrollará

⁵ (TORRES, y otros, 2002)

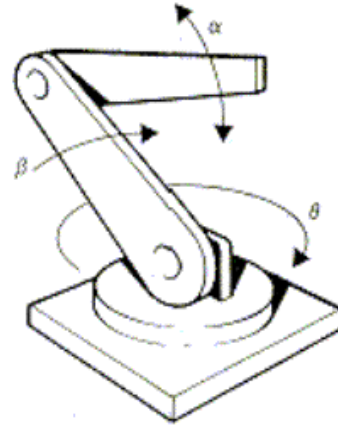
un sistema cartesiano, y este es aquel que está formado por tres articulaciones de tipo prismático, compuestas según tres ejes cartesianos ortogonales entre sí.

Figura 9. Tipo Cartesiano



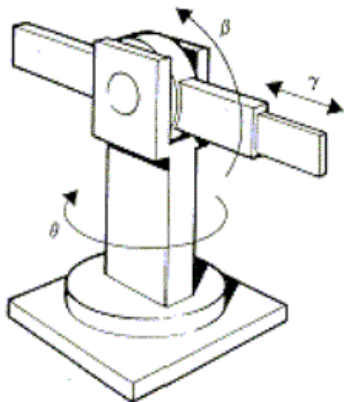
Fuente:
<http://www.geocities.com/credit8/base/robotica.htm>

Figura 10. Tipo Angular



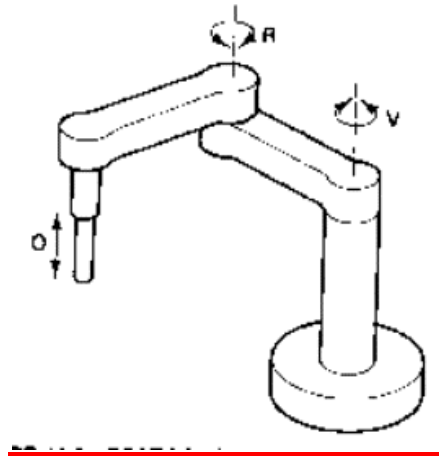
Fuente:
<http://www.geocities.com/credit8/base/robotica.htm>

Figura 11. Tipo Polar



Fuente: <http://www.geocities.com/credit8/base/robotica.htm>

Figura 12. Tipo SCARA



Fuente: <http://www.geocities.com/credit8/base/robotica.htm>

A pesar de que la robótica es una ciencia algo independiente y a su vez interdisciplinar, se ha clasificado a la robótica dentro de la automatización industrial, pues para automatizar un proceso cualquiera se requieren de varios elementos, estos son, sensores, actuadores y controladores. Para que un sistema robótico tenga conocimiento de donde se encuentra o qué está realizando requiere de sensores que le indiquen su posición (encoders, finales de carrera, cámaras, etc.); requieren de un sistema que los gobierne y que constantemente esté supervisando sus posiciones y procedimientos, como por ejemplo los controladores lógicos programables o más comúnmente conocidos como PLC por sus siglas en inglés. Y finalmente, necesita de actuadores que ejecuten las tareas programadas en el PLC –previamente analizadas por la información que recoja de los sensores-, y entre ellos se encuentran motores (DC, AC, servomotores, paso a paso, etc.), solenoides, entre otros.

En consecuencia a lo descrito anteriormente, la robótica es una forma de automatización industrial.

1.3.2 Diseño Mecánico

Al hablar de diseño mecánico se hace referencia al diseño de elementos como, estructuras y elementos neumáticos.

Para la sección de diseño estructural, se hace necesario el empleo de algunos criterios de diseño, como lo son, análisis dinámico, flexión pura en vigas, columnas.

1.3.2.1 Vigas

Dado que el sistema cartesiano necesita de una estructura que le brinde soporte, se hace necesario el empleo de vigas, y para su selección, se requiere tener en cuenta los criterios de diseño de las mismas.

Tomando la definición de Hamrock⁶, una viga es un miembro estructural diseñado para soportar cargas aplicadas perpendicularmente a su eje longitudinal. Normalmente, las vigas son barras largas y rectas con área de sección transversal constante. Para este caso, la carga aplicada será el peso de los ejes XYZ, junto con sus motores, además de la carga a levantar de 3Kg.

Dadas las características de las cargas, se sabe que las vigas estarán expuestas a flexión pura, además que serán del tipo simplemente apoyadas, por tanto, para el estudio de los esfuerzos a soportar, se hace necesario únicamente del empleo de las ecuaciones que estudian la flexión pura en vigas, entre otras, que son:

- $\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I}$, ecuación 4.48 de Hamrock⁷
- $\sigma_{perm} = 0,6S_y$, límite inferior de la ecuación (3.15) de Hamrock⁸
- $n_s = \frac{\sigma_{perm}}{\sigma_d}$, ecuación (6.5) de Hamrock⁹ para la predicción de falla para un estado de esfuerzo uniaxial.

⁶ (HAMROCK), p 37.

⁷ Ibid, p 160.

⁸ Ibid p 111.

⁹ Ibid p 234.

1.3.2.2 Columnas

El empleo de columnas para la estructura del sistema robótico cartesiano es de igual importancia que las vigas, pues son éstas las que finalmente darán estabilidad y soporte a toda la estructura, es decir, a los ejes y las vigas. Una columna es una barra recta y larga en relación con su radio, que se somete a cargas axiales de compresión.¹⁰

Para el dimensionamiento de las columnas, se hace necesario el uso de varios criterios, que son:

- $r_g = \sqrt{\frac{I}{A}}$, radio de giro, ecuación 4.14 de Hamrock.¹¹
- $C_c = \left(\frac{l_e}{r_g}\right)_E$, razón de esbeltez para criterio de Euler, ecuación 9.15 de Hamrock¹²
- $\left(\frac{l_e}{r_g}\right)_T = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}}$, razón de esbeltez para criterio de Jhonson, ecuación 9.18 de Hamrock¹³
- $P_{cr} = A \left[S_y - \frac{1}{E} \left(\frac{S_y l_e}{2\pi r_g} \right)^2 \right]$ carga crítica de Jhonson para alabeo inelástico, ecuación 9.16 de Hamrock¹⁴
- $P_{cr E} = \frac{\pi^2 EI}{l_e^2}$, carga crítica de Euler para alabeo elástico, ecuación 9.12 de Hamrock¹⁵

¹⁰ (HAMROCK), p 359.

¹¹ Ibid p 147.

^{12,13,14} Ibid p 368.

¹⁵ Ibid p 365

1.3.2.3 Neumática

La neumática es una disciplina que hoy en día ha tomado gran importancia en la industria en general.

Una de las mayores aplicaciones dentro de la neumática es la sujeción de piezas, ya sea por fuerzas aplicadas sobre la misma o por vacío. El aire comprimido y el vacío han demostrado ser medios idóneos para realizar tareas de sujeción, pues los sistemas neumáticos son eficientes, fiables y económicos¹⁶.

En el siguiente apartado se tratarán dos formas de sujeción de piezas, por vacío y por pinzas mecánicas o *grippers*.

1.3.2.3.1 Sistemas de vacío

Los sistemas de sujeción por vacío son ampliamente empleados en la industria porque a diferencia de una sujeción mecánica, éstos sujetan las piezas de manera suave, sin dañarlas, y tampoco dejan huella sobre ellas.

Estos sistemas cuentan con al menos los siguientes componentes:

- **Generador de vacío:** como su nombre lo indica, se encarga de producir vacío o depresión de aire. A diferencia de las bombas de vacío que funcionan con la energía de un motor eléctrico, los generadores funcionan sin partes móviles y aprovechando el efecto Vénturi –cuyo funcionamiento se muestra en la Figura 13-, en donde sólo se necesita de presión de aire de red, es decir, un compresor general. De igual manera existen generadores de vacío que incorporan dentro de su estructura un sistema de expulsión que sirve para liberar de forma rápida la pieza sujeta a la ventosa.¹⁷ La siguiente figura muestra el aspecto de una de estas unidades generadoras de vacío con mecanismo de expulsión.

¹⁶ (HESSE), p 5.

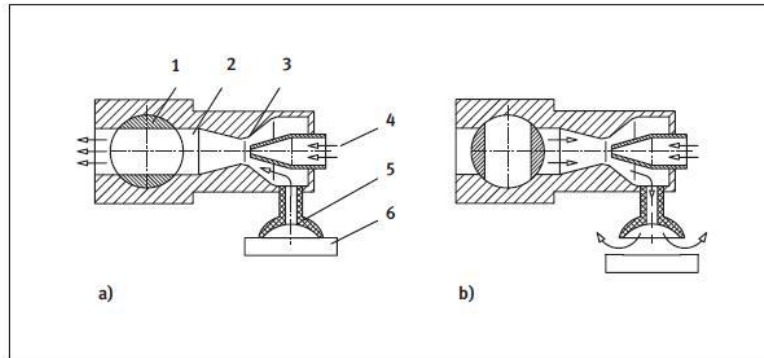
¹⁷ (SERRANO), p 190-193.

Figura 13. Efecto Vénturi

Fig. 9-6:
Modo de funcionamiento
de una tobera Venturi, con
válvula de cierre para producir
el efecto de expulsión

a) Aspiración
b) Expulsión

- 1 Válvula de cierre
- 2 Tobera receptora
- 3 Tobera eyectora
- 4 Alimentación
de aire comprimido
- 5 Ventosa de aspiración
- 6 Pieza



Fuente: (HESSE), Las Pinzas y sus aplicaciones, p 84.

Figura 14. Generador de vacío con sistema de expulsión



Fuente: catálogo digital Festo-xDKI.

- **Elementos de sujeción:** son las conocidas ventosas, las cuales realizan el trabajo de adherencia a distintos objetos creando un cámara de vacío con el elemento a suspender, de forma tal que la adherencia que se produzca entre ambos sea capaz de soportar el peso de la pieza. Se pueden clasificar de acuerdo a su forma, como son, planas, de fuelle, de rótula y alargadas. En la siguiente figura se muestran algunas de ellas.

Figura 15. Tipos de Ventosas



Fuente: Catálogo Ventosas VAS/VASB, Festo, p 6/2.172-73.

- **Elementos de mando:** Son todos los dispositivos para el mando del sistema como lo son, válvulas de direccionamiento, presóstatos o vacuóstatos y demás elementos necesarios para tener control absoluto del sistema.

1.3.2.3.2 Sujeción por Pinzas Mecánicas o Grippers

Las pinzas mecánicas, como su nombre lo indica, son mecanismos de apriete de piezas por palancas que en este caso son accionadas neumáticamente. Los Grippers son sofisticados elementos de reducido tamaño donde, además del mecanismo neumático de apriete, muchas veces llegan incorporados reguladores de velocidad del movimiento.

Entre sus muchas aplicaciones, se pueden destacar el amarre de herramientas y portaherramientas en procesos de mecanizado, sujeción de piezas de diversas formas para mecanizado, manipulación de tubos, discos, anillos, chapas, botellas, entre otros.

Los Grippers se clasifican según su apertura, que son angular y paralela como se muestra en la Figura 16.

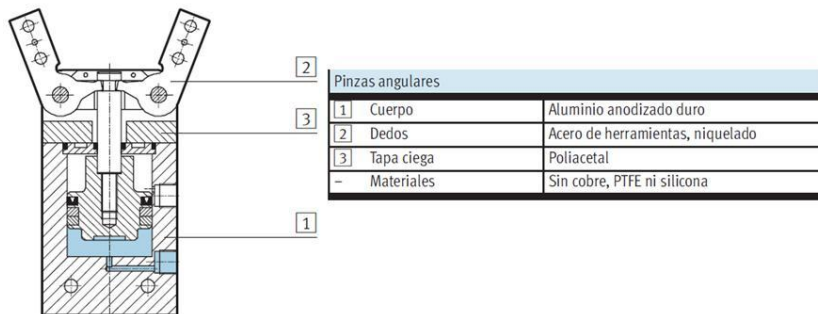
Figura 16. Tipos de Gripper



Fuente: adaptación del catálogo digital Festo-xDKI.

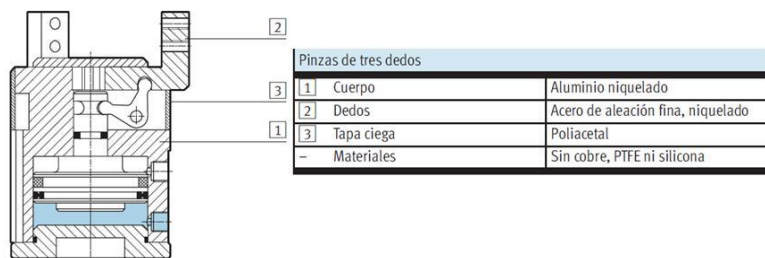
Para entender un poco cómo funcionan cada uno de estos mecanismos, en las siguientes figuras se muestra un esquema de cada uno.

Figura 17. Mecanismo Gripper Angular



Fuente: catálogo Pinzas angulares HGW, Festo, p 1/7.5-5.

Figura 18. Mecanismo Gripper Paralelo



Fuente: catálogo Pinzas angulares HGD, Festo, p 1/7.5-5.

1.3.2.3.3 Válvulas

Como lo define Serrano, las válvulas son dispositivos creados para controlar el arranque, parada, dirección y sentido de flujo del aire dentro de un circuito neumático. Las válvulas son distribuidoras cuando se emplean para gobernar toda clase de actuadores, ya sean lineales como los cilindros, rotativos como los motores neumáticos y incluso los grippers. Las válvulas también pueden ser de mando o pilotaje, las cuales se aprovechan para

gobernar de forma directa o indirecta las válvulas distribuidoras¹⁸. Las válvulas se reconocen por el número de vías, número de posiciones (monoestable, biestable, etc.) y también por su accionamiento.

Existen varios tipos de accionamiento de las válvulas, éstas son:

- **Accionamiento manual:** como lo indica su nombre, son aquellas que para su funcionamiento necesitan de la acción voluntaria del operador por medio de pulsadores, switches, palancas, etc.

Figura 19. Válvula de Accionamiento Manual TH de Festo



Fuente: catálogo digital Festo-xDKI.

- **Accionamiento mecánico:** éstas son activadas por elementos en movimiento como finales de carrera que se encuentran incorporadas dentro de la misma válvula, implicando ello que dichas válvulas deben ser de tamaño reducido, de modo que no interfieran en el funcionamiento de los sistemas neumáticos que estén en servicio, como por ejemplo, cilindros.

¹⁸ (SERRANO), p 127.

Figura 20. Válvula de Accionamiento Mecánico LO de Festo



Fuente: catálogo digital Festo-xDKI.

- **Pilotaje neumático:** el pilotaje neumático consiste en accionar una válvula a distancia aprovechando la fuerza que produce el aire a presión; dicha fuerza se utiliza para desplazar un mecanismo dentro de la válvula para así producir la conmutación. Normalmente la conmutación se da por una reducción de la presión dentro de sus cámaras, pero existen otras que requieren de una línea de presión para lograr el mismo fin.

Figura 21. Válvula de pilotaje neumático-VL de Festo



Fuente: adaptación del catálogo digital Festo-xDKI.

- **Electroválvulas:** como lo expresa su nombre, el accionamiento de la válvula se da al cerrarse un circuito eléctrico (normalmente se activa un solenoide), permitiendo así la apertura o cierre de sus vías de acuerdo al tipo. La señal eléctrica que provoca dicha conmutación, proviene de elementos como finales de carrera eléctricos, presóstatos o una unidad de control superior, como los

autómatas programables. Dentro de ellas se encuentran las de accionamiento directo, es decir, el solenoide es el que hace la conmutación; y también se encuentran las servopilotadas, las cuales necesitan además de la señal eléctrica, una señal neumática para lograr la conmutación.

Figura 22. Electroválvula biestable VUVB de Festo



Fuente: catálogo digital Festo-xDKI.

1.3.3 Diseño del Automatismo

Diseño del automatismo hace referencia a la selección de los elementos de control del sistema robótico cartesiano.

1.3.3.1 Sensores

Para efectuar el control de las máquinas es necesario que los controladores conozcan las posición de las partes móviles de las maquinas, de los objetos fabricados por ellas, o de variables como son temperatura, presión, etc. Mediante la utilización de las modernas tecnologías es posible obtener receptores artificiales que se denominan sensores o detectores y que, montados en vehículos, aparatos electrodomésticos y en otros equipos técnicos, permiten que estas maquinas reaccionen de modo controlado y por sí mismas a determinados estados.¹⁹

De entre los diferentes tipos de sensores que existen en el mercado, el sistema de Robot Cartesiano emplea los siguientes:

¹⁹ (PIEDRAFITA MORENO, 2004) p 59.

- **Sensores inductivos**
- **Sensores magnéticos**
- **Presóstato**

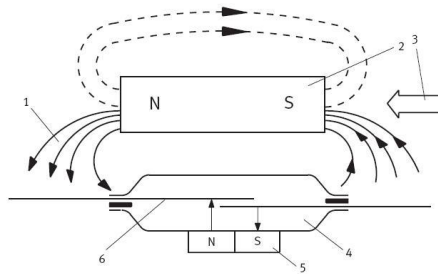
Sensores o detectores magnéticos/Reed: es un detector de proximidad clásico (reed significa lengüeta en inglés). Este detector reacciona a los campos magnéticos. En la fig. 21 se explica su funcionamiento. El detector tiene 2 lengüetas de contacto elásticas y ferro magnéticas (de aleación Fe-Ni) que se encuentran en un tubo de vidrio hermético lleno de un gas inerte. Si se acerca un campo magnético al tubo, las lengüetas se tocan, con lo que se cierra un circuito eléctrico. La reacción es de apenas una milésima de segundo. Los detectores Reed no se desgastan.

Estos interruptores, utilizados como detectores de posición, ofrecen una precisión de conmutación de $\pm 0,1$ mm. Claro está que hay que evitar que se encuentre otro campo magnético en las cercanías. De ser así, es necesario apantallar de modo apropiado al detector. Los detectores de proximidad tipo Reed suelen utilizarse como detectores para cilindros²⁰.

²⁰ (FESTO) p 36.

Figura 23. Funcionamiento sensor de proximidad magnético

Fuente: (FESTO), p 36



Detector de proximidad magnético

- 1. Campo magnético
- 2. Imán
- 3. Sentido del movimiento
- 4. Tubo cilíndrico de vidrio lleno de gas inerte
- 5. Imán de precarga
- 6. Contactos
- N Polo norte del imán

S Polo sur del imán

Figura 24. Sensor magnético de proximidad



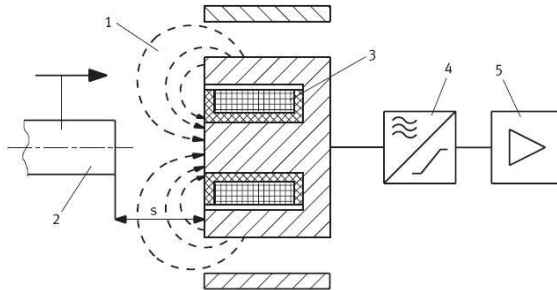
Fuente: Los autores.

Sensores inductivos: La mayoría de los detectores inductivos están formados por un oscilador, una unidad de evaluación y una unidad de salida. Estos detectores funcionan sin contacto, no están expuestos a desgaste, su respuesta es rápida, son insensibles a los golpes y, por lo tanto, son de larga duración. Si se aplica tensión a un oscilador, este empieza a oscilar –valga la redundancia– consumiendo una cantidad determinada de corriente.

El campo alterno de alta frecuencia sobresale por el lado de la superficie activa. Si en este campo se introduce un objeto metálico (que no necesariamente tiene que ser ferro magnético) a una distancia “s”, se induce una corriente parasita en el objeto metálico que se opone al campo de alta frecuencia. De esta manera se modera la frecuencia del oscilador y, por lo tanto, disminuye el consumo de corriente. La unidad de evaluación

detecta este cambio y activa correspondientemente la unidad de salida emitiendo una señal eléctrica.²¹

Figura 25. Funcionamiento sensor inductivo



Fuente: (FESTO), p 25.

Principio de funcionamiento de un detector inductivo

1. Campo magnético alterno
2. Objeto metálico
3. Bobina autoinductora
4. Oscilador
5. Amplificador
- S Aprox. 1

hasta 75 milímetros

²¹ (FESTO) p 25.

Figura 26. Sensor de proximidad inductivo



Fuente: Los autores

Sensor de presión o presóstato: Para medir la presión se utilizan sensores que están dotados de un elemento sensible a la presión y que emiten una señal eléctrica al variar la presión o que provocan operaciones de conmutación si esta supera un determinado valor límite.

Es importante tener en cuenta la presión que se mide, ya que pueden distinguirse los siguientes tipos:

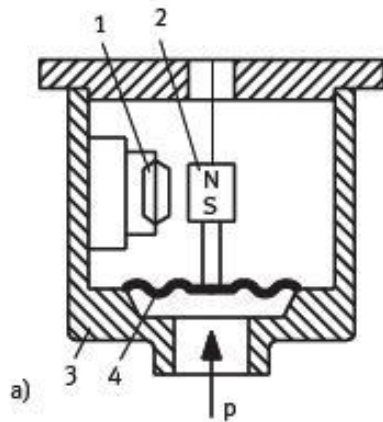
Presión absoluta: presión comparada con el valor cero del vacío absoluto ($P_{abs} = 0$). Una medición directa es posible, por ejemplo, con un barómetro.

Presión diferencial: presión que representa la diferencia entre dos presiones absolutas ($p_1 - p_2$).

Sobrepresión: presión en función de la presión atmosférica, considerándose esta como valor cero. Los detectores que miden esta presión se llaman sensores de presión relativa o presóstatos.²²

²² (FESTO) p 83.

Figura 27. Diagrama Presóstato tipo Hall



Fuente: (FESTO), p 83

1. **Generador Hall**
2. **Imán permanente**
3. **Cuerpo del sensor**
4. **Membrana**

Figura 28. Presóstato

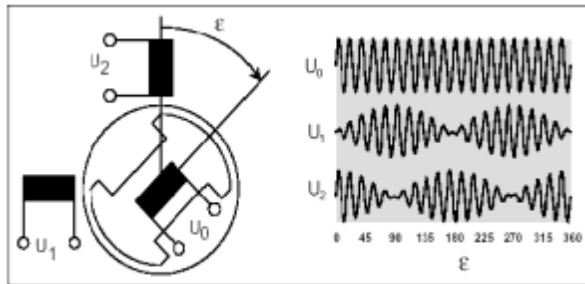


Fuente: Los autores

Resolvers que son usados por los motores paso a paso para conocer su posición en el sistema cartesiano. *El resolver es un sistema para obtener la posición absoluta del eje del rotor de un motor. Generalmente esta acoplado directamente al motor. se suele usar sobretodo en aplicaciones donde se requiere saber la posición con cierta precisión²³.*

²³ (CLEMENTE) p 15

Figura 29. Diagrama de un resolver



Esquema de un resolver y las señales de entrada y salida.

Fuente: (CLEMENTE), p 15

Figura 30. Resolver



Fuente: (CLEMENTE), p15.

1.3.3.2 Actuadores

Los actuadores son motores eléctricos que se encargan de efectuar los desplazamientos en los respectivos ejes (x-y-z) por medio de acoples que transfieren el giro a las correas dentadas dentro de los ejes.

Se usaron dos tipos de actuadores eléctricos:

- **Motores paso a paso:** Son motores de reluctancia, en general bifásicos, cuyo estator tiene una imantación permanente con objeto de obtener un par de retención a motor parado, incluso en ausencia de alimentación²⁴. Son alimentados con una tensión de 110 V, son precisos limitándose al ángulo de giro por cada paso y son de velocidades más reducidas con respecto a los servomotores.

²⁴ (BALCELLS, y otros)p 139

Figura 31. Motor paso a paso



Fuente: los autores.

- **Servomotor AC:** Son pequeñas máquinas diseñadas para el control de posicionamiento. Obtiene un comportamiento dinámico rápido y estable²⁵.
En su constitución física carecen de escobillas, lo cual los hace más confiables que los paso a paso, utilizan una tensión de 220 V, tienen una precisión alta y son muchos más rápidos.

Figura 32. Servomotor



Fuente: catalogo digital de productos Festo xDKI.

²⁵ (BALCELLS, y otros) p 138

1.3.3.3 Autómatas Programables Industriales (API) Ó (PLC)

Un autómata programable industrial (API) es un equipo electrónico de control con un cableado interno (hardware) independiente del proceso a controlar, que se adapta a dicho proceso mediante un programa específico (software) que contiene la secuencia de operaciones a realizar. Esta secuencia de operaciones se define sobre señales de entrada y salida al proceso, cableadas directamente en los bornes de conexión del autómata²⁶.

En este caso en particular se usó un PLC Siemens de la línea S7-300 referencia 315F-2PN/DP, la razón de usar un PLC de gran capacidad como lo es este, es precisamente la proyección del macro proyecto de la celda de manufactura, donde el robot cartesiano se ha catalogado como “proyecto nodriza” que unirá la fase uno y la tres, esto debido a la capacidad que tiene este PLC para la interconexión a los otros por medio de ETHERNET.

En este apartado se observara cuatro partes fundamentales de la Automatización de procesos mediante los PLC, que se componen del hardware del PLC, software para programación, lenguajes de programación y los modos de comunicación con el sistema robótico Cartesiano.

1.3.3.3.1 Hardware

Un autómata programable se compone esencialmente de los siguientes bloques:

- **Unidad central de procesos o de control, CPU**
- **Memoria**
- **Memorias internas**
- **Memorias de programa**
- **Interfaces de entrada y salida**
- **Fuente de alimentación**

Unidad central de procesos o de control, CPU: consulta el estado de las entradas y recoge de la memoria de programa la secuencia de instrucciones a ejecutar, elaborando a partir de ellas las señales de salida u órdenes que se enviarán al proceso. Durante la ejecución del programa, las instrucciones son procesadas en serie, una tras otra.

²⁶ (BALCELLS, y otros) p 67.

Figura 33. CPU Siemens S7-300



Fuente: Los autores.

Memoria: La memoria del autómata contiene los datos e instrucciones que necesita para ejecutar la tarea de control.

Memorias internas: Son las encargadas de almacenar datos intermedios de cálculo y variables internas que no aparecen directamente sobre las salidas, así como un reflejo o imagen de los últimos estados leídos sobre las señales de salida.

Memorias de programa: Contiene secuencia de operaciones que deben realizarse sobre las señales de salida, así como los parámetros de configuración del autómata. Por ello, si hay que introducir alguna variación sobre el sistema de control basta generalmente con modificar el contenido de esta memoria, en este caso se cuenta con una memoria de 512 KB.

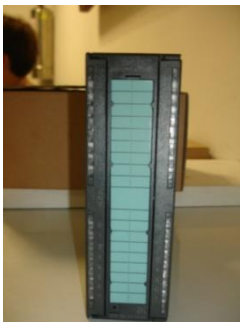
Figura 34. Memoria Siemens



Fuente: Los autores

Interfaces de entrada y salida: Establecen la comunicación del autómatas con el robot cartesiano. Para ello se conectan, por una parte, con las señales de procesos a través de los bornes previstos y, por otra, con el bus interno del autómatas. La interfaz se encarga de adaptar las señales que se manejan en el proceso a las utilizadas internamente por el robot cartesiano, para este caso se usó un Bus de campo protocolo PROFIBUS, de 1.5 Mbps de velocidad.

Figura 35. Modulo de entradas/salidas digitales



Fuente: Los autores

Figura 36. Interfaz de comunicación PROFIBUS



Fuente: Los autores

Fuente de alimentación: Proporciona, a partir de una tensión exterior, las tensiones necesarias para el buen funcionamiento de los distintos circuitos electrónicos del sistema, para este caso la alimentación es de 24V DC.

Figura 37. Fuente de alimentación PLC S7-300



Fuente: Los autores

1.3.3.3.2 Software para Programación

Software puede definirse como “conjunto de programas destinados a permitir o facilitar la utilización de hardware para la producción y explotación de las aplicaciones”²⁷.

En este caso el uso de software se realizó para la supervisión del proceso y programación del mismo. A continuación se especifican los que fueron usados.

- **WIN CC**
- **STEP 7**
- **WIN CC:**

SIMATIC WinCC significa “Windows Control Center”. WinCC es el software para el desarrollo de interfaces HMI de Siemens, cuya plataforma de operación es Windows. WinCC deja integrar en un sistema de automatización existente, una base de datos común, sobre la cual permite intercambio de datos con otros usos dentro del sistema ó con componentes nuevos que se pretendan implementar a futuro de SIMATIC.

Las bibliotecas de objetos para la configuración simple de elementos gráficos también se integran en WinCC²⁸.

El robot cartesiano hace uso de WinCC en tres tareas clasificadas según la rutina que ejecuta; entre las que se encuentran:

- **Modo automático:** Ejecuta la tarea de supervisión y muestra en pantalla las etapas activas de funcionamiento.

²⁷ (BALCELLS, y otros) p 194.

²⁸ (SIEMENS) p 22.

- **Modo Paletizado:** Permite en pantalla darle la orden de la coordenada específica a la cual debe desplazarse el sistema robótico cartesiano.
- **Modo Jog:** Permite desde la pantalla mover el sistema robótico cartesiano para conocer la coordenada específica del lugar donde se encuentra –entre otros-, fue utilizado para asignar las coordenadas del modo automático y modo Paletizado.

Entre otras Funciones el SIMATIC WIN CC se encuentran disponibles:

- ✓ Redactor gráfico para la creación cómoda de las imágenes de proceso.
- ✓ Sistema de mensaje con el sistema del archivo.
- ✓ Archivo del valor medido.
- ✓ Sistema de informe.
- ✓ Recopilación de Bases de datos.

• **SIMATIC STEP 7**

La programación y configuración de los sistemas automáticos SIMATIC S7-300 (PLC) son hechas con la ayuda del software SIMATIC STEP 7. La configuración de hardware ocurre para CPUs con módulos digitales, de igual manera para conexión de diferentes componentes de red como PROFIBUS, ETHERNET y ASi²⁹.

SIMATIC STEP 7 se convierte en una herramienta indispensable y de fácil manejo al momento de realizar la configuración y programación del PLC, de igual manera la versatilidad al combinar diversos lenguajes de programación y configuración de comunicación mediante PROFIBUS, ETHERNET y ASi cuando el proceso automatizado lo requiera.

Entre otras ventajas que presenta SIMATIC STEP 7 es configurar la interconexión entre PLC's SIEMENS que es una herramienta que se deberá usar a la hora de ejecutar la fase tres del macro proyecto de la celda de manufactura.

1.3.3.3.3 Lenguajes de Programación del PLC

“Se describe programa como: Conjunto de instrucciones, órdenes y símbolos reconocibles por el autómatas a través de su unidad de programación, que le permiten ejecutar la secuencia de control deseada. Al conjunto de todas estas instrucciones, órdenes y símbolos que están disponibles para escribir un programa se le denomina lenguaje de programación del autómatas”³⁰.

Los lenguajes de programación existentes son KOP ó LADDER conocido como lenguaje de contactores eléctricos, FUP ó FBD también llamado diagrama de bloque de funciones, AWL ó STL lista de comandos, SCL lenguaje de control estructurado basado en pascal y

²⁹ (SIEMENS) p 15.

³⁰ (BALCELLS, y otros) p 200

GRAFCET; de los cuales fueron usados KOP y GRAFCET para programar el robot cartesiano donde estuvieron relacionados de manera dependiente uno del otro.

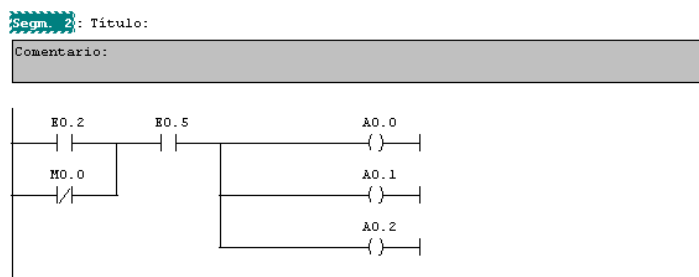
Para que el sistema Robótico Cartesiano efectuara sus movimientos automatizados de manera correcta se hizo uso de dos lenguajes de programación con el fin de mostrar de manera didáctica la manera como se programa en la Industria de automatización.

- **KOP (Kontakt Plan):** “Es el lenguaje de contactos que imita el funcionamiento de los circuitos basados en relés eléctricos”.³¹

Este lenguaje permite que el usuario entienda el funcionamiento de la programación de manera rápida, aunque se define como fácil al momento de programar; para proyectos complejos el diagrama de contactos tendría una estructura muy cargada lo cual dificultará un poco encontrar incongruencias que se puedan hallar en el programa, por eso es recomendable usar un lenguaje alternativo y combinar estos en la estructura de programación como se hizo en el sistema Robótico Cartesiano; no es imposible hacerlo en un solo lenguaje pero se debe buscar caminos que permitan hacerlo de maneras más rápida, confiable y didáctica.

En el sistema Robótico cartesiano, el uso del KOP se limitó a configurar una serie de restricciones de estado, por la complejidad del funcionamiento y la información que maneja, estas restricciones son fundamentales que estén bien estructuradas y de manera correcta para que GRAFCET las reciba y el robot funcione de la misma manera.

Figura 38. Ejemplo de KOP



Fuente: los autores.

³¹ (PIEDRAFITA MORENO, 2004) p 54.

- **GRAFCET:**

“Un grafcet es un diagrama funcional cuyo objetivo es describir de forma gráfica el comportamiento de un automatismo secuencial”.³²

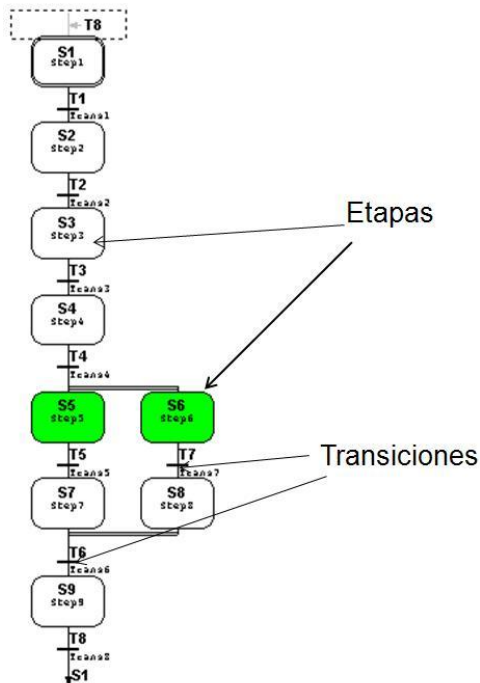
La estructura física de este diagrama funcional está conformada por bloques o también conocidos como etapas de procesos que a su vez están unidos por una línea orientada que demarca la ruta del proceso en cada ciclo que realice. Entre cada bloque funcional existe un sub-bloque o más conocido como etapas de transición en donde están consignadas las condiciones que debe cumplir el proceso antes de pasar a la siguiente etapa.

Entre las ventajas que ofrece GRAFCET es la supervisión en pantalla de las etapas dentro del proceso, donde fácilmente se puede detectar si existe o no un error en la secuencia de programación, la manera de verlo es precisamente por medio de código de colores donde rojo significa error y verde que todo el proceso va bien.

Dentro del sistema robótico cartesiano Grafcet tiene un papel importante junto con KOP, en donde Grafcet se encarga de llevar las etapas del proceso como lo son el desplazarse a una posición específica, activar/ desactivar la ventosa entre otras, mientras que los procesos de transición fueron programados en KOP, procesos entre los que se encuentran definición de la detención de los tres motores y el haber llegado a la coordenada de destino especificada entre otros.

³² (PIEDRAFITA MORENO, 2004) p 54.

Figura 39. Ejemplo Grafcet



Fuente: Adaptación de (SIEMENS), Step sequence programming with S7-GRAPH, p 35.

1.3.4 Comunicación

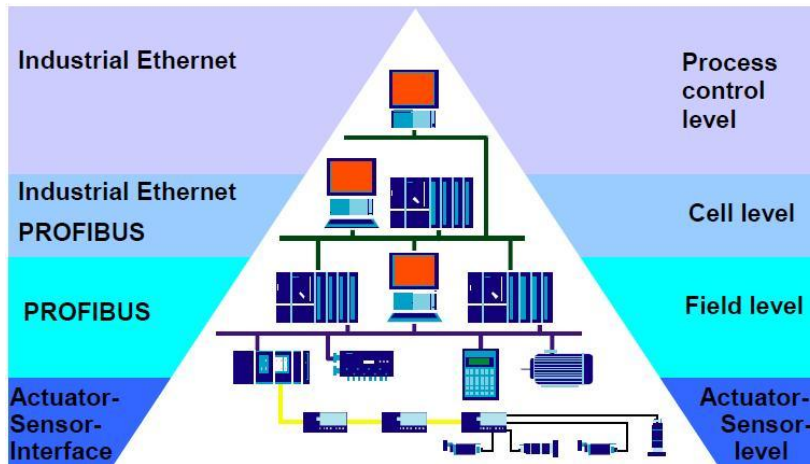
Un controlador lógico programable o PLC es diseñado para el manejo y procesamiento de señales procedentes de una máquina o de un proceso en especial. Pero mientras más grande y complejo sea dicho proceso o dicha máquina, se requerirá de la lectura de un número elevado de señales provenientes de todo tipo de sensores, y estos a su vez se pueden encontrar en lugares o ambientes ruidos que puedan perjudicar su correcto funcionamiento, al igual que se necesita de una rápida respuesta en los actuadores de proceso/máquina. Por tanto, cablear físicamente todas y cada una de estas señales resulta una tarea tediosa y costosa para las empresas.

Un bus de campo es un sistema de comunicación industrial que se encarga de reunir todas estas especificaciones en un solo medio físico, tales como cables de cobre, fibra óptica, e incluso tecnologías inalámbricas, con transmisión de señales digitales acoplados por un lado a sistemas distribuidos de campo como sensores, actuadores, transductores, y por otro lado a unidades centrales de control³³. Dependiendo de los dispositivos

³³ (PROFIBUS INTERNATIONAL, 2002), p 1.

acoplados y de la velocidad de transferencia y volumen de información existen varios buses de campo de acuerdo a un orden jerárquico como se muestra en la siguiente figura.

Figura 40. Jerarquía Buses de Campo



Fuente: Training document for the company-wide automation solution, Totally Integrated Automation (T I A) *MODULE A1-Totally Integrated Automation (T I A)*, p 10.

En el nivel inferior, se encuentra el bus AS-i (Actuator-Sensor interface), al cual, como su nombre lo indica se acoplan sensores y actuadores de señal ON/OFF, como por ejemplo, finales de carrera, leds, etc.

En el siguiente nivel –nivel de campo- se encuentran conectados dispositivos como módulos de entrada y salida de señales, transductores, reguladores de velocidad, válvulas, etc. En este nivel trabajan buses como Profibus, CANOpen, DeviceNet, Sercos, Modbus, entre otros.

En tercer nivel –nivel de célula-, la comunicación se da entre los dispositivos de control, es decir, entre PLCs. Aquí también aplican algunos de los buses mencionados en el nivel anterior como Profibus; también se encuentra el Ethernet.

Y finalmente, el último nivel –nivel de control-, la comunicación se da entre PLCs con PCs haciendo uso de estándares como Ethernet, Internet entre otros.

Para el presente proyecto, se decidió implementar el uso de uno de estos buses de campo, el cual es el Profibus debido a que actualmente es uno de los buses más empleados y además por la facilidad de adquisición en el mercado, el soporte técnico dado por las marcas seleccionadas para la construcción del sistema cartesiano que son

Festo y Siemens, razón por la cual no se hará énfasis en otros con excepción del Ethernet, que se presenta a continuación.

1.3.4.1 Ethernet

Hoy por hoy, Ethernet ha revolucionado las comunicaciones por las velocidades de transferencia de datos a las que permite llegar dependiendo del medio físico que se emplee. No solo ha tenido gran aceptación en corporaciones, universidades y oficinas, sino que ha empezado a abrirse camino entre los ambientes más exigentes de la industria, llegando a emplearse como bus de campo. Los atractivos de Ethernet incluyen la habilidad para monitorear transmisión de datos, la existencia de utilidades las cuales son usadas para ajustar y reconfigurar equipos, y la capacidad para cargar programas de control de dispositivos desde estaciones remotas³⁴.

En este apartado, para tener una comprensión básica del Ethernet, se estudiarán los siguientes ítems.

- 1.3.4.1.1 Modos de Transmisión y Recepción de Mensajes
- 1.3.4.1.2 Topologías de Red
- 1.3.4.1.3 Dispositivos
- 1.3.4.1.4 Direccionamiento IP

1.3.4.1.1 Modos de Transmisión y Recepción de Mensajes

Normalmente, en Ethernet se manejan dos modos de comunicación, que son el *Semi-duplex* y el *Full-duplex*.

- **Semi-Duplex:** es un modo doble vía en el cual ambas estaciones (emisor y receptor) pueden transmitir y recibir información, pero no de manera simultánea. El ejemplo más sencillo de este tipo son los radios llamados *Walkie-Talkie*.

Figura 41. Modo Semi-Duplex



³⁴ (ROMERO, 2005)., p.3

Imagen de los autores.

- **Full-Duplex:** es un modo de comunicación de doble vía con dos canales de comunicación de manera que ambas estaciones pueden enviar y recibir información de manera simultánea. El ejemplo típico de esta aplicación es el teléfono.

Figura 42. Modo Full-Duplex

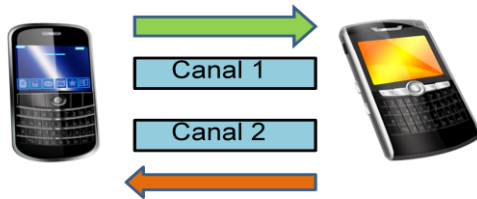


Imagen de los autores.

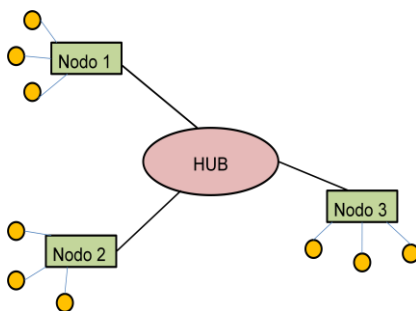
1.3.4.1.2 Topologías de Red

Al hablar de topología de red se hace referencia a la arquitectura para interconectar los equipos en dicha red. Dentro de las diferentes topologías se destacan tres, que son las más empleadas; estrella, anillo y bus.

- **Topología Estrella**

Aquí múltiples nodos (compuestos por sus respectivos transmisores y receptores) son conectados a un componente central llamado *Concentrador*, más conocido como *Hub* (ver Figura 43).

Figura 43. Red Estrella



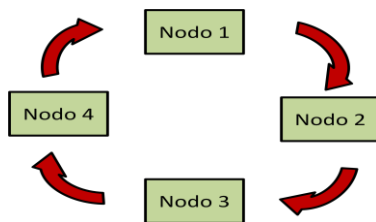
Adaptación de (REYNDERS, y otros, 2003), p. 36

Dentro de sus ventajas se puede mencionar que es fácil añadir o remover nodos, además que si algún nodo falla, no afecta a la red; mientras que entre sus desventajas se encuentra que si el *Hub* falla, toda la red falla, igualmente esta topología requiere de gran cantidad de cable.

- **Topología Anillo**

En el funcionamiento de esta red, el mensaje es transmitido secuencialmente desde un nodo hasta otro en un orden predefinido. Los nodos son arreglados dentro de un bucle cerrado, de manera que el nodo que envía inicialmente el mensaje, es exactamente el último en recibirlo (acuse de recibo).

Figura 44. Red Anillo



Adaptación de (REYNDERS, y otros, 2003), p. 37

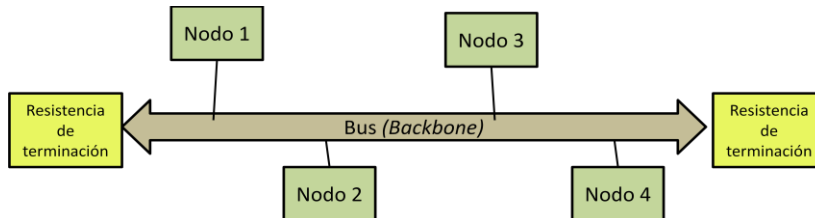
Entre sus ventajas se encuentra que posee mínimos requerimientos de cable, el mensaje puede ser automáticamente reconocido, no se necesita de un gabinete o centro de cableado para dicho fin. Pero en cuanto a sus desventajas se encuentran el que si algún nodo falla, toda la red falla; hay un límite de distancia entre cada nodo, es difícil realizar diagnósticos y tratamientos de error dado que la comunicación es de una sola vía.

- **Topología Bus**

Este tipo de red consta de un cable principal al que también se le conoce como *backbone*, y es a este cable donde se conectan los nodos necesarios. El mensaje viaja a lo largo del bus, todos los nodos “escuchan” dicho mensaje, pero sólo el nodo destinatario es el que recibe la información, de manera que el mensaje llega a todos los nodos al mismo tiempo y no nodo por nodo, es decir, es una conexión en paralelo. Cuando el mensaje llega al final del cable, se deben tener activas resistencias eléctricas de terminación que

absorberán la energía de dicho mensaje evitando así reflexiones que interfieran con otros mensajes que se encuentren en simultáneo a lo largo del bus.

Figura 45. Red Bus



Adaptación de (BEASLEY, 2008), p.6

Como ventajas de este tipo de red se pueden destacar que se requiere relativamente poca cantidad de cable; es fácil añadir o remover nodos; y entre sus desventajas, dado que cada nodo puede leer la información que está viajando en el bus, y entre quienes se está dando la comunicación, no hay seguridad para proteger dicha información.

1.3.4.1.3 Dispositivos

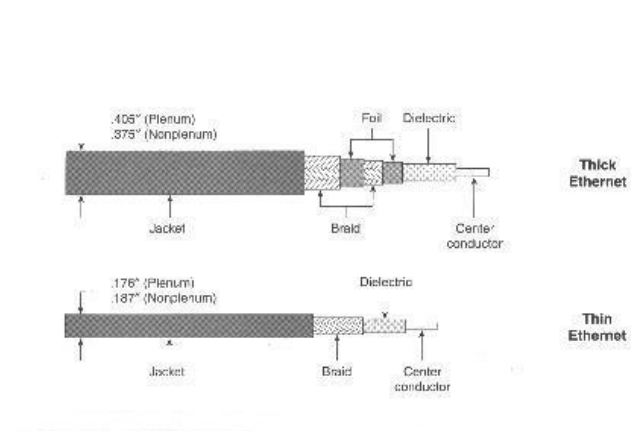
Al hacer referencia a dispositivos, se habla de tipos de cables, conectores y equipos mínimos necesarios para una red Ethernet.

Dentro de los tipos de cables, se distinguen tres, que son, coaxial, par trenzado y fibra óptica.

- **Cable Coaxial**

Se llama coaxial porque el cable conductor, el dieléctrico, y el revestimiento que envuelve dicho cable comparten el mismo eje central (ver Figura 46).

Figura 46. Cable Coaxial

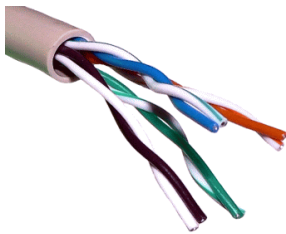


Fuente: tomado de (STERLING Jr, y otros, 2003), p. 167.

- **Par Trenzado**

Es el cable que actualmente es el más empleado en redes de Ethernet. Se denomina de esta manera debido a que cada par de conductores vienen envueltos el uno alrededor del otro para aumentar la inmunidad contra el ruido. Este cable consta de 4 pares.

Figura 47. Par Trenzado



Fuente: James Madison University³⁵

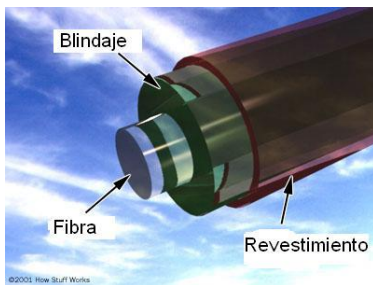
35

http://www.google.com.co/imgres?imgurl=https://users.cs.jmu.edu/bernstdh/web/common/lectures/images/twisted-pair-cable.gif&imgrefurl=https://users.cs.jmu.edu/bernstdh/web/common/lectures/slides_transmission-media.php&h=285&w=350&sz=19&tbnid=1cjgkIGPIHjxrM:&tbnh=98&tbnw=120&prev=/images%3Fq%3Dtwisted%2Bpair%2Bcable&hl=es&usq=__5d3Dhlc3M4etBj7YWovSJKCq-ms=&ei=4ka5SobqC-aStgekvvXsDg&sa=X&oi=image_result&resnum=4&ct=image

- **Fibra Óptica**

Un cable de fibra óptica, como su nombre lo indica, consiste de una delgada fibra de vidrio por medio del cual viaja la información en forma de luz, rodeado de un blindaje, que sumado a las propiedades de la fibra se garantiza que el cable no emite ni recibe interferencias (ver Figura 48).

Figura 48. Fibra Óptica



Fuente: adaptación de <http://www.howstuffworks.com/fiber-optic.htm>

- **Conectores Par Trenzado**

Los conectores más comunes para este cable es el conocido RJ-45 (ver Figura 49).

Figura 49. Conector RJ-45



Fuente: tomado de <http://www.networkwebcams.com/ip-camera-learning-center/2008/08/15/glossary-term-rj-45-ethernet-network-connections/>

El RJ-45 de la imagen anterior es el más empleado a nivel de oficinas; pero para aplicaciones industriales éstos vienen modificados con empaques que garantizan hermeticidad y excelente adherencia ante vibraciones.

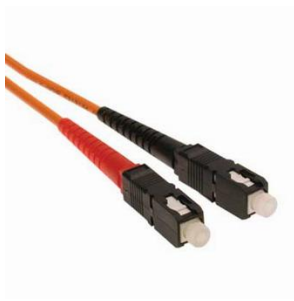
- **Conectores Fibra Óptica**

La importancia de los conectores de fibra óptica se encuentra en el alineamiento de las fibras que se van a conectar, -tanto del cable como del dispositivo a conectar-, deben estar perfectamente alineadas, pues como los diámetros de estas fibras están alrededor de los 9µm (50 µm en otras fibras)³⁶, el mínimo desalineamiento entre dichas fibras hará que la señal se pierda en dicha conexión.

Se encuentran los siguientes tipos.

- **SC**
- **ST**
- **LC**
- **MT-RJ**

Figura 50. Conector SC



Fuente: <http://www.tech-faq.com/sc-connector.shtml>

Figura 51. Conector ST



Fuente: <http://www.tech-faq.com/st-connector.shtml>

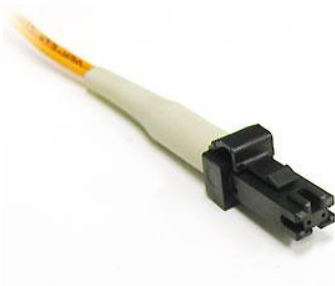
³⁶ (STERLING Jr, y otros, 2003), p. 179.

Figura 52. Conector LC



Fuente: <http://www.timbercon.com/LC-Connector.html>

Figura 53. Conector MT-RJ



Fuente: <http://www.timbercon.com/MT-RJ-Connector.html>

- **Interfaz de Estación Ethernet**

Todo equipo que se va a conectar a una red Ethernet necesita de una interfaz que le permita lograr dicho objetivo; es aquí donde se conectarán los cables de red, sea par trenzado o fibra óptica. Para equipos industriales las velocidades comunes son de 10 y 100Mbps, siendo esta última la más empleada; velocidades de Gigabit Ethernet (1000Mbps) son empleadas para conexiones de servidores y líneas backbone.

Figura 54. CP 343-1 Advanced-Interfaz Ethernet Siemens



Fuente: https://www.automation.siemens.com/net/html_76/produkte/040_simatic_s7_300.htm

- **Repetidores**

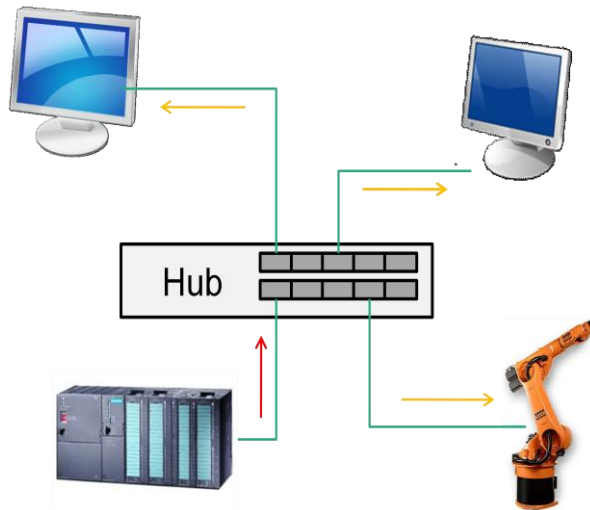
Es un dispositivo que toma la señal Ethernet y la amplifica. Se usa para extender el tamaño físico de la red cuando la aplicación e instalación así lo requiere; con él se logra disminuir la atenuación de la señal que se pueda dar por la longitud física de la red.

- **Concentrador o Hub (Repetidor Multipuerto)**

Un concentrador o hub es un repetidor multipuerto, pues como su nombre lo indica, posee un número determinado de puertos en los cuales se conectan equipos. La señal proveniente de cualquiera de estos equipos es transmitida a todos y cada uno de los puertos, y por tanto, a todos los equipos que se encuentren conectados en él (ver Figura 55).

Un concentrador no es un dispositivo inteligente, pues como se mencionó anteriormente simplemente retransmite la información proveniente de un equipo a todos los demás sin analizar el mensaje, es decir, no sabe quien envía el mensaje ni hacia quien va dirigido. En un concentrador el ancho de banda disminuye según el número de equipos conectados, por esta razón no es empleado en redes industriales.

Figura 55. Hub o Concentrador



Fuente: los autores³⁷

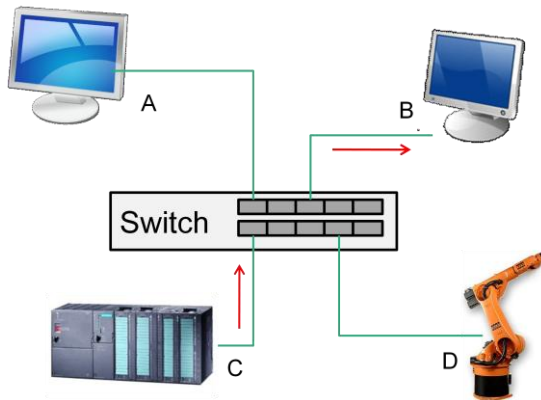
- **Conmutador o Switch**

Un switch realiza la misma función de un hub, pero de manera inteligente, pues éste sabe de dónde viene la información y a quien va dirigido, de manera que el resto de equipos conectados al switch no recibirán la información (ver Figura 56).

Los equipos en Ethernet pueden trabajar en modo semi-duplex o full-duplex. Como se mencionó al principio de este apartado, los puertos en modo semi-duplex no pueden recibir y transmitir información de manera simultánea, de lo contrario esto será una colisión. En modo full-duplex, se puede dar la simultaneidad, significando ello que aumenta el ancho de banda, es decir, si una estación transmite a 100Mbps y recibe a 100Mbps entonces está operando a 200Mbps; esto es de gran utilidad para las redes industriales.

³⁷ Imagen de plc tomada de http://www.automation.siemens.com/simatic/controller/html_76/produkte/simatic-s7-300.htm
Imagen de robot tomada de http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial_robots/medium/kr30_3/start.htm

Figura 56. Switch o Conmutador



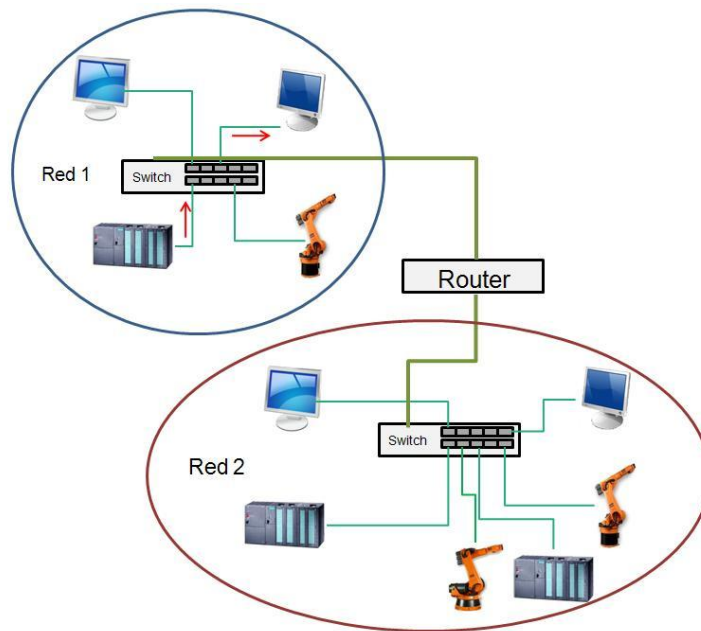
Fuente: los autores³⁸

- **Enrutador o Router**

Posee el mismo funcionamiento del conmutador, pero con mayores ventajas. Al igual que el switch, el enrutador también sabe de dónde viene la información y hacia a dónde va, la diferencia radica en que el reconocimiento emisor-receptor en un switch se hace por medio de una dirección única y específica de cada máquina que viene de fábrica, a esta dirección se le denomina dirección MAC, mientras que el router hace el reconocimiento por direcciones de redes decir, dirección IP, pudiéndose ésta modificar cuantas veces sea necesario. Los switches se usan para interconectar dispositivos; los routers se usan para interconectar no solo equipos sino redes entre sí, por esta razón son empleados para conexión a internet; pues éstos deben ser configurados para establecer su modo de operación, cómo tratar la información y demás parámetros, un switch no necesita de ello (ver Figura 57).

³⁸ Imagen de plc tomada de http://www.automation.siemens.com/simatic/controller/html_76/produkte/simatic-s7-300.htm
Imagen de robot tomada de http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial_robots/medium/kr30_3/start.htm

Figura 57. Router o Enrutador



Fuente: los autores³⁹

- **Direccionamiento IP**

IP (Internet Protocol) es el mecanismo por medio del cual se puede reconocer un equipo con una dirección unívoca que dependerá de la red sobre la cual esté trabajando el equipo conectado. La dirección IP se emplea no solo para reconocer el equipo conectado sino también a qué red se encuentra conectado, para ello se hace uso de dos direcciones, la IP y la máscara de subred.

Una dirección IP es un número de 32 bits que se divide en cuatro secciones llamadas *octetos* o *bytes*, separados por medio de puntos, que son un conjunto de 8 bits cada uno, esto para la versión 4, es decir, IPv4, existe la IPv6, pero IPv4 es el más empleado.

Dado que es tedioso tratar con números binarios, dicha dirección se escribe en decimal.

³⁹ Imagen de plc tomada de http://www.automation.siemens.com/simatic/controller/html_76/produkte/simatic-s7-300.htm
Imagen de robot tomada de http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial_robots/medium/kr30_3/start.htm

Existen cuatro tipos de IP, pero solo tres son los más empleados, que son los que aparecen consignados en la siguiente tabla.

El rango que aparece consignado se ha estandarizado para redes privadas.

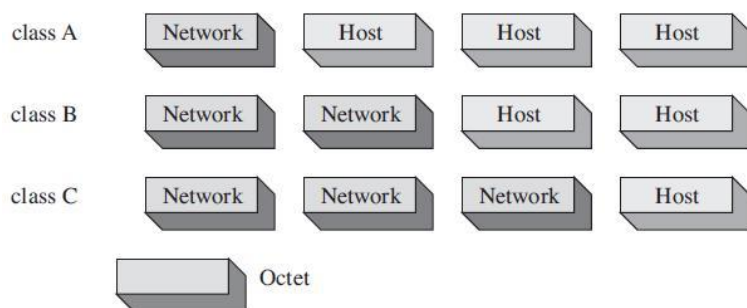
Tabla 2. Clases de dirección IP

CLASE	DESCRIPCIÓN	MÁX. NUMERO DE HOSTS ⁴⁰	RANGO
A	Redes grandes, i.e: Gobiernos	16'777.214	10.0.0.0 a 10.255.255.255
B	Compañías medianas, universidades, etc	65.534	172.16.0.0 a 172.31.255.255
C	Pequeñas redes	254	192.168.0.0 a 192.168.255.255

Fuente: adaptación de (BEASLEY, 2008), p. 15-173.

La diferencia entre estas clases se encuentra en la cantidad de bits asignados tanto para representar la red como el host como lo indica la siguiente figura.

Figura 58. Designación de bits en dirección IP



Fuente: (BEASLEY, 2008), p. 172.

De la imagen anterior se deduce que para una dirección clase A, 8 bits son para designar la red y 24 para designar el host; en una dirección clase B, 16 bits son para la red y 16 son para el host, y finalmente, para una clase C, 24 bits son para la red y 8 bits son para el host.

Una máscara de red identifica cuáles bits en la dirección IP son empleados para representar la red y cuáles para representar el host.

⁴⁰ Host se refiere al equipo o usuario final.

Por ejemplo, para una dirección IP cualquiera, 192.168.0.3, a primera vista se puede inferir que se trata de una dirección que pertenece a una red pequeña, es decir, clase C, pero para que el router sepa que se trata de una dirección de clase C, la máscara de subred será 255.255.255.0, en donde los tres primeros octetos (255) indican que se está empleando todos los tres primeros octetos de la IP para designar la red, y el “0” de la máscara indica que el último octeto de la dirección IP corresponde a la dirección del host.

Es decir, si existen dos equipos conectados en una misma red, uno con dirección 192.168.0.3 y el otro es 192.168.0.34; la máscara de subred para cada equipo debe ser 255.255.255.0, indicando que el equipo número “3” y el número “34” se encuentran dentro de la misma red, esta es, la red número 192.168.0.

1.3.4.2 Profibus

Tomando la definición que da *Profibus International*, Profibus (**Process Field Bus**) es un sistema de comunicación digital y abierto –es decir, es estandarizado- con un amplio rango de aplicaciones, particularmente en campos de fábrica y procesos de automatización. Profibus es apropiado para aplicaciones que implican tiempos críticos como tareas complejas de comunicación.⁴¹

A continuación se detalla una tabla con las características más relevantes de Profibus.

Tabla 3. Características de Profibus

Estándar	EN 50 170
Velocidad de Transferencia	9,6 – 1500Kbps; máx. a 12Mbps
Medio de Transmisión	Eléctrico: par trenzado apantallado Óptico: fibra óptica (cristal y plástico)
Máx. Número de Participantes	127 (maestro + esclavo)
Distancia de Red	Eléctrica: máx. 9,6 Km (depende de velocidad) Óptica: >100Km (depende de velocidad)
Topología de Red	Bus, árbol, estrella, anillo
Aplicaciones	Niveles de campo y de célula

Fuente: tomado de (PIEDRAFITA MORENO, 2004), p 281.

⁴¹ (PROFIBUS INTERNATIONAL, 2002), p 4.

El medio más empleado es el eléctrico, el puerto para este es del tipo RS-485. A continuación se muestra el aspecto de ambos.

Figura 59. Cable Profibus y puerto RS-485



Fuente: Catálogo Comunicación Industrial IK-PI 2009, Siemens; p. 4/24-4/38.

Existen tres diferentes protocolos de Profibus que son:

1.3.4.2.1 PROFIBUS DP (Decentralized Peripherals):

Sirve para conectar unidades periféricas descentralizadas, como por ejemplo accionamientos con tiempos de reacción muy cortos. PROFIBUS DP se utiliza cuando los actuadores/sensores en la máquina o en la instalación (p. ej.: nivel de campo) están distribuidos. Los actuadores/sensores se conectan a los aparatos de campo. Éstos son abastecidos con datos de salida según el procedimiento de maestro/esclavo y suministran los datos de entrada al PLC o al PC. El carácter abierto de PROFIBUS DP permite conectar también componentes normalizados de otros fabricantes.

1.3.4.2.2 PROFIBUS PA (Process Automation):

Amplía PROFIBUS DP con la transmisión de datos y energía con seguridad intrínseca (p. ej.: transmisores para la industria alimentaria) según la norma internacional IEC 61158-2 (mismo protocolo, distinta norma de transmisión física de señales). PROFIBUS PA se utiliza principalmente en atmósferas potencialmente explosivas como refinerías (química, petróleo y gas).

1.3.4.2.3 PROFIBUS FMS (Fieldbus Message Specification):

Para la comunicación de datos de sistemas de automatización de distintos fabricantes. Permite solucionar también, de forma descentralizada y precisa, tareas generales de regulación y medición, además de las tareas de control de movimiento.

En la siguiente tabla se muestran algunas características de los diferentes protocolos de Profibus.

Tabla 4. Características Protocolos Profibus

	PROFIBUS DP	PROFIBUS FMS	PROFIBUS PA
Utilización	Nivel de campo	Nivel de célula	Nivel de campo y célula
Estándar	EN 50 170	EN 50 170	IEC 61158-2
Equipos conectables	Equipos de campo, accionamientos, válvulas, OPs, PLCs, PCs.	PLCs, PCs, equipos de campo	Equipos de campo, accionamientos, válvulas, OPs, PLCs, PCs.
Tiempo de Reacción	1 a 5 ms	Menor de 60ms	Menor de 60ms
Distancia	Sobre 100Km	Sobre 100Km	Máx. 1,9Km
Velocidad	De 9,6 Kbps a 12Mbps	De 9,6Kbps a 1,5Mbps	31,25Kbps

Fuente: tomado de (PIEDRAFITA MORENO, 2004), p 282.

Dentro del protocolo Profibus DP se manejan tres tipos de dispositivos:

1.3.4.2.4 DP Maestro Clase 1 (DPM1):

Es un controlador central que cíclicamente intercambia información con las estaciones distribuidas (esclavos) en un especificado ciclo de mensaje. Normalmente, un DPM1 es un PLC o un PC.

1.3.4.2.5 DP Maestro Clase 2 (DPM2):

Son todos los dispositivos de ingeniería, configuración y operación, como por ejemplo los paneles de control.

1.3.4.2.6 DP Esclavo:

Es cualquier periférico (dispositivos de entradas/salidas, accionamientos, HMI, válvulas, transductores, etc.), que lee información dentro del proceso y/o usa las salidas de información de dicho proceso para intervenir en el mismo. ⁴²

Dentro de los dispositivos de campo que soporta Profibus, se encuentran los siguientes:

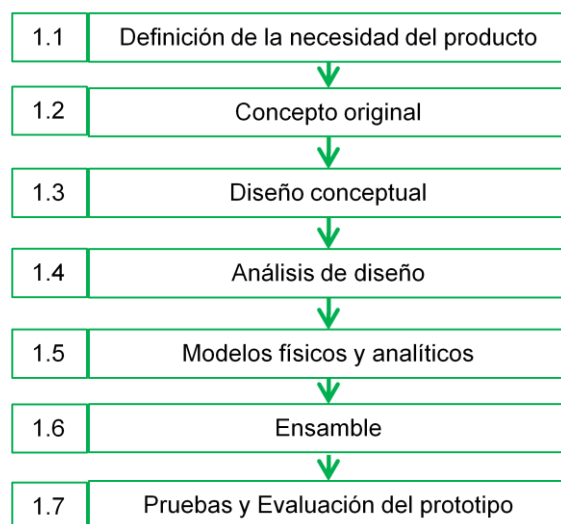
- Módulos de entrada/salida digitales/análogos.
- Paneles de operador
- Variadores de frecuencia
- Control de motores paso a paso
- Control de servomotores
- Lectores de códigos de barras
- Controles de robots
- Dispositivos tanto neumáticos como hidráulicos, entre otros

⁴² (PROFIBUS INTERNATIONAL, 2002), p 12.

2. METODOLOGIA

Tomando como punto de partida la metodología expuesta en Elementos de Maquinas de Hamrock⁴³, en la teoría de diseño como tarea multidisciplinaria se desarrollaron una serie de pasos para llegar a la construcción final del prototipo de un sistema Robótico Cartesiano entre los que se encuentran:

Figura 60. Metodología de Diseño



Fuente: Adaptación de (HAMROCK, y otros, 2000), pág. 5.

2.1 Definición de la necesidad del producto

Se requiere un prototipo de un sistema Robótico Cartesiano para prácticas de laboratorio en las facultades de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Industrial.

⁴³ (HAMROCK, y otros, 2000), p 5

2.2 Concepto original

Se requiere un sistema robótico cartesiano para ilustrar de manera didáctica y con tecnología industrial procesos que forman parte de las asignaturas: *Métodos de Optimización*, y *Localización y Distribución de Plantas* para el caso de la facultad de Ingeniería Industrial y *Sistemas Automáticos de Control* para la facultad de Ingeniería Mecánica. Es importante que se haga uso de diversas tecnologías usadas en la industria.

2.3 Diseño Conceptual

Se planteo la construcción de un sistema robótico tipo cartesiano con desplazamiento en tres ejes (x-y-z); con carreras útiles aproximadas a 1000 X 700 X 350mm, con la función de sujetar, desplazar, almacenar una carga de hasta 3 kg de peso de un punto a otro; y que a su vez usara para el movimiento de los ejes tecnologías diferentes de accionamiento como lo son, motores paso a paso y servomotores.

2.4 Análisis de Diseño

Teniendo en cuenta el concepto de diseño y los requerimientos preliminares en cuanto a dimensiones, carga a levantar, y funciones del sistema robótico cartesiano, se hizo necesario emplear teorías de flexión pura en vigas, columnas y análisis dinámico para realizar los respectivos cálculos estructurales del prototipo y a su vez optar por un sistema de sujeción neumático teniendo presente lo planteado en el concepto original de hacer uso de diversas tecnologías empleadas en la industria.

2.5 Modelos Físicos y Analíticos

Para exponer un modelo físico del prototipo se tomo la decisión de hacer uso de partes prefabricadas y tomando como parámetro de selección los cálculos de diseño establecidos en el análisis de diseño y que están consignados en el capítulo 2.1 de Diseño mecánico.

Para este tipo de proyectos de automatización donde se hacía énfasis en usar diversas tecnologías no solo son necesarios los cálculos para la estructura, sino tener en cuenta que las tecnologías seleccionadas en cuanto a control y movimiento fueran compatibles.

Fue necesario recopilar información en el campo de robótica y automatización por medio de literatura localizadas en las bibliotecas de las universidades Pontificia Bolivariana y

Autónoma de Bucaramanga. A su vez se comenzó a estudiar los fabricantes de piezas para este tipo de sistema robótico cartesiano.

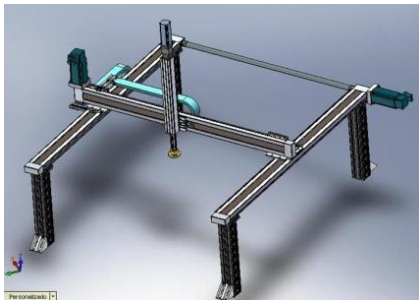
Los fabricantes que estuvieron en estudio fueron SIEMENS, BOSCH y FESTO, de los cuales fueron seleccionados FESTO y SIEMENS.

SIEMENS fue el primero en seleccionarse debido a la alta capacidad de comunicación y programación de sus PLC's S7-300; y que a su vez cumplía con el parámetro de usar diferentes tecnologías en un mismo proyecto.

En cuanto a la estructura se seleccionó FESTO, que permitió cumplir con los requerimientos de tamaño que establecen los condicionamientos didácticos con los que se efectúan las construcciones de los laboratorios en la Universidad Pontificia Bolivariana.

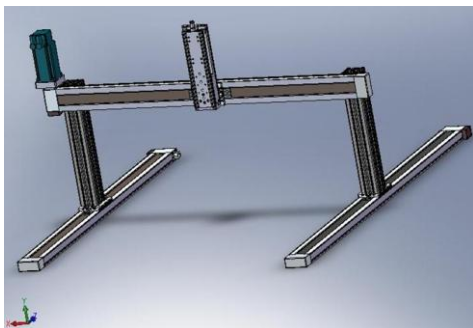
Dadas las condiciones de operación y de espacio requeridos, se estudiaron dos diferentes modelos como lo son el tipo puente grúa y tipo pórtico.

Figura 61. SISTEMA TIPO PUENTE GRUA



Fuente: Los autores

Figura 62. SISTEMA TIPO PORTICO



Fuente: Los autores

Se optó por el sistema tipo puente grúa pensado en:

- La facilidad de la visualización didáctica del proceso.
- Pensando en futuras prácticas de laboratorios donde se implementara métodos manuales, es necesario que el sistema Robótico cartesiano esté a una altura del suelo considerable, en este caso un metro de altura.
- Factor costos, influyó en la decisión de este sistema puesto que cumplía con los requerimientos planteados en los objetivos del proyecto.

2.6 Ensamble ó Manufactura

Después de haber seleccionado fabricantes, se procedió a la selección de las partes prefabricadas y de control necesarias para el prototipo. Seguidamente se hace la orden de compra y posteriormente se inicia el proceso de ensamble.

Los detalles del ensamble del prototipo están consignados en el capítulo 3 de este libro.

2.7 Pruebas y Evaluación del prototipo

Después de ensamblado el sistema Robótico cartesiano se procedió a realizar pruebas de comunicación y parametrización de los respectivos sistemas montados en el prototipo.

Todos los procedimientos realizados para las pruebas y puesta en marcha del sistema robótico cartesiano están consignados en el capítulo 4 de este libro.

3. DISEÑO

Dado que el presente proyecto nace a partir de una necesidad de la facultad de Ingeniería Industrial, en el primer semestre de 2008 se llevaron a cabo varias reuniones con docentes de dicha facultad para encontrar la manera más conveniente de solventar dicha necesidad. Como fruto de estas reuniones, y siguiendo la metodología nombrada en el primer capítulo, se concluyó que el sistema debe comprender las siguientes características:

- Debe ser capaz de levantar y mover una carga máxima de 3Kg. Aunque los elementos a manipular serán vehículos de juguete que se encuentran en el laboratorio de simulación del salón G-402. Se deben implementar tareas como selección de piezas, almacenamiento, entre otras.
- Debe ofrecer flexibilidad para que los estudiantes de la facultad de Ingeniería Industrial desarrollen prácticas de laboratorio en donde se puedan realizar diferentes programaciones del sistema para comprobar el rendimiento de un proceso industrial (como las tareas antes mencionadas) dentro del marco de algunas asignaturas como por ejemplo *Métodos de Optimización y Localización y Distribución de Planta*. De igual forma, los estudiantes de la facultad de Ingeniería Mecánica también deberán poder realizar prácticas de laboratorio bajo el marco de asignaturas como por ejemplo *Sistemas Automáticos de Control*.
- Debe ser totalmente didáctico.
- Debe ser abierto, de manera que sea fácilmente acoplable a futuros proyectos de integración –y por tanto de expansión- que complementen el proceso a simular, es decir, debe ser modular.
- Debe contemplar el uso de diferentes tecnologías de accionamiento que se encuentren normalmente en la industria; igualmente, debe evitarse el uso de una sola marca proveedora de equipos, aplicando así diferentes mecanismos, protocolos o tecnologías de comunicación entre los dispositivos instalados.

Teniendo en cuenta los anteriores parámetros, el presente capítulo está distribuido en dos subtemas que son;

2.1 Diseño Mecánico

2.2 Diseño del Automatismo

3.2 Diseño Mecánico

Al hablar de diseño mecánico se hace referencia al diseño de elementos como, estructuras y elementos neumáticos.

3.2.1 Diseño Estructural – Estudio de alternativas

En una etapa inicial, propuso un sistema cartesiano ubicado de manera vertical para aprovechamiento de espacio partiendo de modelos de aplicaciones existentes que, en este caso, ya han sido desarrolladas por la firma Festo, como se muestra a continuación.

Figura 63. Modelo Inicial



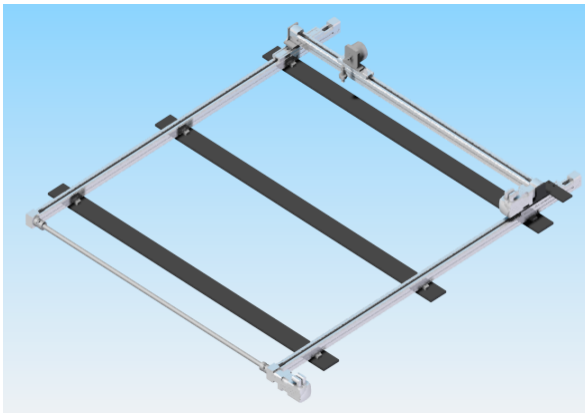
Fuente: adaptación del catálogo de productos Festo Didactic 2008, p 32.

Este prototipo hace parte de un modelo de producción de piezas mecanizadas elaborado por Festo. Las dimensiones propuestas para el área de almacenamiento, que es igualmente el área que debía cubrir el sistema cartesiano aparecen en la imagen. El

recuadro de color rojo muestra el área de almacenamiento, la elipse de color azul muestra los accionamientos del sistema cartesiano.

A continuación se muestra la propuesta de construcción según las dimensiones antes consignadas.

Figura 64. Propuesta inicial



Fuente: los autores.

Este prototipo contemplaba el uso de servomotores para accionar los ejes X-Y y de un actuador neumático rotativo para el eje Z, así como el uso de vacío para la sujeción de piezas. En base a este diseño se hicieron las primeras cotizaciones.

Se desistió de este prototipo por la poca flexibilidad que ofrece, pues el sistema estaría limitado solamente al almacenamiento y no podría en ningún momento intervenir en el proceso de ensamble del vehículo, así como seleccionar piezas y alimentar otras bandas que hacen parte del proceso.

Luego, tomando como referencia las grúas tipo pórtico que se encuentran en los puertos marítimos como la que se ve en la siguiente figura, se propuso otro modelo de sistema cartesiano.

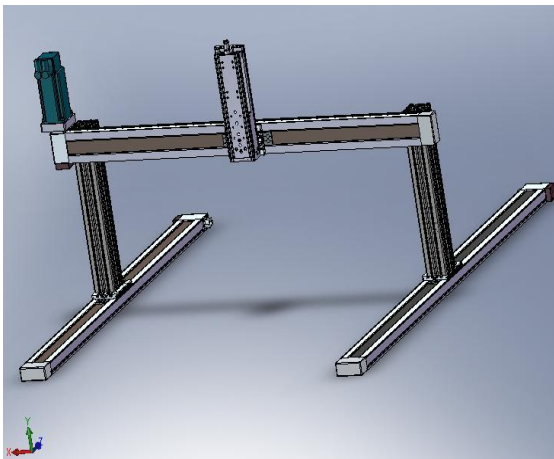
Figura 65. Sistema pórtico



Fuente: <http://www.nauticexpo.es/prod/konecranes/grua-de-astillero-grua-portico-30447-189115.html>

El prototipo propuesto fue el siguiente.

Figura 66. Propuesta sistema pórtico



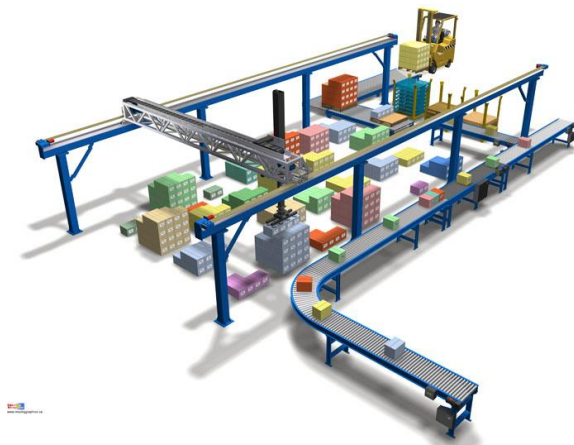
Fuente: los autores.

Este modelo fue descartado por los elevados momentos flexionantes que se generan en la estructura vertical debidos a su mismo peso y al de la pieza a sujetar –valor nominal de 3Kg-, y a la velocidad a la que se debe realizar el desplazamiento del sistema, esto también conlleva a altas vibraciones. De igual forma, también ofrecía poca flexibilidad si

se llegaba a necesitar que el sistema participara en parte del proceso de ensamble y de selección de piezas, es decir, al igual que la propuesta inicial, estaría limitado a tareas de almacenamiento.

Finalmente, se propuso el sistema puente grúa como el que se aprecia a continuación.

Figura 67. Sistema puente grúa

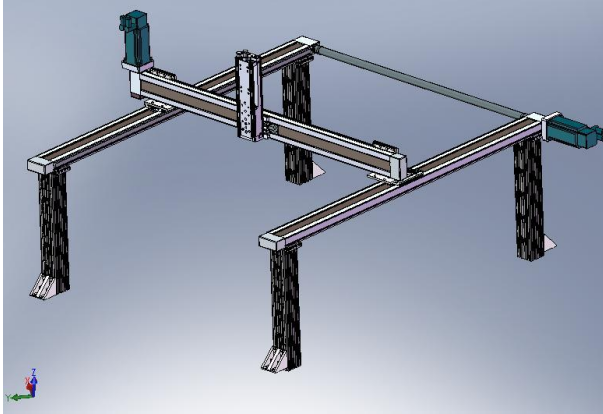


Fuente: http://www.rmtrobotics.com/warehouse_rpm.html

Este sistema permite la flexibilidad que se busca, pues no se limita al proceso de almacenamiento, sino también al de manipulación de piezas, así como se puede integrar en parte del proceso de ensamble, además de que se pueden lograr mayores velocidades y levantar también la carga nominal de 3Kg.

La primera propuesta basada en este prototipo es la que se ve a continuación

Figura 68. Prototipo sistema puente grúa



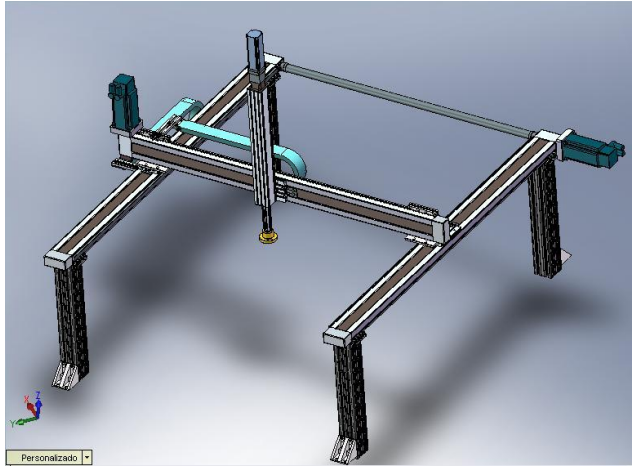
Fuente: los autores.

Este modelo consta de servomotores accionando los ejes X-Y, el eje Z es accionado neumáticamente. Este último accionamiento fue rechazado, pues al ser neumático implica un alto consumo de aire, fuera del sistema de vacío para sujetar la pieza, además limita el eje a algunas posiciones diferentes de altura, y por cada una de ellas se hace necesario el empleo de sensores, lo cual además de aumentar los costos, hace más compleja la instalación.

Como el proyecto requiere vincular el empleo de varias tecnologías eléctricas de accionamiento de los ejes, se estableció que los ejes X-Y serán accionados por motores paso a paso, y el eje Z por servomotor, permitiendo ello lograr una gran variedad de posiciones y con un rango alto de precisión.

El modelo final se presenta en la Figura 69.

Figura 69. Propuesta final sistema puente grúa



Fuente: los autores.

Fue en base a este modelo que se realizaron las diferentes cotizaciones, seleccionando como proveedor final la marca Festo por las razones mencionadas en apartados anteriores, como por ejemplo, el soporte técnico (pues hay representación de la firma en la ciudad) y el tamaño de los productos se prestaba para los fines didácticos que se buscan.

Los criterios de selección de los componentes estructurales se muestran a continuación.

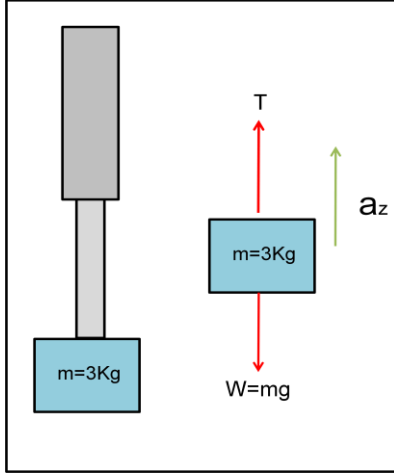
3.2.2 Selección de Ejes

Teniendo en cuenta las condiciones mencionadas al inicio de este capítulo, se procedió de la siguiente manera.

3.2.2.1 Eje Z

Se inicia desde aquí, pues es finalmente éste el sistema que va a levantar la carga de los 3Kg.

Figura 70. Modelo eje Z



Fuente: los autores

Se ha establecido que la aceleración que experimentará la carga será de $0,4\text{m/s}^2$, para lograr velocidades de 400mm/s , es decir, $0,4\text{m/s}^{44}$. Desarrollando el modelo de la figura anterior se tiene lo siguiente.

$$\sum F_z = T - mg = ma_z$$

$$T = 31.2\text{N}$$

Luego, con ayuda del software *Positioning Drives*⁴⁵, se encontraron algunas posibles soluciones, se tomó uno al azar y de allí se obtuvo el diámetro del elemento sobre el que se desarrollará el torque, tal valor es de $0,01\text{m}$ así.

$$\tau = T \left(\frac{d}{2} \right)$$

$$\tau = 0.156\text{Nm}$$

⁴⁴ También cabe resaltar que la gravedad en todo momento se ha tomado como 10m/s^2 , además para el cálculo inicial de todos los dispositivos se empleó el software *Positioning Drives* de la firma Festo, el cual hace algunas sugerencias de componentes para satisfacer dicho fin, y por tal razón, de allí se tomaron algunos valores como los diámetros en los cuales se ejercen los torques.

⁴⁵ *Positioning Drives* es un software desarrollado por Festo para el dimensionamiento y selección de accionamientos eléctricos.

Por tanto, para levantar la carga de 3Kg a una aceleración de 0.4m/s^2 se requiere aplicar un torque de 0.156N-m.

Dentro de la gama de productos de Festo, hay varias soluciones para esta aplicación en particular, se optó por la serie DNCE, que son cilindros para accionamiento eléctrico basados en la anatomía de los cilindros neumáticos que fabrica la misma empresa; estos cilindros realizan el recorrido por medio de un tornillo de bolas recirculantes, de manera que el diámetro que se empleó para determinar el torque es el diámetro de dicho tornillo, es decir, 10mm, el cual es también la constante de avance para este dispositivo (ver Figura 71).

Figura 71. Datos mecánicos DNCE

Datos mecánicos									
Tamaño	32			40			63		
Ejecución con husillo	LS-"1,5"P	BS-"3"P	BS-"10"P	LS-"2,5"P	BS-"5"P	BS-"12,7"P	LS-"4"P	BS-"10"P	BS-"20"P
Paso de la rosca del husillo [mm/U]	1,5	3	10	2,5	5	12,7	4	10	20
Diámetro del husillo [mm]	9	10	10	12,5	12	12,7	20	20	20
Fuerza estática axial máxima [N]	600	600	600	1 400	1 400	1 400	3 700	3 700	3 700
Fuerza máx. de avance $F_x^{(1)}$ [N]	300	300	350	600	525	800	1 000	2 500	1 625
Fuerza continua de avance ⁽¹⁾ [N]	300	240	280	600	420	640	1 000	2 000	1 300
Momento máx. de impulsión ⁽²⁾ [Nm]	0,4	0,4	0,8	1,15	0,9	1,9	3	4,9	5,9
Momento de impulsión en detención con montaje axial ⁽³⁾ [Nm]	0,08	0,08	0,08	0,12	0,12	0,12	0,3	0,2	0,2
Momento de impulsión en detención con montaje en paralelo ⁽³⁾ [Nm]	0,13	0,13	0,13	0,22	0,22	0,22	0,6	0,5	0,5
Momento de impulsión permanente [Nm]	0,4	0,3	0,6	1,15	0,8	1,6	3	4,1	4,8
Fuerza axial máxima ⁽⁴⁾ [N]	120	120	120	260	260	260	300	300	300
Velocidad máxima [m/s]	0,06	0,15	0,5	0,07	0,25	0,64	0,07	0,5	1,0
Velocidad de giro máxima	2 400	3 000	3 000	1 650	3 000	3 000	1 050	3 000	3 000
Aceleración máxima [m/s ²]	1	6	6	1	6	6	1	6	6
Holgura en la inversión de sentido ⁽⁵⁾ [mm]	0,2	0,05	0,05	0,2	0,05	0,05	0,2	0,05	0,05
Precisión de repetición [mm]	±0,07	±0,02	±0,02	±0,07	±0,02	±0,02	±0,07	±0,02	±0,02

Fuente: catálogo de cilindros DNCE-Festo.

En base a los cálculos y tabla anteriores, se optó por el DNCE 32-400-BS-"10" P-Q, en donde 32 indica el tamaño, 400 la carrera útil (400mm), BS infiere que el husillo es con rodamiento de bolas, 10-P, el paso de la rosca del husillo, y Q indica que posee vástago antigiro. Al detallar los demás datos, como lo son la fuerza estática axial máxima, fuerza continua de avance, se observa que este cilindro está en plena capacidad de soportar mayores cargas a los 3Kg, por tanto se puede decir que es una acertada elección.

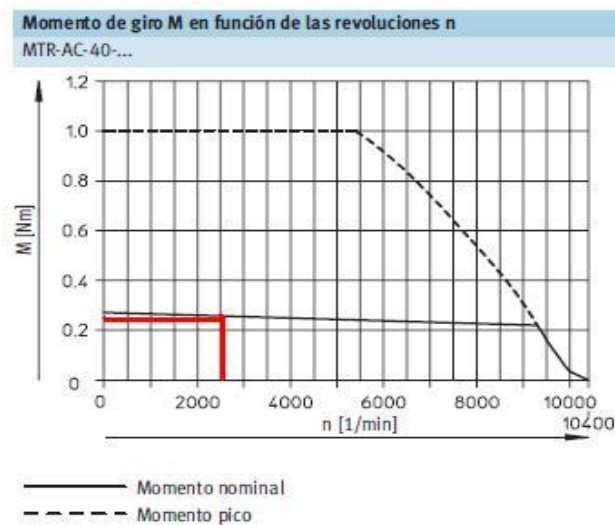
Para instalar este cilindro se necesitan de varios elementos para fijarlo al eje Y, Festo ofrece un dispositivo que sirve no solamente para esto, sino para evitar que el vástago por

alguna razón gire (a pesar que sea antigiro), este es la unidad FENG, que para la carrera útil que se tiene, se optó por el FENG-32-400-KF, cuyas guías son de bolas recirculantes.

Por otra parte, en lo concerniente al motor, se necesita de uno que ofrezca el torque requerido para este fin. Se determinó desde un principio que el tipo de motor que accionaría el eje Z sería del tipo servomotor. El software *Positioning Drives* hace varias sugerencias no solamente de cilindros, sino de motores; según las recomendaciones que hace, y según curvas características de catálogos, se llegó a la conclusión que el servo que mejor se adopta a esta aplicación es el MTR-AC-40-3S-AB.

Dadas la aceleración y velocidad que debe experimentar la carga, además del paso de la rosca del husillo, se determinó que el motor debe ir a 2400rpm, y al centrarse en las curvas características del motor, como se muestra en la Figura 72, se concluye que este motor cumple con los requisitos para dicha aplicación.

Figura 72. Curvas servomotor MTR-AC



Fuente: adaptación catálogo servomotores MTR-AC_Festo.

También cabe precisar que éste es el motor más pequeño dentro de este tipo, por tal razón, seleccionar uno más grande, de mayor capacidad implicaría sobrecostos y sobredimensionamiento. Se puede decir que finalmente, el eje Z consta de los siguientes componentes:

- Cilindro eléctrico DNCE 32-400-BS-“10” P-Q

- Guía antigiro FENG-32-400-KF
- Servomotor MTR-AC-40-3S-AB

Todo este conjunto tiene una masa total de 5,51Kg.

A continuación se muestra el aspecto del software *Positioning Drives*.

Figura 73. Parámetros de la carga en Positioning Drives

The screenshot displays the 'PositioningDrives - Version 1.3.1' software window. The interface is divided into several sections for configuring system parameters:

- Required input:**
 - Assembly position: A diagram shows a vertical assembly. Radio buttons are set to 'Vertical'.
 - Maximum moving mass: 3 kg.
 - Usable length: 400 mm.
 - Repetition accuracy: ±0,5 mm.
- Optional input:**
 - Additional external force: 0 N.
 - Motion profile: Radio buttons are set to 'Decelerating'.
 - Other options: 'Usable length, no restriction' is checked; 'Detailed motion profile' and 'Critical stroke' are unchecked.
- Axis type:**
 - Guide: 'Guide integrated' is checked.
 - Construction: 'Gantry axis' and 'Cantilever axis' are shown with diagrams; 'Cantilever axis' is selected.
- Axis technology:**
 - Options include 'Tooth belt', 'Spindle', and 'Direct drive'.
 - The 'Spindle' option is selected, showing a time range of 0,57 s...80,11 s.

On the right side, there is a sidebar with the 'FESTO' logo and a list of sections: 'Application', 'System parameters' (selected), 'Guide', 'Results', 'Parts list', and 'Project Data'. At the bottom right, there are links for 'Selection filter' and 'Report filter', and navigation arrows.

Fuente: los autores.

En esta sección se ingresan los datos de la carga a levantar. En la siguiente imagen se muestra el resultado que arroja del conjunto completo, es decir, cilindro, motor y controlador.

Figura 74. Resultados eje Z Positioning Drives

Parts list

Parts list					
Part No.	Amount	Unit	Order code 1	Item name	Stroke reserve
543122	1	ST	DNCE-32-400-BS-10-Q	Electrical cylinder	0,000 mm
xDKI	1	ST	FENG-32-400-KF	Guide Unit	
540300	1	ST	MTR-AC-40-3S-AB	Servo motor AC	
193846	1	ST	SEC-AC-305-P01	Controller	

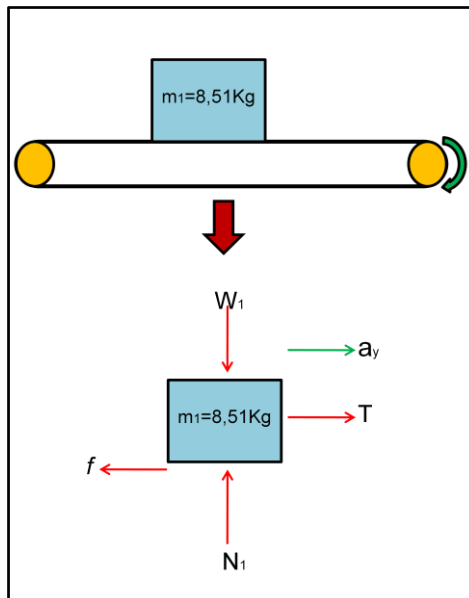
[Export](#) [Festo file format](#)

Fuente: los autores.

3.2.2.2 Eje Y

Para el eje Y, teniendo en cuenta que la carga que debe soportar no es solamente la de los 3Kg, sino la del conjunto del eje Z, la masa total a mover por este eje se llamará m_1 y tendrá un valor de 8,51Kg, A continuación se muestra el modelo.

Figura 75. Modelo Eje Y



Fuente: los autores.

Dado que este eje debe desarrollar una velocidad mayor con respecto al eje Z, se optó por ejes de correa dentada, pues dentro de los productos de Festo, se encuentran ejes neumáticos, y eléctricos que se clasifican según su accionamiento, que son, por tornillo de bolas recirculantes, y por correa dentada.

Desarrollando el modelo anterior, se obtiene lo siguiente.

$$\sum F_z = 0 \rightarrow N_1 - W_1 = 0$$

$$N_1 = W_1 = m_1 g$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow T - f = m_1 a_y$$

$$T = 28,934 N$$

La constante de rozamiento μ se tomó como un valor de 0.3, que es un valor promedio⁴⁶ y aproximado al que se presenta entre el carro del eje y las guías, pues al ser de correa dentada, la fricción entre éstas y los rodillos del eje es muy pequeña, y por tanto, se puede despreciar.

De la manera que se hizo con el eje Z, se empleó el software *Positioning Drives*, el cual daba varias recomendaciones para esta aplicación, por tanto, dentro de las múltiples soluciones se escogió uno de ellos, y de allí se obtuvo el valor del diámetro de los rodillos sobre los que se debe aplicar el par del motor el cual es de 20mm.

$$\tau = T \left(\frac{d}{2} \right)$$

$$\tau = 0,289 Nm$$

Por tanto, el torque requerido para mover todo el sistema a una velocidad de 0,4m/s, con una aceleración de 0,4m/s² debe ser 0,289N-m.

Teniendo en cuenta los datos anteriores, así como las recomendaciones del software de Festo y los catálogos de los mismos, se seleccionó el eje DGE-25-800-ZR-LK-RV-KF-GK, que es un eje de correa dentada, con guías de rodamientos de bolas y carrera útil de 800mm.

⁴⁶ Valor promediado de fricción de metal sinterizado sobre acero de entre los que se encuentran en la tabla 17.1 de Hamrock, p 787.

Figura 76. Datos mecánicos DGE 25-800 eje Y

Datos técnicos generales							
Tamaño		8	12	18	25	40	63
Construcción		Eje electromecánico con correa dentada y guía de rodamiento de bolas					
Guía		Guías con rodamiento de bolas					
Posición de montaje		Indistinta					
Carrera útil máxima ¹⁾	GK [mm]	1 ... 650	1 ... 1 000	1 ... 1 000	1 ... 3 000 ²⁾	1 ... 4 000 ²⁾	1 ... 4 500 ²⁾
	GV [mm]	–	–	1 ... 920	1 ... 2 900	1 ... 3 830	1 ... 4 250
	GA [mm]	–	–	–	1 ... 1 800	1 ... 1 800	–
Carga útil máxima	[kg]	1,5	3	6	20	50	120
Fuerza máx. de avance F_x	[N]	15	30	60	260	610	1 500
Par motor máximo	[Nm]	0,08	0,18	0,5	2,6	9,7	42
Momento de impulsión máximo en reposo ³⁾	[Nm]	0,05	0,08	0,2	0,5	1,0	4,5
Velocidad máxima	[m/s]	1	1,5	2	3	3	3
Aceleración máxima	[m/s ²]	15	20	20	50	50	50
Precisión de repetición	[mm]	±0,08			±0,1		

Fuente: adaptación catálogo de ejes DGE-Festo.

Como se aprecia en la Figura 76, este eje, de tamaño 25 se adapta perfectamente a los requerimientos de esta aplicación, pues si al ver los tamaños menores, por ejemplo, el DGE-18, la carga útil máxima que puede movilizar es de 6Kg, y este es un valor crítico, pues como se determinó anteriormente la masa del sistema del eje Z, junto con la carga a levantar suman 8,51Kg, y esta es una razón de peso (si no es la mayor) por la cual se eligió el tamaño 25, cuya carga útil máxima es de 20Kg.

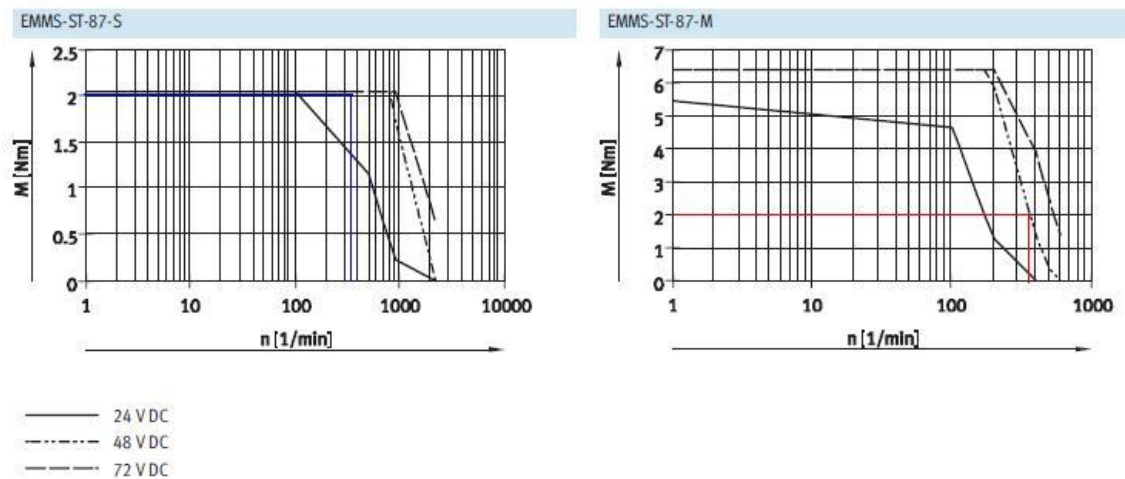
Con respecto al motor, se necesita de uno que al menos otorgue el torque de 0,289N-m; según requerimientos iniciales, se dijo que tanto el eje X como el Y deben ser accionados por motores paso a paso, de manera que con ayuda del software *Positioning Drives* y los catálogos de este tipo de motores, se escogió el EMMS-ST-87M-SE, pues cumple con las especificaciones para esta tarea según lo muestran las tablas y curvas del mismo.

Figura 77. Datos motor EMMS-ST-87M-SE

Datos técnicos generales			
Tamaño	87-S	87-M	87-L
Motor			
Tensión nominal [V DC]	48		
Corriente nominal [A]	9,5		
Momento de retención [Nm]	2,5	5,9	9,3
Angulo de los pasos [°]	1,8 ±5%		
Resistencia de la bobina [Ω]	0,1 ±10%	0,23 ±10%	0,23 ±10%
Inductancia de la bobina [mH]	0,45	2,6	2,7
Momento de inercia de salida [kg cm ²]	1/1,07 ¹⁾	1,9/1,97 ¹⁾	3/3,07 ¹⁾
Carga radial en el eje [N]	200		
Carga axial en el eje [N]	65		
Momento de inercia de la masa, rotor [kgcm ²]	1	1,9	3
Freno			
Tensión de funcionamiento [V DC]	24 ±10%		
Potencia [W]	11		
Momento de retención [Nm]	2		
Momento de inercia de la masa [kgcm ²]	0,07		

Fuente: adaptación catálogo de motores EMMS-ST, Festo.

Figura 78. Curvas motor EMMS-ST-87M-SE



Fuente: adaptación catálogo de motores EMMS-ST, Festo.

Si se observa la primera imagen (Figura 77), a primera vista se pensaría que el mejor motor para esta aplicación debería ser el 87-S, pues ofrece un par máximo de 2,5N-m,

cuando se requiere solamente de 0,289N-m, pero al observar los datos del DGE, se sabe que la constante de avance para este eje es de 63mm/rev, por tanto, para la velocidad y aceleración a la que se desea llevar este eje, el motor debe girar a 380,95rpm, y al dirigirse a las curvas que aparecen en la Figura 78, se aprecia que a esta velocidad angular, y con una fuente de 48V DC como alimentación de potencia, el motor 87-S estaría siempre entregando un par de 2N-m, pero si en algún momento se necesita de mayor torque, el motor simplemente no es capaz de cumplir con estos requisitos, y el forzarlo implica un rápido desgaste y una falla inminente; el motor 87M cumple con estos requerimientos.

Por tanto, el conjunto final del eje Y está compuesto por los siguientes elementos:

- Eje eléctrico DGE-25-800-ZR-LK-RV-KF-GK.
- Motor paso a paso EMMS-ST-87-M-SE

La siguiente imagen muestra los resultados del software *Positioning Drives*.

Figura 79. Resultados eje Y-Positioning Drives

Parts list

Part No.	Amount	Unit	Order code 1	Item name	Stroke reserve
193742	1	ST	DGE-25-800-ZR-KG-KF-GK	Linear drive	126,000 mm
549420	1	ST	EMMS-ST-87-M-S	Stepper motor	
547454	1	ST	CMMS-ST-C8-7	Controller	

[Export](#) [Festo file format](#)

Fuente: los autores.

Todo este conjunto posee una masa de 10,27Kg.

3.2.2.3 Eje X

Para el cálculo del eje X se procedió exactamente de la misma manera que se hizo con el eje Z y con el eje Y, dando como resultado los siguientes elementos.

- Eje activo: DGE-25-1200-ZR-RF-LK-RB-GV
- Eje pasivo: DGE-25-1200-ZR-RF-LK-RV-GV

- Motor paso a paso: EMMS-ST-87-L-SE
- Unión cardánica: KSK-25-1000

Se habla de un eje activo pues es en éste donde se acopla el motor, el eje pasivo es conducido por el activo por medio de la unión cardánica.

Todos estos elementos sumados poseen una masa de 20,09Kg; por tanto, toda la estructura hasta este momento posee una masa de 35,87Kg sin contar la carga a levantar de 3Kg.

3.2.3 Vigas

A pesar de que según los datos técnicos de los ejes eléctricos muestran que para una carrera útil en el eje X de 1200mm no se presenta pandeo (o al menos es muy mínimo), éste sistema debe estar soportado por una estructura que le ofrezca estabilidad y que además de ello pueda evitar pandeo en los ejes de llegar a ocurrir. Por tanto, para suplir estas dos necesidades, los ejes eléctricos tanto activo como pasivo deberán descansar sobre vigas.

La longitud total⁴⁷ de cada eje es de 1835mm, por tanto esta debe ser la mínima longitud de las vigas, pero como toda la estructura debe poseer bases que la soporten, para una más cómoda instalación de las mismas, se estipuló que la viga sea de 2m de longitud.

Siendo bastante conservador, y teniendo en cuenta que la viga va a estar sometida únicamente a flexión pura, se optó por las siguientes restricciones:

- Factor de seguridad de 6.
- Límite inferior de la ecuación (3.15) de Hamrock⁴⁸, esto es, $\sigma_{perm} = 0,6S_y$
- Ecuación (6.5) de Hamrock⁴⁹ para la predicción de falla para un estado de esfuerzo uniaxial, es decir, $n_s = \frac{\sigma_{perm}}{\sigma_d}$

Al realizar el cálculo de fuerzas que se presentan si el carro del eje Y se encuentra a una distancia de 700mm (que se considera la máxima permitida por seguridad antes de que

⁴⁷ Esta longitud se obtiene de sumar la carrera útil, las carreras de reserva y las longitudes de los compartimientos donde se alojan las poleas de las cadenas según catálogos.

⁴⁸ (HAMROCK, y otros, 2000), pág 111.

⁴⁹ Ibid pág 234.

toque la estructura del eje X, queriendo decir que se puede aumentar), la reacción que se presentará en el extremo del eje Y, será la misma sobre el carro del eje X, la cual equivale a 164,325N, sumado a lo que se detalla en la siguiente figura, se puede entrar a buscar la viga ideal según catálogos de Festo.

Figura 80. Diagrama de fuerzas y momentos sobre viga

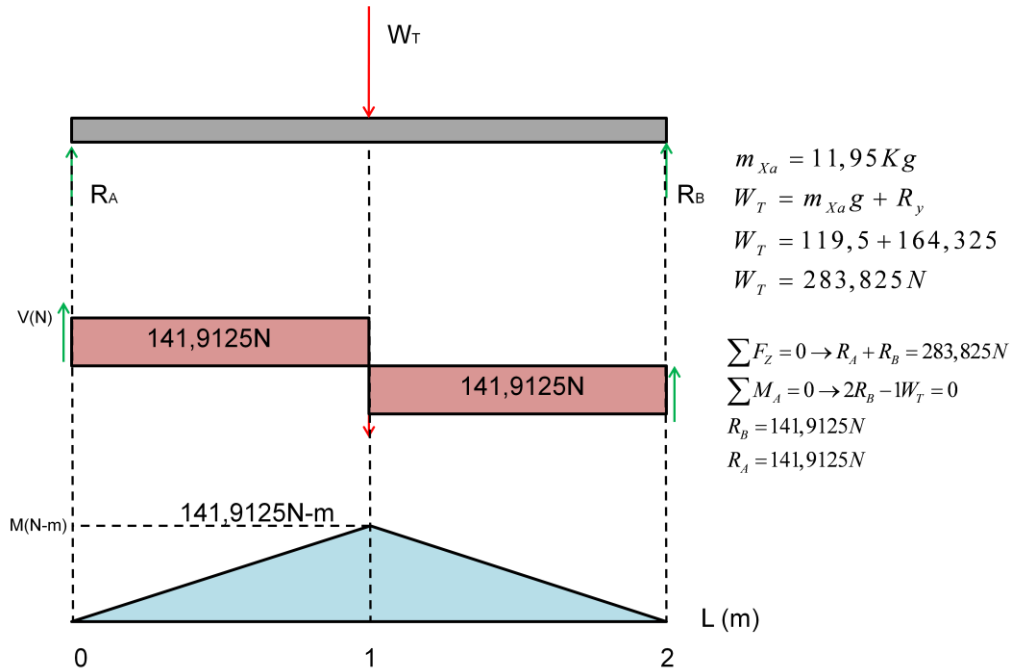


Imagen de los autores.

Cuando se hace referencia a m_{xa} se habla de la masa total del eje X activo, es decir, el que posee el motor acoplado.

En base al diagrama anterior y a las condiciones de diseño de la viga que antes se mencionaron se tiene lo siguiente:

$$\sigma_{perm} = 0,6S_y \rightarrow \sigma_{perm} = 81\text{ MPa}$$

$$\sigma_d = \frac{\sigma_{perm}}{n_s} \rightarrow \sigma_d = 13,5\text{ MPa}$$

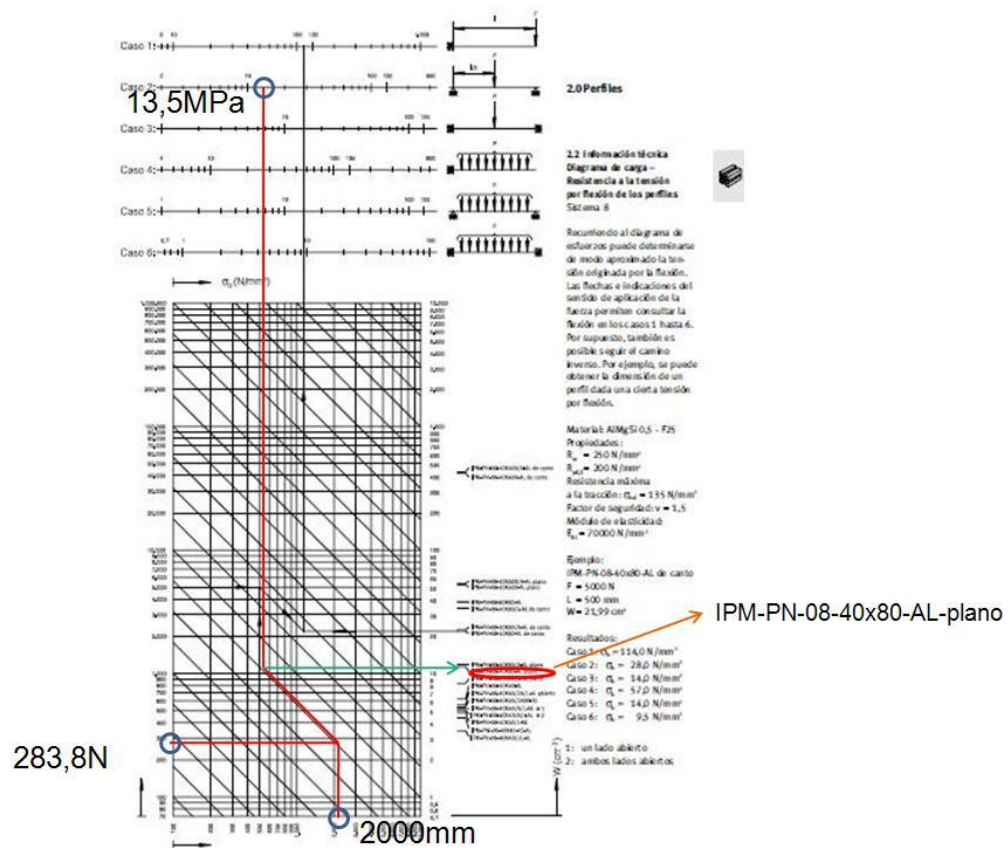
Con las siguientes tres informaciones se puede ingresar al nomograma que ofrece Festo para este tipo de aplicaciones, las cuales son.

$$\sigma_d = 13,5 \text{ MPa}$$

$$L = 2 \text{ m} = 2000 \text{ mm}$$

$$F = 283,825 \text{ N}$$

Figura 81. Nomograma Festo para selección de perfil de vigas



Fuente: adaptación del catálogo de perfilierías Festo-2004.

Por tanto, como se indica en la figura anterior, el perfil que mejor se adapta para esta aplicación es el IPM-PN-08-40X80-AL-plano; dicho perfil también se adapta para el eje X pasivo.

Las características de dicho perfil se muestran a continuación.

Figura 82. Perfil 40X80

2.0 Perfiles

2.5 Perfil

Sistema 8

Perfil 40 x 80

Material

Aluminio natural anodizado

Medidas

$$I_x = 22,64 \text{ cm}^4$$

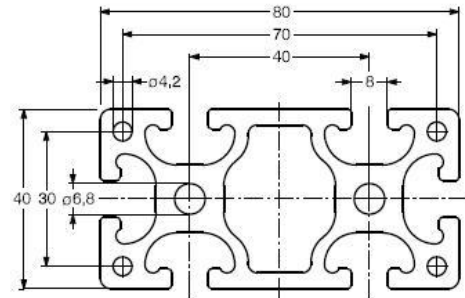
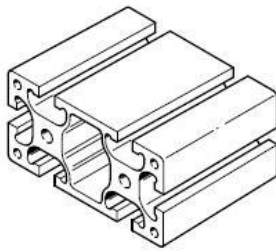
$$I_y = 87,94 \text{ cm}^4$$

$$W_x = 11,32 \text{ cm}^3$$

$$W_y = 21,98 \text{ cm}^3$$

$$\text{Área del perfil} = 13,56 \text{ cm}^2$$

Perfil 40 x 80
IPM-PN-08-40x80-AL



Fuente: catálogo de perfilierías Festo-2004.

El material tanto de éste perfil como el de los ejes es *Aluminio Anodizado AlMgSi 0,5-F25*, cuyas propiedades se muestran a continuación⁵⁰.

- $R_m = 250 \text{ N/mm}^2$
- $R_{p0,2} = 200 \text{ N/mm}^2$
- **Resistencia máxima a la tracción, $\sigma_{zul} = 135 \text{ N/mm}^2$**
- **Módulo de elasticidad, $E_{Al} = 70000 \text{ N/mm}^2$**

Tomando los datos del perfil, junto con los del momento flexor que experimenta la viga se llega a lo siguiente.

$$\sigma = \frac{Mc}{I_x} \rightarrow \sigma = 12,53 \text{ MPa}$$

Resultado que al compararse con el esfuerzo de diseño de 13,5MPa se obtiene un margen de error del 7.18%, valor que se considera satisfactorio.

⁵⁰ Estos valores se encuentran estipulados en los nomogramas de Festo.

3.2.4 Columnas

Hasta este momento se ha garantizado que los ejes X, tanto activo como pasivo, no sufrirán pandeo (o al menos será muy mínimo hasta considerarse despreciable) gracias a las vigas que se calcularon anteriormente. Pero dicha estructura necesita de bases que la sostenga, es decir, se necesitan columnas.

De los cálculos anteriores se sabe que las reacciones o fuerzas que experimentarán estas columnas serán de 141,9125N, pero habría que adicionar ahora el peso de las vigas, pues según las características de los perfiles, éstos poseen un peso de 3,66Kg/m, de manera que para los 2000mm de longitud de cada viga, el peso de estas será de 7,32Kg, valor que no se puede despreciar para el cálculo de las columnas, por tanto, el valor real de las cargas que soportarán éstas será de 238,26N.

Dado que no hay ninguna estructura en voladizo, las columnas estarán sometidas a cargas concéntricas. Este tipo de estructuras, por las aceleraciones que se manejarán y las cargas a desplazar son de considerar, deben ir empotradas⁵¹, por tal razón se asumirán como tales.

Se precisó que la longitud de dichas columnas fuera de 1m para que tanto la estructura como el proceso que ejecutará el sistema se pueda observar desde cualquier punto de vista, además de que el operario pueda intervenir en el proceso de manera cómoda.

Se partió inicialmente tomando el mismo perfil de 40x80 con el mayor momento de inercia, es decir, 87,94cm⁴. Aplicando los criterios de diseño de columnas (capítulo 9 de Hamrock) se determinó lo siguiente:

$$r_g = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \rightarrow r_g = 2,54 * 10^{-2} m$$

$$l_e = 0,65l = 0,65(1) \rightarrow l_e = 0,65m$$

$$C_c = \left(\frac{l_e}{r_g} \right)_E = 25,52$$

$$\left(\frac{l_e}{r_g} \right)_T = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} = 101,16$$

$$\left(\frac{l_e}{r_g} \right)_T > \left(\frac{l_e}{r_g} \right)_E$$

⁵¹ Aquí se hace aclaración que por petición de la Facultad de Ingeniería Industrial este sistema no estará empotrado a pesar de las recomendaciones hechas al respecto, por tal razón los autores de este proyecto no se responsabilizan por la inestabilidad que se pueda generar en el sistema.

Por tanto, se aplica la ecuación de Johnson, (ecuación 9.16)⁵²

$$P_{cr} = A \left[S_y - \frac{1}{E} \left(\frac{S_y l_e}{2\pi r_g} \right)^2 \right] \rightarrow P_{cr} = 177,235 \text{ KN}$$

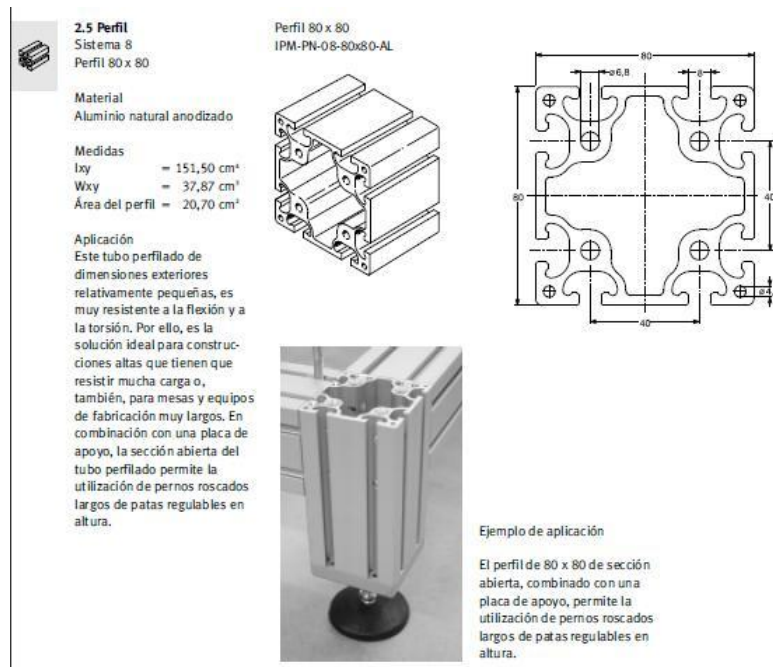
$$\sigma_{cr} = 130,7 \text{ MPa}$$

El esfuerzo que realmente está experimentando la viga es de:

$$\sigma = \frac{238,26}{13,56 \cdot 10^{-4}} \rightarrow \sigma = 175,7 \text{ KPa}$$

Estos valores representan un factor de seguridad de 743, pero dado que la viga que soporta los ejes es de 80mm de ancho, y en esta aplicación se está usando el mismo perfil pero de canto, quedaría algo inestable la estructura a tal punto que se pueden generar cargas excéntricas. Para solventar esto, y siguiendo las recomendaciones de catálogo, Festo ha diseñado un perfil idóneo para éstas aplicaciones, y es la de un perfil de 80X80 como se muestra a continuación en la Figura 83.

Figura 83. Propiedades perfil 80X80



Fuente: catálogo de perfilierías Festo-2004.

⁵² (HAMROCK, y otros, 2000), pág 368.

Realizando los mismos cálculos anteriores con las características de este perfil se llega a:

$$P_{cr} = 271,57 \text{ KN}$$

$$\sigma_{cr} = 131,195 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 115,1 \text{ KPa}$$

Como era de esperarse, el esfuerzo que experimenta esta columna con las cargas de la estructura es de 115,1KPa, estos valores dan un factor de seguridad de 1139.

Al comparar estos valores del factor de seguridad, son cifras demasiado altas, pero finalmente se eligió el perfil de 80X80 porque dado que es de sección cuadrada, se acopla perfectamente con la viga de 40X80, evitando así cargas excéntricas. También se escogió este perfil aprovechando las cualidades para las cuales fue fabricada, que según el catálogo para esta aplicación son más que justificadas, pues se están trabajando estructuras relativamente altas, se considera como una mesa (al fin y al cabo este tipo sistema cartesiano se conoce como mesa de posicionamiento) y equipos de fabricación largos, como lo son los ejes X; además, el hecho de tener varios canales en sus perfiles permite que en próximos proyectos se permita fácilmente la adaptación de dispositivos y demás elementos sobre ellos, como lo pueden ser , perfilería que hace parte de otras estructuras, cámaras de video para un futuro control por visión, instalación de válvulas y demás dispositivos que si se hubiera fabricado dicha columna incluso con perfilería de la que se consigue normalmente en el mercado, implicaría el estar perforando dicho perfil hasta adaptarlo a las formas de los mismos, mientras que dicho perfil viene diseñado para las medidas estandarizadas de todos los dispositivos Festo.

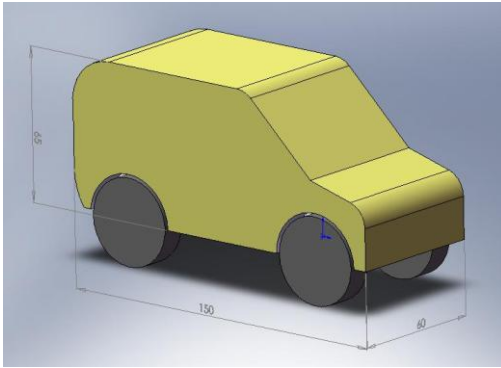
3.2.5 Elementos Neumáticos en el Sistema Robótico Cartesiano

El sistema robótico cartesiano fue pensado y diseñado para la sujeción y transporte de piezas con una masa de máximo 3Kg, por tanto, el sistema de vacío debe ser capaz de levantar y sujetar dicha carga.

Dado que se desea simular un proceso de ensamble de un vehículo, esto implica la sujeción de piezas de distintas formas geométricas y superficies irregulares, por tanto se hace necesario el empleo de ventosas que se adapten a ellas.

Las dimensiones del vehículo propuesto a sujetar se presentan a continuación.

Figura 84. Propuesta vehículo



Fuente: los autores.

Las dimensiones de dicho vehículo son de (LxWxH) 150x60x65mm, estas medidas fueron escogidas tomando como referencia las dimensiones de los vehículos de juguete que se encuentran en el Laboratorio de Simulación G-402 de la Facultad de Ingeniería Industrial que se muestra a continuación.

Figura 85. Modelo vehículo



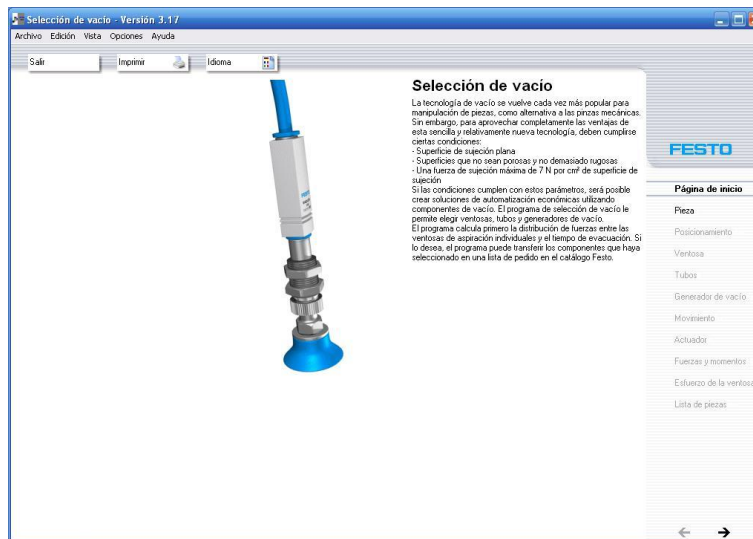
Fuente: los autores.

Es finalmente éste el vehículo que será manipulado por el sistema robótico cartesiano.

Como se puede apreciar en la imagen, éste vehículo posee superficies irregulares que exigen el empleo de ventosas, pero un solo tipo de ventosa no puede sujetar correctamente todas las piezas con formas complejas, para ello se hace necesario el empleo de varios tipos de ventosas, lo que implica que el sistema debe estar cambiando con cierta frecuencia de ventosa, la mejor manera de lograr esto es adaptando un gripper tome dichas ventosas. Para este proyecto se trabajará con sólo un tipo de ventosa que sujetará piezas con formas regulares, aunque se deja habilitado el gripper para que en futuros proyectos se haga la adaptación de las diferentes ventosas –implicando esto también un cambio en la programación del sistema-.

Para la selección de los elementos neumáticos se hizo uso del software de selección y dimensionamiento *Vacuum Selector*⁵³, teniendo en cuenta que la depresión que se debe alcanzar en la ventosa es de aproximadamente -0,7bar que es un valor generalmente recomendado por los fabricantes de este tipo de dispositivos⁵⁴, además de la capacidad de sujetar las 3Kg.

Figura 86. Vacuum Selector



Fuente: los autores.

⁵³ Software desarrollado por Festo para el dimensionamiento y selección de sistemas de vacío.

⁵⁴ (HESSE), Las Pinzas y sus aplicaciones, p 81.

Inicialmente se piden los datos sobre la pieza a sujetar, esto es, dimensiones y peso para así calcular el tipo de ventosa, manguera y generador de vacío que se adapten a esta aplicación en particular como se muestra en la imagen.

Figura 87. Datos pieza

Fuente: los autores.

El software arroja como resultado la ventosa tipo VASB.

Figura 88. Ventosa seleccionada

	Apropiado para la pieza	Referencia	Serie	Tamaño	Forma	Material	Compensación de carreras [mm]	Conexión de aire	Tig
1	Si ✓	VASB-30-1/8-NBR	VASB	30	Fuelle 1,5 veces	Perbunan (NBR)	0	-	-

Fuente: los autores.

La ventosa es de referencia VASB-30-1/8-NBR; prosiguiendo con los demás parámetros se determinó que el sistema generador de vacío que mejor se adapta es de referencia VADMI 95-LS-P, el cual trae incorporado un sistema para expulsión de aire. Este dispositivo posee un consumo de aire de 50L/min a una presión de funcionamiento de 6bar, a esta presión el sistema genera una depresión de -0.8bar, con un tiempo de

evacuación de 5seg; cabe aclarar que este tiempo es el necesario para evacuar un (1) litro de aire según datos del fabricante.

Pasando al gripper, para su selección también se hizo uso del software *Selección de Pinzas de Sujeción*⁵⁵, teniendo en cuenta los parámetros de masa a sujetar, aceleraciones, etc., como lo muestra la figura siguiente.

Figura 89. Selección de Pinzas de Sujeción

Fuente: los autores.

Conforme a los parámetros ingresados al software se determinó que el gripper ideal es de referencia HGD-16A, que es de apertura paralela y consta de tres dedos para sujetar las piezas.

Para gobernar el gripper se hace necesario de una válvula de direccionamiento, pues dicho gripper requiere de dos líneas de presión, para abrir y cerrar el mecanismo.

La opción más sencilla es usando una válvula tipo 4/2 vías, la cual garantiza que hay presión en todo momento, sea para abrir o cerrar el mecanismo, pues en alguna aplicación se puede llegar a necesitar sujetar una pieza internamente, es decir, el mecanismo debe estar abierto, y por esta misma razón no deben haber posiciones intermedias, por estas razones se opta por este tipo de válvula.

⁵⁵ Software desarrollado por Festo para el dimensionamiento y selección de grippers.

Luego de analizar los catálogos, se optó por la electroválvula VUVB-L-M42-AD-Q6-1C1, que es una válvula 4/2 vías servopilotada con alimentación del solenoide a 24V DC. Se seleccionó ésta por ser la más sencilla y la que requiere de menos señales de presión de aire para su funcionamiento, el pilotaje es interno, y además, por ser electro válvula se podrá aprovechar el uso de un autómatas para la conmutación de la misma para un mejor control del proceso.

Resumiendo todo lo anterior, a continuación se registran los dispositivos más relevantes dentro del circuito neumático para el sistema robótico cartesiano, sin contar con elementos pasivos, como lo son las mangueras, racores y unidad de mantenimiento.

- Ventosa VASB-30-1/8-NBR
- Generador de vacío con sistema de expulsión VADMI-95-LS-P
- Pinza paralela HGD-16A
- Electroválvula 4/2 servopilotada VUVB-L-M42-AD-Q6-1C1

4. ENSAMBLE

En este capítulo se expone gráficamente el proceso de ensamble de todos los componentes que hacen parte del sistema robótico cartesiano.

4.1 Componentes Estructurales

A continuación se muestran algunos de los componentes estructurales al momento del arribo a las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Figura 90. Vigas y Columnas



Fuente: los autores.

Figura 91. Eje X activo



Fuente: los autores.

La carrera útil de los ejes X activo y pasivo es de 1200mm.

Figura 92. Eje Y



Fuente: los autores

La carrera útil del eje Y es de 800mm.

Las siguientes imágenes muestran diferentes etapas del ensamble de la estructura.

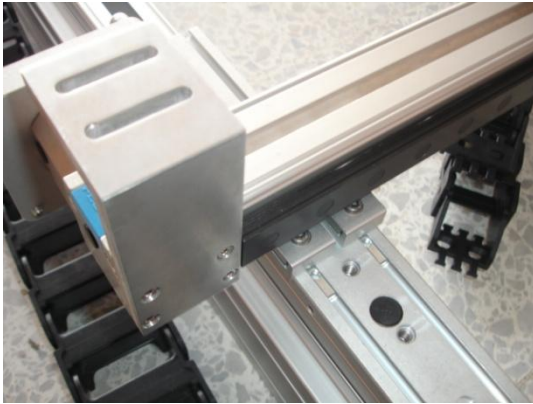
Figura 93. Acople eje Z en eje Y



Fuente: los autores.

La Figura 93 muestra la unidad FENG acoplada al carro del eje Y, se alcanzan a observar las guías con las bolas recirculantes.

Figura 94. Acople eje Y en eje X



Fuente: los autores.

Figura 95. Ejes X-Y



Fuente: los autores.

La imagen que aparece a continuación muestra la estructura ya ensamblada.

Figura 96. Estructura ensamblada



Fuente: los autores.

Dentro del proceso de ensamble de todo el sistema, se presentaron algunos inconvenientes. Uno de ellos, y el más importante era la inestabilidad de la estructura, cuando se movía el eje Y. Las vigas que soportan a los ejes X dan estabilidad a los mismos, pero estos ejes están unidos solamente por el eje Y, y por la unión cardánica, de manera al desplazarse el eje Y toda la estructura se movía en este sentido. La mejor forma de rigidizar toda la estructura es por medio de travesaños, los cuales fueron cortados y adaptados a la medida necesaria, esto solventó este inconveniente.

Figura 97. Estructura con travesaños



Fuente: los autores.

Un segundo inconveniente que se presentó se debió al hecho de no anclar la estructura al piso como se recomendó desde un principio. Esto ocasionaba que al mover todo el sistema, la estructura se deslizara y “caminara” dentro del laboratorio. Esto también conllevaba a que los motores se desfasaran debido a las vibraciones causadas por el movimiento de la estructura que no tenía un mecanismo de absorción de dichas vibraciones, consecuencias que se pudieron haber evitado si la estructura estuviera empotrada en el piso.

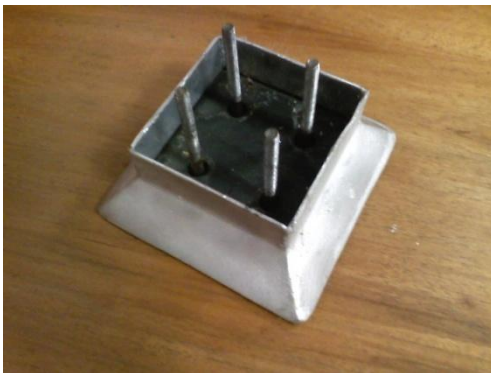
Pese a ello, siempre se dijo que la estructura no puede estar anclada al piso, razón por la cual se construyeron pies de apoyo para las bases. Estos pies constan de dos capas, una de silicona industrial que hace contacto con el suelo para aumentar la fricción, y la segunda capa es de caucho vulcanizado que hace contacto con la columna, absorbiendo así la vibración de la estructura, además cuenta con pernos que se ajustan a los agujeros de los perfiles de las columnas, garantizando un mejor acople a la estructura.

Figura 98. Pie de apoyo-capa silicona industrial



Fuente: los autores.

Figura 99. Pie de apoyo-capa de caucho



Fuente: los autores.

A continuación se muestra la estructura final con sus correcciones a los anteriores inconvenientes.

Figura 100. Estructura final



Fuente: los autores.

Otro inconveniente se presentó con el gripper y el sensor que detecta su posición. Inicialmente, se envió un sensor erróneo, éste fue cambiado por uno de los que poseen los ejes Y-Z; este también presentó problemas, pues entre éste y el espacio del gripper para acoplarlo había una gran holgura, de manera que no se podía insertar fijamente (Figura 101).

Figura 101. Holgura entre sensor y gripper



Fuente: los autores.

Para resolver este problema se fabricaron dos platinas que se ajustaban a la holgura que se presentaba entre estas dos piezas. Pero de igual manera se presentó otro percance, y es que el punto de conmutación del mecanismo de apretura del gripper quedaba por fuera del rango físico de medición del sensor, de manera que la única forma de que el sensor detectara la posición del gripper, debía ser retirado cierta distancia del fondo, el problema

se presentó en que esta diferencia interfería con la placa donde se acoplaba el gripper como lo muestra la siguiente figura.

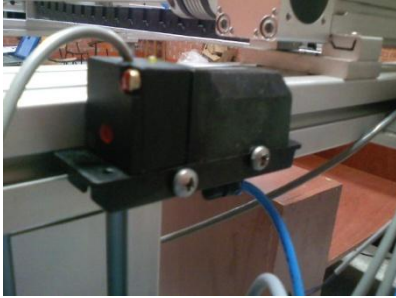
Figura 102. Interferencia sensor gripper y placa



Fuente: los autores.

Al comentar este problema a los proveedores, se hicieron varias sugerencias, como la de destapar el gripper y ajustar el punto de conmutación, otra era perforar la placa y finalmente, adaptar un presóstato a la línea de presión del gripper. Se decidió por la última teniendo en cuenta que para hacer más didáctica la estructura sería conveniente el adaptar el mayor número de tecnologías disponibles en la industria, además, todo estaba cubierto por la garantía, de manera que se hizo el cambio, y el finalmente el sensor para el gripper es un presóstato acoplado a la línea de presión para abrir el gripper (Figura 103).

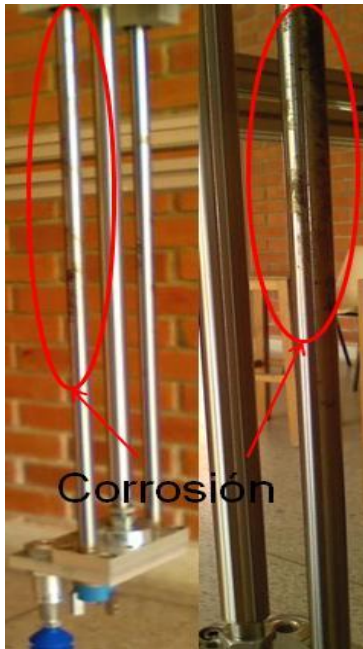
Figura 103. Presóstato gripper



Fuente: los autores.

El último inconveniente se presentó en los vástagos de la unidad antigiro FENG del eje Z, los cuales fueron atacados por corrosión, pues estas piezas, según el proveedor, son diseñadas para que una vez sean montados, estén en constante movimiento, de manera que la grasa que se encuentra en las guías que contienen los rodamientos de bolas mantenga lubricados los vástagos. Este sistema, al igual que los demás, no se podía poner en movimiento hasta no tener alimentación eléctrica. Desde la solicitud hecha ante la universidad para la instalación de la acometida eléctrica hasta la ejecución del mismo, transcurrieron alrededor de cinco (5) meses, tiempo durante el cual el sistema estuvo detenido, y por tanto dicha unidad no se tuvo en movimiento, lo que conllevó a una oxidación de la misma (ver Figura 104).

Figura 104. Corrosión en vástagos



Fuente: los autores.

Esta unidad fue enviada al proveedor por garantía, los cuales rectificaron los vástagos y a su vez enviaron algunos envases con grasa para mantener lubricado dicho sistema (ver Figura 105).

Figura 105. Vástago rectificado y grasa



Fuente: los autores.

Fue de esta manera como se superó este inconveniente.

4.2 Componentes Electromecánicos

A continuación se muestran algunos de los elementos electrónicos en su llegada a las instalaciones de la universidad.

Figura 106. Controlador CMMS-ST-C8-7



Fuente: los autores.

En la Figura 106 aparece una de las unidades controladoras de los motores paso a paso junto con un manual de instalación y el CD con el software de parametrización *Festo Configuration Tool (FCT)*.

Figura 107. Motor EMMS-ST-87M-SE



Fuente: los autores.

El motor de la Figura 107 es el que acciona el eje Y.

Figura 108. Sensores magnéticos



Fuente: los autores.

Los sensores de la Figura 108 son del tipo magnéticos, los cuales se encuentran instalados en los ejes Y-Z.

Las imágenes siguientes detallan momentos de la instalación de algunos de estos dispositivos.

Figura 109. Sensor magnético eje Z



Fuente: los autores.

Figura 110. Acople servo a eje Z



Fuente: los autores.

La Figura 110 muestra el mecanismo de acople entre el servo y el eje Z, el cilindro DNCE.

Figura 111. Sensor inductivo eje X



Fuente: los autores.

Figura 112. Motor eje Y acoplado



Fuente: los autores.

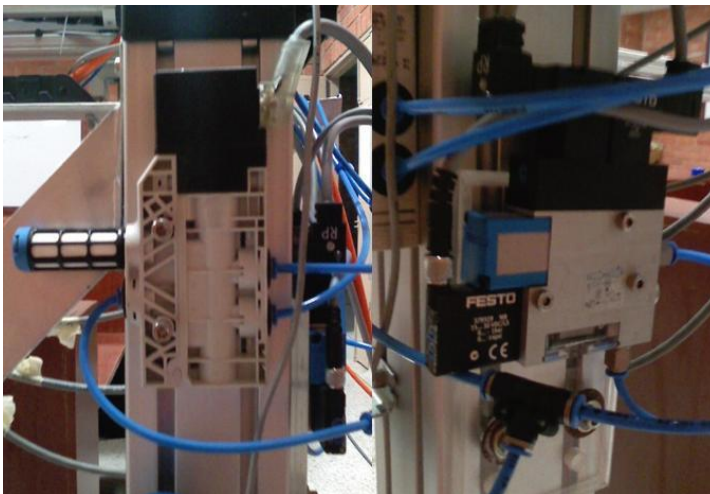
Las dos conexiones del motor que se ven en la Figura 112 son, de izquierda a derecha, potencia y resolver.

Figura 113. Generador de vacío y válvula 4/2



Fuente: los autores.

Figura 114. Instalación generador de vacío y válvula 4/2



Fuente: los autores.

Las dos imágenes anteriores muestran las dos unidades del sistema neumático; de izquierda a derecha en la Figura 114, electroválvula 4/2 con servopilotaje, ésta gobierna el gripper, y la otra unidad es el generador de vacío con sistema de expulsión de aire.

4.3 Componentes de Control

Aquí se muestran algunas imágenes de algunos de los elementos que hacen parte del control del sistema robótico cartesiano.

Figura 115. CPU 315F-2PN/DP y módulo SM323



Fuente: los autores.

Figura 116. Gabinetes tablero de control y potencia



Fuente: los autores.

Figura 117. Borneras ABB 12 AWG



Fuente: los autores.

Las siguientes figuras muestran el proceso de instalación y cableado de los dispositivos de control.

Figura 118. Instalación gabinetes



Fuente: los autores.

Figura 119. Montaje de controladores de motores y PLC



Fuente: los autores.

Figura 120. Cableado de equipos



Fuente: los autores.

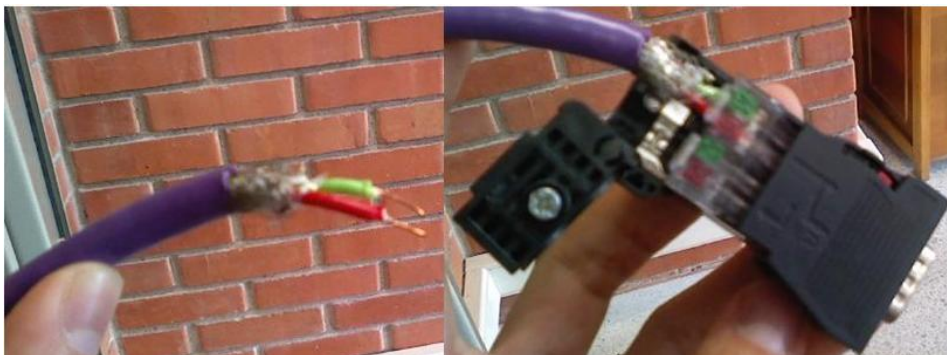
Figura 121. Conexiones de potencia y resolver de motores



Fuente: los autores.

En la Figura 121, de izquierda a derecha, se observa primero las conexiones de potencia de la unidad controladora del motor paso a paso del eje Y, al lado, la conexión del resolver. En la misma ubicación, la imagen de la derecha muestra las conexiones del servomotor.

Figura 122. Cable y conector Profibus



Fuente: los autores.

Figura 123. Conexiones Profibus entre motores y PLC



Fuente: los autores.

5. PUESTA EN MARCHA

En el presente capítulo se hace una descripción de las distintas pruebas realizadas al sistema robótico cartesiano para observar su comportamiento, además de las diferentes rutinas finales que se programaron en el PLC concernientes a prácticas de laboratorio, de acuerdo al siguiente orden.

- 5.1 Pruebas Individuales
- 5.2 Pruebas individuales vía Profibus
- 5.3 Prueba conjunto vía Profibus
- 5.4 Pruebas neumáticas
- 5.5 Problemas presentados
- 5.6 Rutinas finales

5.1 Pruebas Individuales

Las primeras pruebas realizadas una vez confirmadas las continuidades en cada uno de las conexiones eléctricas de los equipos, fue la de accionar los tres ejes X-Y-Z de manera individual bajo el software de parametrización respectivo. Las instrucciones de parametrización se encuentran consignados en los Anexos A para motores paso a paso, y Anexo B para el servomotor; los motores paso a paso se parametrizan con el software *Festo Configuration Tool (FCT)*, y el servo con el software *Wmemoc*.

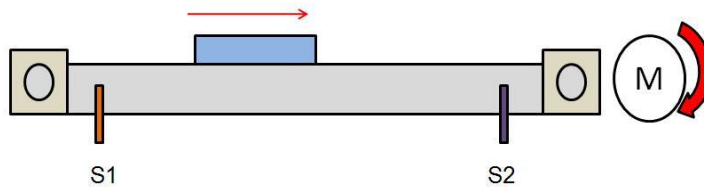
Para garantizar el buen funcionamiento, se necesita sólo de dos pruebas, el *Homing* y generar una rutina de varios desplazamientos.

Las imágenes que se verán a continuación dentro del entorno del FCT fueron pruebas realizadas satisfactoriamente con los motores paso a paso de los ejes X-Y.

La primera prueba consiste en realizar exitosamente el recorrido de referenciación o *Homing*. El Homing es el desplazamiento que realiza un eje a una muy baja velocidad

desde el sensor más lejano hasta el más cercano con respecto al motor como se aprecia en la Figura 124.

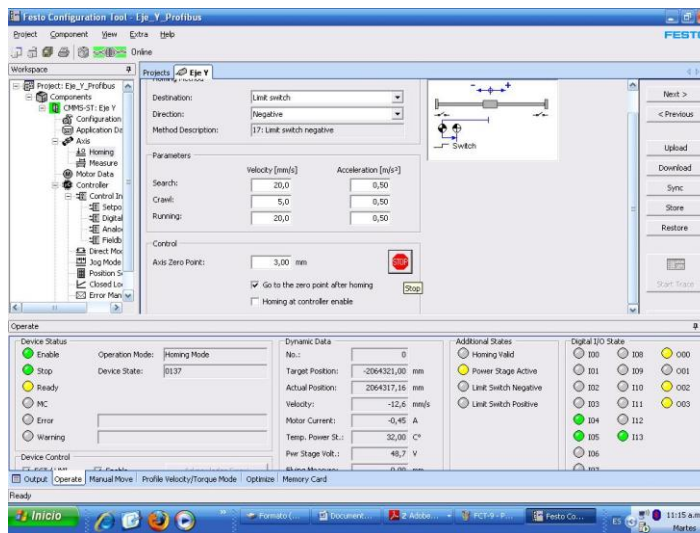
Figura 124. Homing



Fuente: los autores.

El carro del eje debe inicialmente desplazarse manualmente hasta que se active el sensor más lejano, en este caso como muestra la figura, el S1. En el software FCT debe visualizarse que se encendió dicho sensor, y luego debe iniciarse el Homing.

Figura 125. Homing en ejecución



Fuente: los autores.

Al terminar el Homing, se debe dar un aviso de que fue realizado exitosamente (ver Figura 126).

Figura 126. Homing exitoso

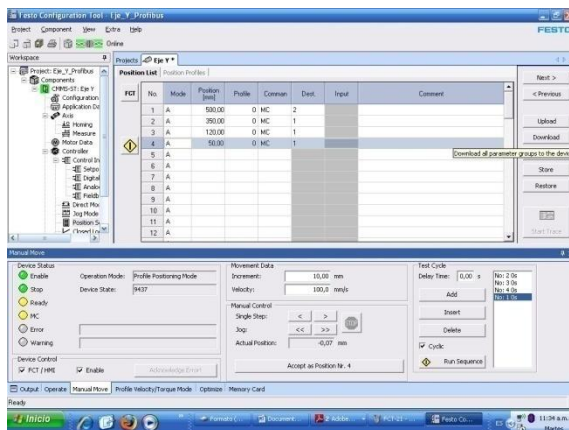


Fuente: los autores.

Si el Homing fue exitoso (Figura 126) significa que los sensores responden correctamente. Una vez realizado el Homing, el sistema memoriza los límites de sus recorridos de manera que no podrá salirse de ellos.

La segunda prueba consiste en realizar una rutina con varios desplazamientos, los cuales deben ser realizados secuencialmente, sin sobresaltos o cualquier otro defecto durante el recorrido.

Figura 127. Secuencia de desplazamiento



Fuente: los autores.

Figura 128. Realización secuencias de desplazamientos

FCT	No.	Mode	Position [mm]	Profile	Comman	Dest	Input	Comment
	1	A	500,00	0	MC	2		
	2	A	350,00	0	MC	1		
	3	A	120,00	0	MC	1		
	4	A	50,00	0	MC	1		
	5	A						
	6	A						
	7	A						
	8	A						
	9	A						
	10	A						
	11	A						
	12	A						

Movement Data
 Increment: 10,00 mm
 Velocity: 100,0 mm/s
 Manual Control
 Single Step: < >
 Jog: << >>
 Actual Position: 409,81 mm
 Test Cycle
 Delay Time: 0,00 s
 Add
 Insert
 Delete
 No.: 2 0s
 No.: 3 0s
 No.: 4 0s
 No.: 1 0s
 Stop Sequence

Fuente: los autores.

En la columna *Comman*, se ingresa el comando MC (Motion Complete), el cual permite que la rutina sea secuencial, es decir, que una vez termine un recorrido inicie inmediatamente el otro.

Se escogieron cuatro diferentes valores de recorridos a diferentes velocidades, los cuales deben ser realizados sin ningún error.

Al ejecutar estos recorridos, se encontró que la máxima velocidad que puede alcanzar el motor del eje X es de 400mm/s, cualquier valor por encima de éste hará que el motor se detenga y genere un error. A esta velocidad el motor se detiene porque se presenta un desfase entre la lectura del resolver y los pasos que el motor está dando, de manera que la tarjeta controladora calcula que no podrá realizar el desplazamiento y envía un error.

La máxima velocidad que el motor del eje Y puede alcanzar es de 420mm/s, valores por encima de éste valor ocasionarán los mismos errores que presenta el motor del eje X una vez sobrepasado el límite de velocidad.

Con respecto al servomotor, se llevaron a cabo el mismo tipo de pruebas de manera satisfactoria. A diferencia del FCT, en el Wmemoc no se determina una posición a tomar como un valor lineal, sino en revoluciones. El Wmemoc permite programar 16 distintas posiciones con diferentes parámetros como velocidad, aceleración, etc., dichas posiciones se ingresan como el número de revoluciones que deberá dar el motor.

Figura 129. Parámetros de accionamiento en Wmemoc

The screenshot shows the 'Destination 0' window in the Wmemoc software. On the left, a 'Select' list contains options from 'CAN-BUS' to 'Pos 15', with 'Pos 0' selected. The main area is divided into several sections: 'Destination' (Position: -30,000,000 R), 'Speed' (Running speed: 1000,000 RPM, Final speed: 0,000 RPM), 'Torque feed forward' (Factor: 0), 'Positioning run' (relative, Relative to last destination, absolute), 'Start during positioning run' (wait for End of positioning run, Interrupt actual positioning run, Ignore start command), 'Acceleration' (Total time: 166,9 ms, Smoothing: 166,9 ms), 'Deceleration' (Total time: 166,9 ms, Smoothing: 166,9 ms), 'Messages' (Remaining distance: 0,000,000 R, Remaining time: 0,0 ms), and 'Options' (Synchronized checkbox). At the bottom are buttons for OK, Cancel, Help, Copy, and GO!

Fuente: los autores.

Teniendo en cuenta esta característica del software, al hacer un barrido de velocidades, se determinó que la velocidad angular máxima que alcanza el motor es de 12000rpm, que traducido con la constante de avance del cilindro DNCE de 10mm/rev, el eje Z alcanza una velocidad máxima de 12,5m/s, es decir, 45Km/h.

No está de más el recalcar que estas velocidades fueron alcanzadas sólo con fines experimentales, pues no se recomienda alcanzar estos valores, sino trabajar en el rango que dice el proveedor, de lo contrario se incurre en acelerar el desgaste y una inminente falla de los dispositivos involucrados.

5.2 Pruebas Individuales vía Profibus

Para estas pruebas, se conectaron de manera individual los controladores con el PLC por medio del bus de campo Profibus.

Las pruebas realizadas fueron las mismas que se hicieron para cada motor bajo el marco del software de parametrización respectivo, salvo que para este caso, dichas pruebas fueron llevadas a cabo por medio del software de programación del PLC, Simatic Step 7.

Dado que para este caso se está controlando el motor desde el PLC vía Profibus, la primera prueba, y la más importante, consiste en comprobar si hay plena comunicación entre ambos dispositivos por medio de dicho bus de campo.

Las instrucciones de parametrización de los motores para adaptarlos a una red Profibus desde el entorno de Simatic Step 7, se encuentran consignados en el Anexo C.

Una vez realizada dicha configuración, se procedió a probar la comunicación, iniciando con la unidad CMMS-ST que gobierna el motor del eje X. La respuesta fue satisfactoria pues no se registró ningún error entre ambos dispositivos como lo muestra la siguiente figura.

Figura 130. Comunicación Profibus entre motor eje X y PLC



Fuente: los autores.

Seguidamente se procede a realizar el Homing. Para ello se activa el bit que controla esta orden dentro del entorno de la tabla de variables de Step 7 en modo *Online* (ver Figura 131).

	Operando	Símbolo	Formato de	Valor de estado	Valor de forzado
1	//-----				
2	//>>>>>> CONTROL DRIVE <<<<<<<				
3	//-----				
4	DB31.DBX 0.0	"GV-CM_Variables Eje X" HMIAccesslocked	BOOL	true	true
5	DB31.DBX 2.5	"GV-CM_Variables Eje X" ControlFCT_HMI	BOOL	false	false
6	//----- Mode of Operation -----				
7	DB31.DBW 6	"GV-CM_Variables Eje X" OPM	DEC	1	1
8	DB31.DBW 8	"GV-CM_Variables Eje X" StateOPM	DEC	1	
9	//----- Enable -----				
10	DB31.DBX 1.6	"GV-CM_Variables Eje X" ClearRemPos	BOOL	false	
11	DB31.DBX 0.1	"GV-CM_Variables Eje X" ResetFault	BOOL	false	
12	DB31.DBX 4.2	"GV-CM_Variables Eje X" Brake	BOOL	false	
13	DB31.DBX 0.2	"GV-CM_Variables Eje X" Halt	BOOL	true	true
14	DB31.DBX 0.3	"GV-CM_Variables Eje X" Stop	BOOL	true	true
15	DB31.DBX 0.4	"GV-CM_Variables Eje X" EnableDrive	BOOL	true	true
16	DB31.DBX 1.1	"GV-CM_Variables Eje X" DeactStrokeLimit	BOOL	false	
17	//----- Start -----				
18	DB31.DBX 1.5	"GV-CM_Variables Eje X" AbsoluteRelative	BOOL	false	
19	DB31.DBX 0.6	"GV-CM_Variables Eje X" StartTask	BOOL	false	
20	DB31.DBX 0.5	"GV-CM_Variables Eje X" StartHoming	BOOL	false	
21	DB31.DBX 2.0	"GV-CM_Variables Eje X" JogPos	BOOL	false	
22	DB31.DBX 1.7	"GV-CM_Variables Eje X" JogNeg	BOOL	false	
23	DB31.DBX 2.1	"GV-CM_Variables Eje X" TeachActualValue	BOOL	false	

Una vez realizado el Homing, el PLC debe recibir la confirmación por parte del esclavo DP que el sistema hizo dicho recorrido, es decir, que se encuentra referenciado (ver Figura 132).

Figura 132. Eje X referenciado

17	//----- Status -----					
18	DB31.DBX	2.2	"GV-CM_Variab	BOOL	false	
19	DB31.DBX	4.0	"GV-CM_Variab	BOOL	false	
20	DB31.DBX	3.1	"GV-CM_Variab	BOOL	true	
21	DB31.DBX	1.0	"GV-CM_Variab	BOOL	false	
22	DB31.DBX	0.7	"GV-CM_Variab	BOOL	false	
23	DB31.DBX	4.1	"GV-CM_Variab	BOOL	false	
24	DB31.DBX	3.3	"GV-CM_Variab	BOOL	false	
25	DB31.DBX	3.5	"GV-CM_Variab	BOOL	true	
26	DB31.DBW	20	"GV-CM_Variab	DEC	0	
27	DB31.DBW	10	"GV-CM_Variab	DEC	0	
28	DB31.DBW	16	"GV-CM_Variab	DEC	0	
29	DB31.DBD	32	"GV-CM_Variab	DEC	L#-22	
30	DB31.DBW	24	"GV-CM_Variab	DEC	0	
31	DB31.DBD	40	"GV-CM_Variab	DEC	L#0	
32	// Block Return Value					
33	DB31.DBW	26	"GV-CM_Variab	HEX	W#16#0000	
34						

Fuente: los autores.

Luego de haber referenciado el eje, se procede a realizar las rutinas de prueba. La manera más sencilla de observar el comportamiento y la respuesta del sistema a estas rutinas, es forzando al eje a dirigirse a dichas posiciones de manera individual y no bajo una secuencia, pues generar una secuencia de posiciones implica desarrollar un programa dentro del PLC.

Figura 133. Posición y Velocidad

17	//----- Start -----					
18	DB31.DBX	1.5	"GV-CM_Variab	BOOL	false	
19	DB31.DBX	0.6	"GV-CM_Variab	BOOL	false	
20	DB31.DBX	0.5	"GV-CM_Variab	BOOL	false	false
21	DB31.DBX	2.0	"GV-CM_Variab	BOOL	false	
22	DB31.DBX	1.7	"GV-CM_Variab	BOOL	false	
23	DB31.DBX	2.1	"GV-CM_Variab	BOOL	false	
24	//----- Set-Values -----					
25	DB31.DBW	18	"GV-CM_Variab	DEC	1	1
26	DB31.DBW	12	"GV-CM_Variab	DEC	400	400
27	DB31.DBW	14	"GV-CM_Variab	DEC	20	20
28	DB31.DBD	28	"GV-CM_Variab	DEC	L#500000	L#1500000
29	DB31.DBW	22	"GV-CM_Variab	DEC	5	5
30	DB31.DBD	36	"GV-CM_Variab	DEC	L#0	L#0
31						

Fuente: los autores.

La Figura 133 muestra la sección en donde se ingresan valores como velocidad y posición que debe adoptar el eje (resaltadas en azul y rojo respectivamente). Es de recalcar que las posiciones que se están probando no solo vía Profibus, sino en las pruebas individuales bajo el software respectivo de parametrización, así como la programación final son del tipo absoluto y no relativo.

Al dar la orden de llegar a dicha posición y con la velocidad asignada, al igual que para el Homing, el esclavo DP debe dar la confirmación de que se realizó el desplazamiento bajo los parámetros dados.

Figura 134. Desplazamiento ejecutado

27	DB31.DBW	10	"GV-CM_Variables Eje X".ActualVelocit	DEC	0
28	DB31.DBW	16	"GV-CM_Variables Eje X".ActualForce	DEC	0
29	DB31.DBD	32	"GV-CM_Variables Eje X".ActualPositio	DEC	L#-13337
30	DB31.DBW	24	"GV-CM_Variables Eje X".ActualRotRa	DEC	0
31	DB31.DBD	40	"GV-CM_Variables Eje X".ActualRotSpe	DEC	L#0
32	// Block Return Value				
33	DB31.DBW	26	"GV-CM_Variables Eje X".RET_VALUE	HEX	VV#16#0000
34					

Abs < 5.2

Fuente: los autores.

La Figura 134 muestra un ejemplo de la respuesta del esclavo DP, es decir, la unidad CMMS-ST ante una posición ingresada.

Desde la Figura 130 a la Figura 134 se trabajó con el eje X, dado que el eje Y es del mismo tipo, se obviaron estas imágenes, pues las respuestas al igual que para el eje X fueron satisfactorias como lo muestran las figuras antes mencionadas.

Siguiendo con el servomotor del eje Z, al igual que para los anteriores motores, la primera y más importante prueba consiste en confirmar que existe comunicación entre el PLC y el esclavo DP, que en este caso es la unidad SEC-AC.

Figura 135. Comunicación entre PLC y unidad SEC-AC



Fuente: los autores.

Como lo muestra la Figura 135, el led que se encuentra en la interfaz Profibus está encendido y de igual forma el display muestra un “P”, lo que significa que el control de dicha unidad es por vía Profibus. De igual forma, en el PLC también se indica que no hay error alguno, por tanto, existe comunicación entre ambos equipos.

Luego de confirmar la comunicación, se procedió de la misma manera que para los anteriores motores, realizando el Homing y la ejecución de posiciones y velocidades aleatorias desde el entorno de Step 7.

Figura 136. Supervisión eje Z

	Operando	Símbolo	Forma	Valor de estado	Valor de forzado
1	// IN				
2	DB11.DBX 26.0	"Z-parameter".enable_drive	BOOL	true	true
3	DB11.DBX 26.1	"Z-parameter".start_homing_operati	BOOL	false	
4	DB11.DBX 26.2	"Z-parameter".absolute_relative	BOOL	false	
5	DB11.DBX 26.3	"Z-parameter".change_set_immediat	BOOL	false	
6	DB11.DBX 26.4	"Z-parameter".new_set_point	BOOL	false	
7	DB11.DBX 26.5	"Z-parameter".halt	BOOL	false	
8	DB11.DBX 26.6	"Z-parameter".reset_fault	BOOL	false	
9	DB11.DBX 26.7	"Z-parameter".jogging_minus	BOOL	false	
10	DB11.DBX 27.0	"Z-parameter".jogging_plus	BOOL	false	
11	DB11.DBX 27.1	"Z-parameter".torque_mode	BOOL	false	
12	DB11.DBD 0	"Z-parameter".home_offset	DEC	L#0	L#0
13	DB11.DBD 4	"Z-parameter".target_position	DEC	L#-50000	L#-250000
14	DB11.DBD 8	"Z-parameter".profile_velocity	DEC	L#950000	L#950000
15	DB11.DBD 12	"Z-parameter".profile_acceleration	DEC	L#2000000	L#2000000
16	DB11.DBD 16	"Z-parameter".profile_deceleration	DEC	L#2000000	L#2000000
17	DB11.DBD 20	"Z-parameter".jogging_velocity	DEC	L#3000	L#3000
18	DB11.DBW 24	"Z-parameter".target_torque	DEC	0	0
19	// OUT				
20	DB11.DBX 38.0	"Z-parameter".set_point_acknowled	BOOL	false	
21	DB11.DBX 38.1	"Z-parameter".target_reached	BOOL	true	
22	DB11.DBX 38.2	"Z-parameter".homing_attained	BOOL	true	
23	DB11.DBX 38.3	"Z-parameter".following_error	BOOL	false	
24	DB11.DBX 38.4	"Z-parameter".drive_ok	BOOL	true	
25	DB11.DBD 28	"Z-parameter".position_actual_value	DEC	L#-62	
26	DB11.DBW 32	"Z-parameter".current_actual_value	DEC	50	
27	DB11.DBB 34	"Z-parameter".digital_inputs	BIN	2#0000_0000	
28	DB11.DBW 36	"Z-parameter".error	BIN	2#0000_0000_0000_0000	
29	// IN_OUT				
30	DB11.DBX 38.5	"Z-parameter".init_bit	BOOL	true	
31					

Fuente: los autores.

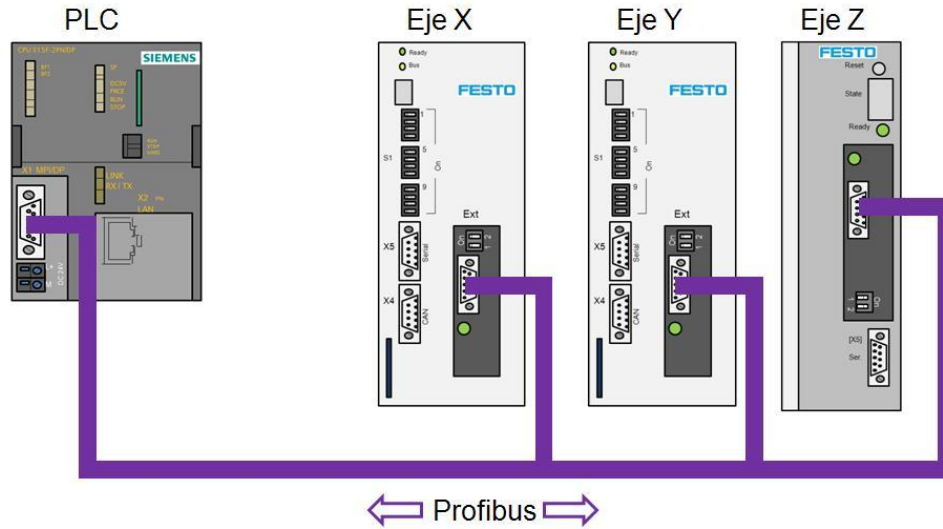
En la Figura 136 se aprecia la tabla de variables con las que se controla el servomotor desde Step7. Al igual que con los otros dispositivos, las pruebas de Homing y posicionamiento (de manera individual) desde Step7 se llevaron a cabo sin contratiempo alguno.

5.3 Prueba Conjunto Vía Profibus

Para realizar la prueba de todos los motores en conjunto, éstos deben estar enlazados junto con el PLC por medio del bus de campo.

La conexión de los equipos se muestra en la Figura 137.

Figura 137. Red Profibus de Equipos



Fuente: los autores.

La Figura 137 da a entender que la topología de ésta red es del tipo lineal o en bus; cada equipo debe tener asignada una dirección Profibus unívoca (al igual que para las pruebas individuales).

De la misma forma que se hizo con las pruebas individuales, lo primero que se debe constatar es que todos los equipos son reconocidos por el maestro DP, es decir, por el PLC y que no hay problema en dicha comunicación.

Figura 138. Red Profibus OK



Fuente: los equipos.

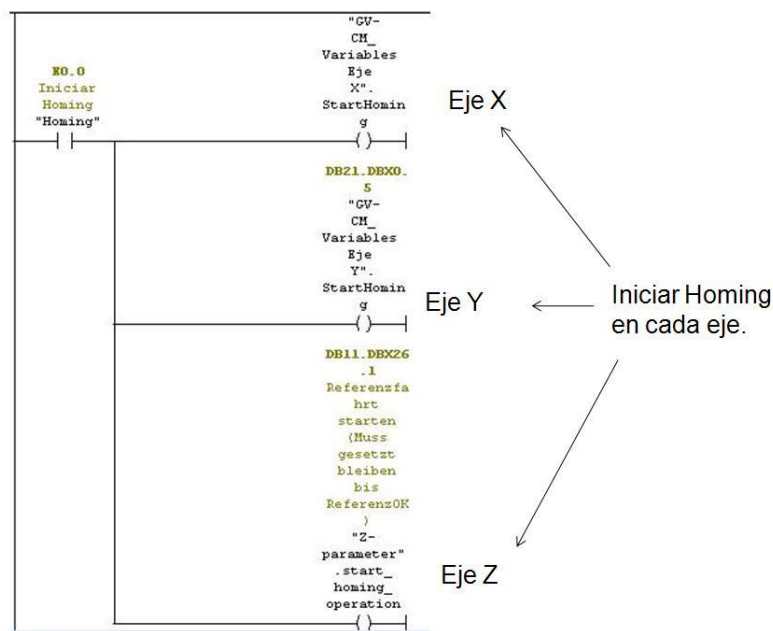
La Figura 138 muestra que todos los dispositivos tienen encendidos los respectivos leds de la interfaz Profibus, al igual que el display de la unidad SEC-AC muestra la “P”, los display de las unidades CMMS-ST, tanto del eje X como del Y, no muestran error, aunque en el instante en que la fotografía fue tomada, cada uno de ellos está mostrando el número “64”. Este número se muestra al ser controlados vía Profibus, además de otros parámetros, pero esto no es un error.

Luego de corroborar la comunicación entre los equipos de la red Profibus, se procede a realizar el recorrido de reconocimiento. Como ya se confirmó que de manera individual cada uno de los dispositivos responde satisfactoriamente a las órdenes dadas desde el maestro DP, lo que interesa ahora que se tienen todos ellos enlazados es que respondan de manera simultánea a una orden, tanto para el recorrido de referenciado, como para la ejecución de posiciones aleatorias.

Para lograr este objetivo se hace necesario el desarrollo de un sencillo programa desde el PLC en donde con solo activar una señal (un bit), los tres ejes realicen de manera simultánea el Homing.

A continuación se muestra un ejemplo de dicho programa.

Figura 139. Homing en XYZ



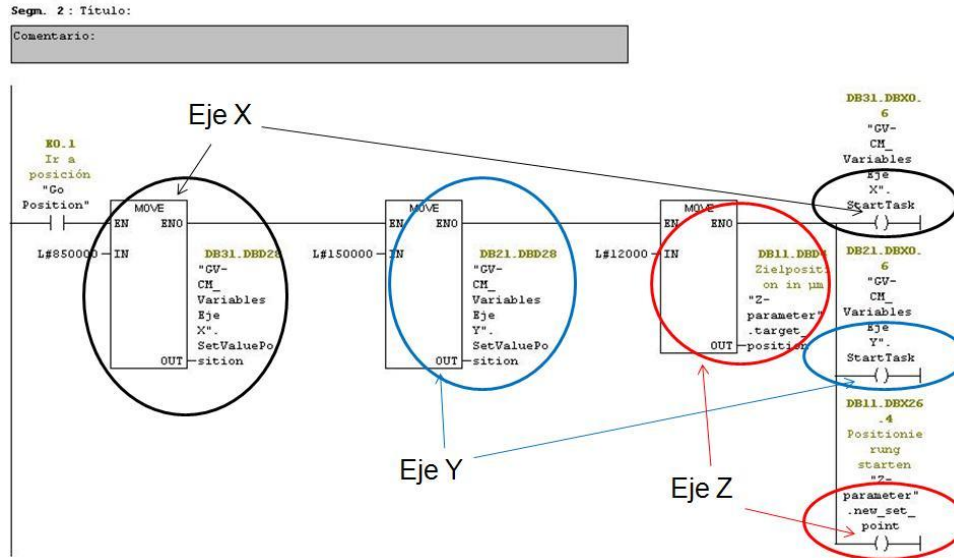
Fuente: los autores.

La Figura 139 muestra que al energizar la entrada E0.0 del PLC, denominada "Homing", se activan las entradas de cada motor que –valga la redundancia- activan la ejecución de este comando en cada uno de ellos. Para este caso, dicho proceso fue realizado exitosamente.

Una vez referenciados los ejes, se procede a realizar los recorridos aleatorios, los cuales también deben ser realizados de manera simultánea.

Al igual que para la etapa anterior, se hace necesaria la realización de un programa sencillo dentro del PLC en donde se ingresen los valores a donde se desea que el sistema se dirija y de manera unísona; a continuación se observa la manera como se realizó.

Figura 140. Accionamiento en XYZ



Fuente: los autores.

En la Figura 140 se detallan tres bloques llamados "Move", es en estos en donde se ingresan los valores de las posiciones a tomar por el sistema. En la parte izquierda del bloque se ingresa el valor, en la parte derecha se ingresa el destino, es decir, qué eje debe tomar dicha posición; y finalmente, los bits que activan cada motor para ejecutar el desplazamiento. De manera que al energizar la entrada E0.1, denominada "Go Position", se cargan los valores ingresados en cada bloque y luego es accionado cada motor hasta llegar a la posición especificada.

Esto se realizó en repetidas ocasiones, y en todas ellas los movimientos fueron simultáneos y no hubo problema alguno.

Por las referencias que dan los proveedores, se sabe que estos motores poseen gran precisión, pero también se sabe que un servomotor es más preciso que un motor paso a paso. Esto se corroboró al comparar las posiciones teóricas y aquellas a las que realmente llegaban los ejes.

Figura 141. Error en posiciones

	<i>Target Position</i>	<i>Actual Position</i>
X [μm]	400000	399944
Y [μm]	200000	199942
Z [μm]	-360000	-360002

Fuente: los autores.

Al desarrollar la interfaz HMI para el sistema, se pudo observar el margen de error que hay para cada motor. En la Figura 141 se detalla la posición ideal a donde los ejes XYZ deben dirigirse y la posición real a los cuales éstos llegaron. Al calcular el margen de error en cada uno de ellos, se encontró que para el eje X este valor es del 0.014%, en el eje Y, del 0.029%, y en el eje Z del 0.00055%; promediando los valores de los ejes X-Y, se encuentra que el error de estos motores es de aproximadamente 0.0215%. De todo esto se puede inferir que este servomotor en particular es aproximadamente cuarenta (40) veces más preciso que los motores paso a paso. Es por esta razón que para aplicaciones que requieren de gran precisión, como por ejemplo maquinas CNC, se emplean servomotores como sus accionamientos.

También es importante recalcar que parte de esta precisión se debe también a las constantes de avance de cada eje, pues el eje Z posee una constante de 10mm/rev, mientras que los ejes X-Y poseen constantes de 90 y 63mm/rev respectivamente, esta es otra razón por la cual el eje Z resulta ser más preciso que los otros dos.

Se hicieron pruebas con diferentes posiciones en cada uno de los tres ejes con accionamiento simultáneo de la manera que anteriormente se describió. En todas ellas no se presentaron inconvenientes que demostraran algún error tanto en comunicación como los componentes en sí.

5.4 Pruebas Neumáticas

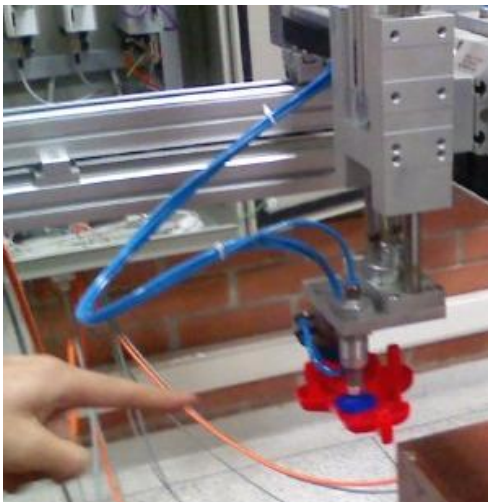
Según datos del fabricante, para que el sistema neumático funcione correctamente se debe garantizar una presión por encima de la de trabajo. Todos los equipos neumáticos son diseñados para trabajar a 6bar, pero debido al consumo, existe una caída en la presión que puede llevar a un funcionamiento deficiente del sistema, este valor superior es de aproximadamente 8bar, de manera que al haber consumo de aire durante el funcionamiento de los dispositivos –gripper y ventosa-, la presión caiga hasta el valor permitido de los 6bar.

Dado que no se dificultó la consecución de un compresor que brindara esta presión, se empleó un compresor cuya máxima presión fue de 6bar, este fue un obstáculo para realizar pruebas en las cuales se levantarán objetos con una masa de aproximadamente 3Kg, que es el valor para el cual fueron seleccionados. Pero aún así, con una caída de presión por el consumo hasta 4bar, se logró levantar una pieza cilíndrica de acero con una masa de aproximadamente 750gr.

El valor de 3Kg es para cargas extremas, pero como se ha mencionado desde un principio, el sistema robótico cartesiano estará al menos en esta etapa manipulando piezas de juguete, cuyas masas son de aproximadamente 5gr.

A continuación se aprecia la sujeción del chasis de los vehículos de juguete por medio de la ventosa.

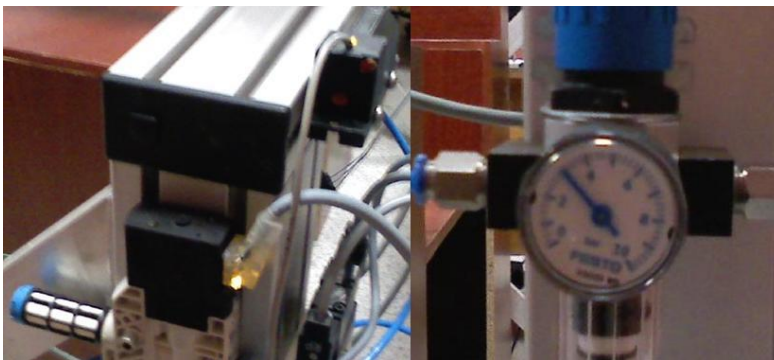
Figura 142. Sujeción chasis por vacío



Fuente: los autores.

La programación realizada en el PLC en cuanto a la parte neumática se hizo de forma que ambos sistemas se activen y desactiven al mismo tiempo, es decir, que tanto gripper como ventosa se enciendan de manera simultánea, de manera que en la Figura 142 no solamente está activo el generador de vacío, sino también el gripper.

Figura 143. Válvula gripper activada y caída de presión



Fuente: los autores.

En la Figura 143 se observa que tanto la válvula 4/2 que gobierna el gripper, como el presóstato conectado a esta válvula se encuentran activos, en la derecha, se aprecia que la presión en todo el sistema está en 3bar, luego de suministrar una presión de 6bar desde el compresor.

5.5 Problemas Presentados

Antes de realizar las rutinas que finalmente ejecuta el sistema robótico cartesiano, e incluso, durante la configuración de la red Profibus, se presentaron algunos inconvenientes que a continuación se mencionan junto con la tarea realizada para solventar dicho problema, de manera que si en algún momento, o alguna práctica de laboratorio se formatea todo el sistema, es muy posible que se presenten de nuevo estos mismos percances.

Tabla 5. Resumen problemas presentados

Evento	Descripción	Posibles Causas	Tarea Ejecutada
El Homing no termina satisfactoriamente	Una vez terminado el referenciado del eje, no se da el aviso de Homing exitoso	<ul style="list-style-type: none"> Los sensores no están bien conectados a las unidades controladoras. Las unidades controladoras poseen desactualizado el firmware. 	<ul style="list-style-type: none"> Se actualizó el firmware de las unidades controladoras.
El PLC no reconoce los esclavos DP y muestra el error 38C4 en el buffer de diagnóstico.	Al intentar cargar la configuración de la red Profibus, el PLC rechaza dicha orden.	<ul style="list-style-type: none"> La dirección Profibus del esclavo no coincide con la parametrizada desde Step 7. No está instalado el archivo GSD del esclavo, de manera que el PLC no puede reconocer el esclavo DP. 	<ul style="list-style-type: none"> Se reconfiguraron las direcciones DP en cada equipo de la red.
Al conectar el cable Profibus en un esclavo DP, el led de la interfaz de éste se activa y el de otro equipo se desactiva.	Los esclavos DP están energizados, pero al conectar el cable Profibus de uno de ellos, otro de los equipos se desactiva	<ul style="list-style-type: none"> Existe una dirección Profibus repetida en alguno de los esclavos DP. 	Se cambió la dirección Profibus de uno de los esclavos DP.
No se pueden cargar cambios en el PLC	Al intentar cargar algún bloque (DB, FB, OB, FC, etc), o configuraciones del Net Pro, se cae la conexión entre el PC y el PLC y se muestra el error 0294:6.	La interfaz que se está utilizando para comunicar el PC con el PLC no soporta la velocidad de transferencia, ni puede cargar los bloques por el peso de los mismos.	Se cambió la interfaz, del PC USB Adapter por conexión Ethernet.
El PLC pasa de modo RUN a STOP y muestra el error 3501.	El PLC pasa de modo RUN a STOP por exceso del tiempo de ciclo normal de vigilancia.	Existe un bloque FB o FC dentro del cual existe un bucle abierto. Y aún si se aumenta el tiempo de vigilancia del PLC, se sigue excediendo dicho tiempo.	Se eliminó dicho bloque FB que contenía el bucle.
El PLC está en modo RUN, pero muestra errores.	El PLC está en modo RUN, pero aún así no se ejecuta la rutina programada y activa el led BF1, indicando que hay un error.	Hay algún bloque (FB, FC, DB, etc.), dentro de la rutina que no ha sido cargado en el PLC, de manera que éste no lo encuentra.	Se cargó el bloque que hacía falta.

Fuente: los autores.

5.6 Rutinas Finales

Teniendo en cuenta algunas asignaturas del pensum de la facultad de Ingeniería Industrial, se desarrollaron dos rutinas que modelan casos de estudio dentro de dichas asignaturas.

Dentro del marco de la asignatura *Métodos de Optimización*, se estudian modelos matemáticos basados en las denominadas Teorías de Colas.

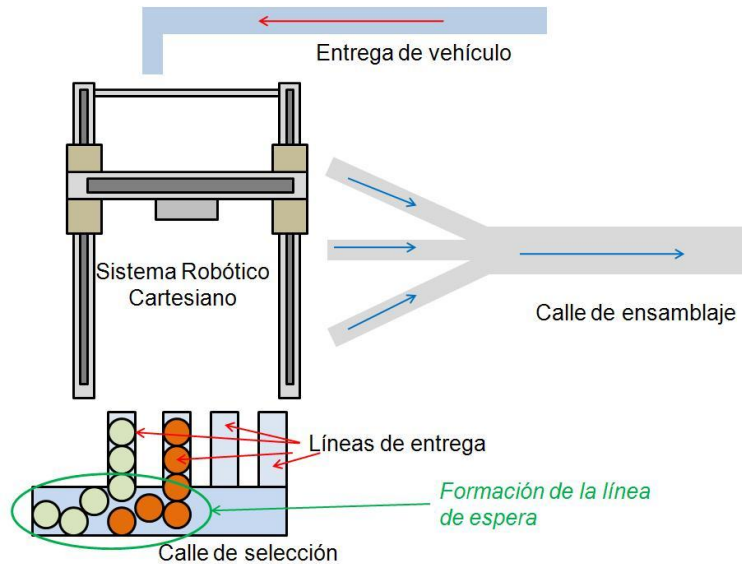
“Una Cola es una línea de espera y la teoría de colas es una colección de modelos matemáticos que describen sistemas de líneas de espera particulares o de sistemas de colas. Los modelos sirven para encontrar un buen compromiso entre costes del sistema y los tiempos promedio de la línea de espera para un sistema dado.

El problema es determinar qué capacidad o tasa de servicio proporciona el balance correcto. Esto no es sencillo, ya que un cliente no llega a un horario fijo, es decir, no se sabe con exactitud en qué momento llegarán los clientes. También el tiempo de servicio no tiene un horario fijo.”⁵⁶

Una línea de espera, en este proyecto en particular, se da cuando clientes (los elementos entregados por la calle de selección) llegan a un lugar (líneas de entrega) demandando un servicio (ser llevados a la banda de ensamblaje) a un servidor (sistema robótico cartesiano), el cual tiene cierta capacidad de atención. Si el servidor no está disponible inmediatamente, y el cliente decide esperar, entonces se forma en la línea de espera, como lo muestra la siguiente figura.

⁵⁶ (SARAGOZA HEREDIA, Alberto), p 1.

Figura 144. Modelo líneas de espera



Fuente: los autores.

Como se puede apreciar en la Figura 144, el sistema robótico cartesiano debe ser capaz de atender tres tipos de clientes, los elementos que entrega la calle de selección, la demanda de piezas que pueda realizar la calle de ensamblaje, y los vehículos ensamblados que están listos para almacenar.

El modelamiento completo para este sistema consiste en que el sistema robótico tome sus propias decisiones de acuerdo a la información que lea desde los tres clientes, es decir, si hay piezas o no en la calle de selección, y si las hay, cuál es de mayor prioridad para entregarla en la calle de ensamblaje; igualmente, si hay vehículos listos para almacenar, y además de esto, qué tipo de vehículo es, cual es su color, cuál es su posición en la bodega de almacenamiento, entre otros.

La primera rutina se programó partiendo del supuesto de que las piezas a manipular son el chasis inferior del vehículo y las ruedas grandes (traseras) y pequeñas (delanteras) del mismo, y que no hay necesidad de definir cuál de ellos es de mayor prioridad para entrega, igualmente, se fabrica solo un tipo de vehículo, el cual es almacenado en un solo lugar, según lo muestra el siguiente diagrama de flujo.

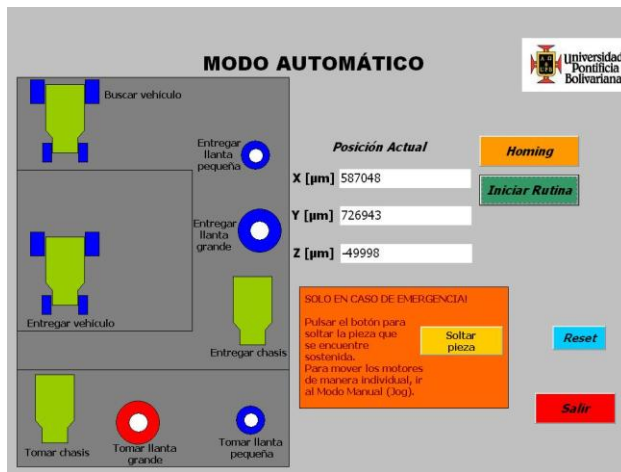
Figura 145. Diagrama de flujo Modo Automático



Fuente: los autores.

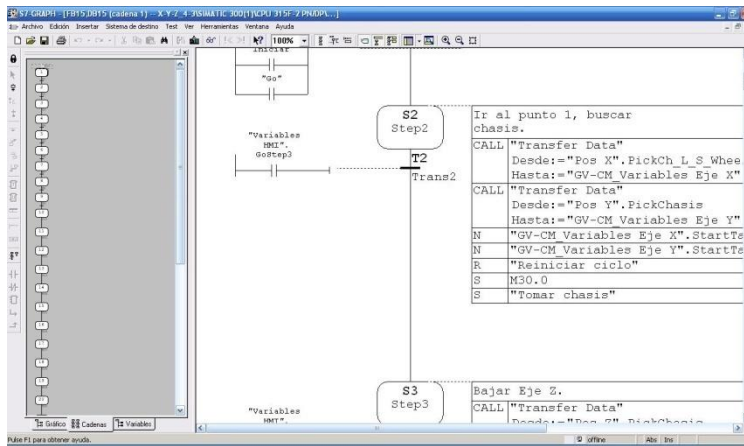
A partir de estos parámetros se desarrolló la primera rutina, la cual se denominó *Modo Automático*. Para dicha secuencia se hizo uso del lenguaje Grafcet, pues resulta ser idóneo para este tipo de aplicaciones. Las siguientes imágenes muestran la interfaz HMI desarrollada en WinCC para la supervisión del proceso, así como algunas partes de la programación en Grafcet.

Figura 146. Interfaz HMI Modo Automático



Fuente: los autores.

Figura 147. Secuencia Grafset Modo Automático



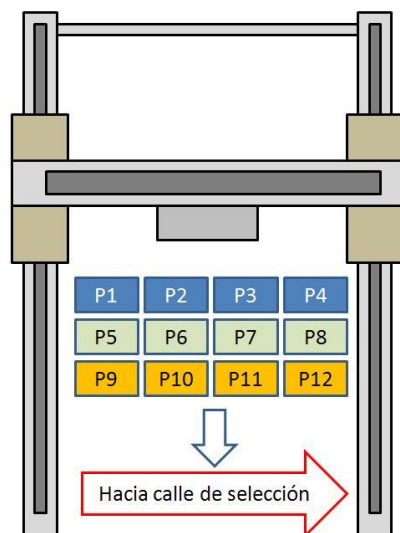
Fuente: los autores.

La segunda rutina realizada parte del marco de la asignatura de *Localización y Distribución de Planta*.

*“La distribución de planta es un concepto relacionado con la disposición de las máquinas, los departamentos, las estaciones de trabajo, las áreas de almacenamiento, los pasillos y los espacios comunes dentro de una instalación productiva propuesta o ya existente. La finalidad fundamental de la distribución en planta consiste en organizar estos elementos de manera que se asegure la fluidez del flujo de trabajo, materiales, personas e información a través del sistema productivo”.*⁵⁷

Partiendo de este concepto, la segunda rutina consiste en una secuencia en la cual se escoge una pieza en particular, ubicado en un espacio único y entregarlo en una zona de descarga realizando la menor cantidad de movimientos posibles. Una aplicación de este modelo es, por ejemplo, si el sistema robótico cartesiano estuviera alimentando la calle de selección, atendiendo como demanda la solicitud de piezas de acuerdo a las prioridades de los procesos dentro de la calle de ensamblaje que lo requieran. A esta secuencia se le denominó *Modo Paletizado*.

Figura 148. Modelo secuencia paletizado

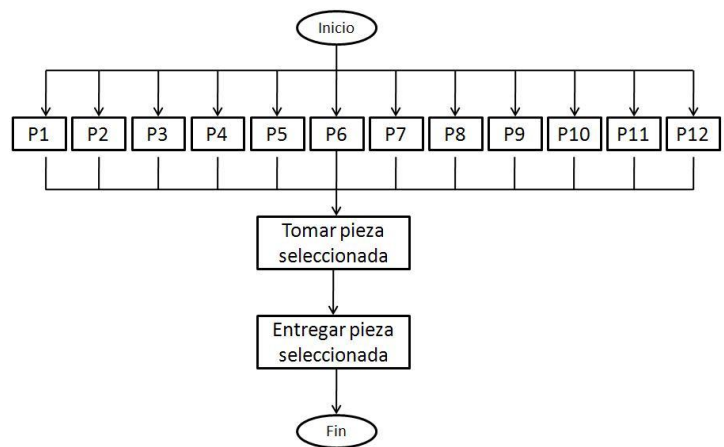


Fuente: los autores.

⁵⁷ (Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales)

El funcionamiento de esta rutina se expresa en el siguiente diagrama de flujo.

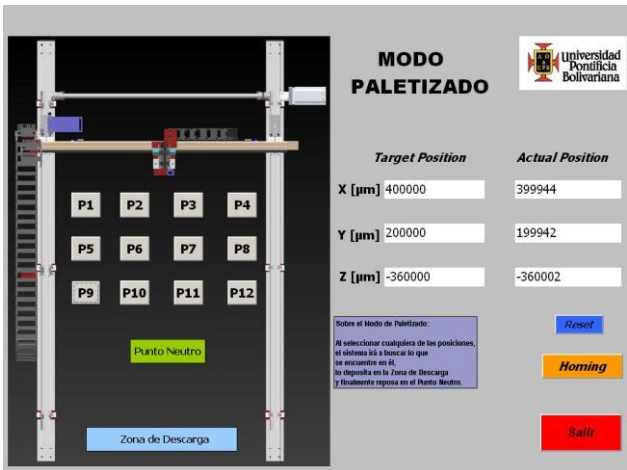
Figura 149. Diagrama de flujo Modo Paletizado



Fuente: los autores.

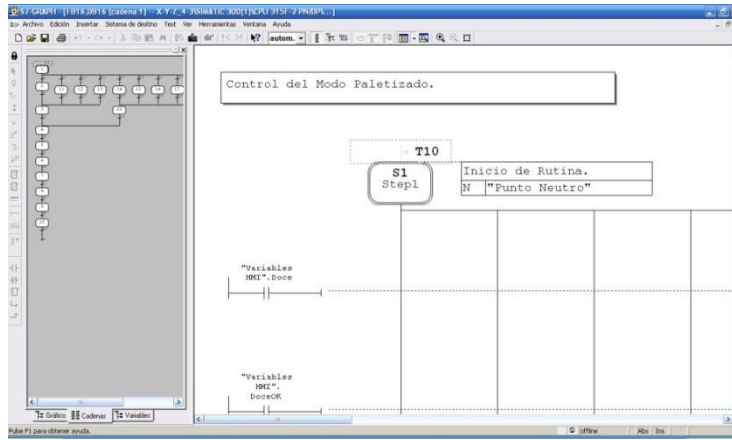
Esta secuencia también fue desarrollada bajo el lenguaje de Grafcet por las mismas razones que para el modo automático. A continuación se presentan imágenes de la interfaz HMI desarrollada para esta rutina, al igual que algunas partes de la programación en Grafcet.

Figura 150. Interfaz HMI Modo Paletizado



Fuente: los autores.

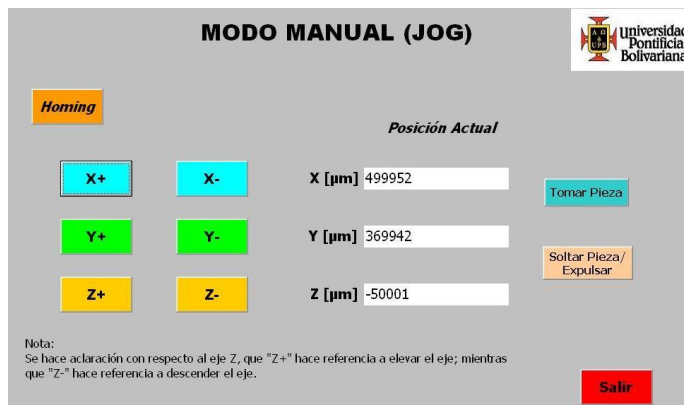
Figura 151. Secuencia Grafset Modo Paletizado



Fuente: los autores.

Aparte de los modos anteriores, se habilitó también por medio de la interfaz HMI el *Modo Manual o Jog* (ver Figura 152). En este modo se puede operar el sistema robótico cartesiano –como su nombre lo indica- de manera manual, es decir, se puede mover cada eje de manera individual a gusto del operario, y también activar o desactivar la ventosa y el gripper.

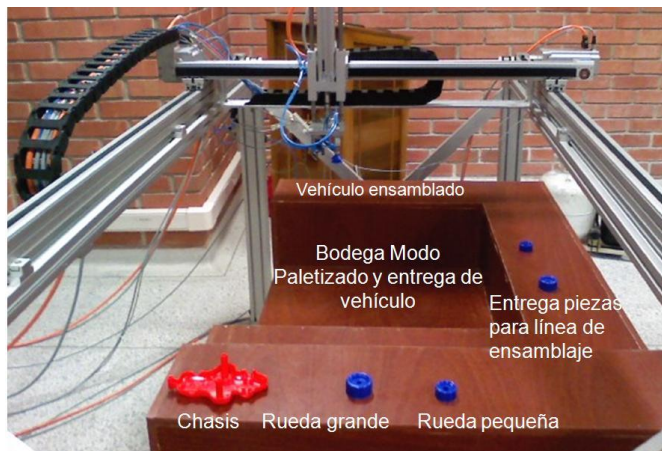
Figura 152. Interfaz HMI Modo Manual-Jog



Fuente: los autores.

En la Figura 153, se observa el prototipo de línea de ensamble y entrega de vehículo, así como la bodega para el modo paletizado.

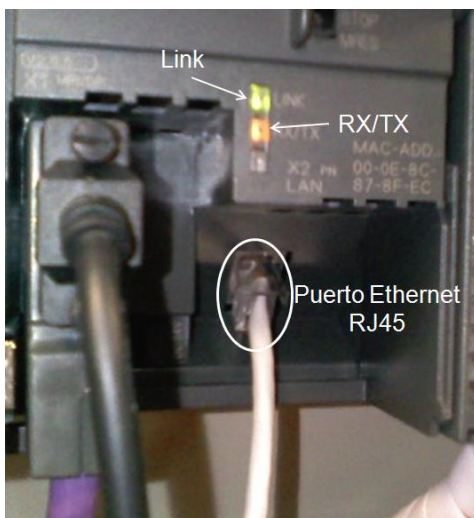
Figura 153. Superficie para los diferentes modos



Fuente: los autores.

Finalmente, no está demás recalcar que para la puesta en marcha del sistema por medio de la interfaz HMI desarrollada en WinCC, la comunicación entre el PLC y el PC se llevó a cabo por medio de red Ethernet. La siguiente figura muestra los leds (Link y RX/TX) del PLC que indican el intercambio de información entre estos dos equipos.

Figura 154. Comunicación Ethernet-WinCC



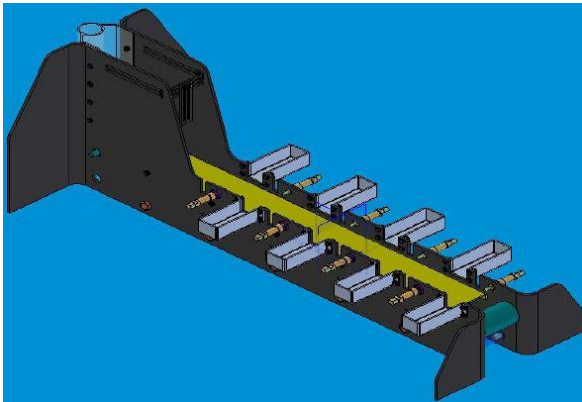
Fuente: los autores.

6. PROPUESTA DE INTERCONEXIÓN

Dado que el presente proyecto hace parte de un proyecto macro de integración en el cual se desea simular el proceso de ensamble de un vehículo de juguete, y teniendo en cuenta los procesos contenidos en el mismo, se hace una propuesta de interconexión de cada estación de trabajo.

Como se ha descrito con anterioridad, dicho proyecto macro consta de tres fases, la primera -y que ya se encuentra finalizada- es la de una calle de selección de objetos de acuerdo a su forma, color, tamaño y material como aparecen en las Figura 155 y Figura 156.

Figura 155. Modelo CAD de la calle de selección



Fuente: tomado de (LOPEZ LOPEZ, y otros, 2007), p. 63.

Figura 156. Calle de Selección finalizada



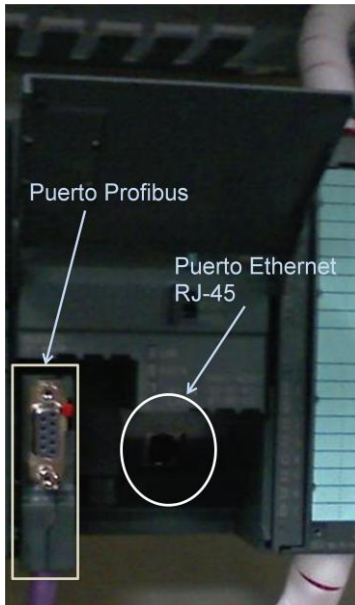
Fuente: tomado de (LOPEZ LOPEZ, y otros, 2007), p. 93.

Este sistema está gobernado por un PLC Siemens S7-200 con CPU 226, además, cuenta con un módulo de Ethernet CP 243-1 de Siemens, éste permitirá la conexión entre sistemas S7-200, S7-300 y S7-400; posee puerto RJ-45 y soporta velocidades de 10 y 100Mbps.

El sistema cartesiano cuenta con una CPU de la serie S7-300, referencia 315F-2PN/DP que viene con puerto Ethernet integrado (PN se refiere a Profinet, DP a Profibus), por tanto, no hay necesidad de adquirir un módulo que permita dicha conexión.

El puerto es del tipo RJ-45 y soporta velocidades de 10 y 100Mbps.

Figura 157. CPU 315F-2PN/DP



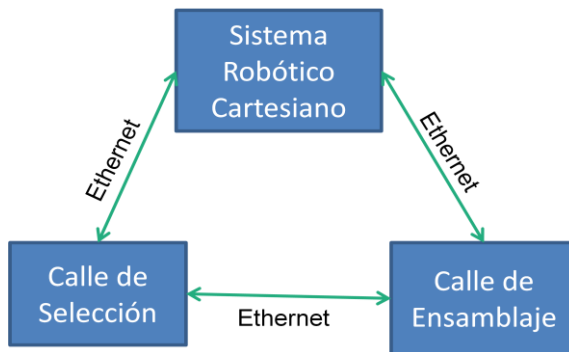
Fuente: los autores.

La etapa siguiente, es decir, la calle de ensamblaje aún no se ha diseñado, pero dado a que se prevé que dentro de su proceso influyen muchas señales, se necesita de una CPU de bastante capacidad para la lectura y procesamiento de las mismas, por tanto, se sugiere también de una de la serie S7-300. Especificar cuál de ellas es la mejor opción será parte de la investigación que desarrollen las personas que ejecuten este proyecto, dentro de la cual se deberá igualmente estudiar si es mejor adquirir una CPU con Ethernet integrado, o adquirir un módulo Ethernet aparte, que dentro de las recomendaciones de Siemens se encuentran la CP 343-1 y CP 343-1 Advanced (ver Figura 54).⁵⁸

Partiendo del supuesto que se escoja una CPU con módulo Ethernet externo, por ejemplo la CP 343-1 Advanced, se hace necesario conectar estos tres procesos para un intercambio pleno de datos entre todos y cada uno de ellos.

⁵⁸ Cabe anotar que se sugiere la marca Siemens para facilidades de manejo, pero esta fase puede contar con cualquier marca de PLC la cual garantice comunicación vía Ethernet.

Figura 158. Comunicación entre los procesos



Fuente: los autores.

Como se vio en los anteriores apartados, para aplicaciones industriales no se recomienda el empleo de concentradores o Hubs, sino mejor switches. Partiendo de esta premisa, se pueden presentar dos escenarios; el primero es que solamente se interconecten estos tres procesos en una red, y el segundo es que se proyecte conectar esta red a otros procesos, como por ejemplo, desarrollar una red en la que se supervise no solo el ensamble del vehículo, sino también los procesos de los demás laboratorios, es decir, los intercambiadores de calor, las torres de enfriamiento y de condensación del laboratorio I-205, el sistema de aire acondicionado del laboratorio I-206, el sistema de extracción de aceite del laboratorio I-306 entre otros, sistemas que actualmente cuentan con plena capacidad de enlazarse a una red Ethernet.

6.1 Interconexión CIM

Para el primer caso, como solamente se van a enlazar tres procesos, se hace necesario de un solo switch que permita la comunicación entre ellos. Por su simplicidad, se recomienda el *Scalance X005* de Siemens que se muestra a continuación.

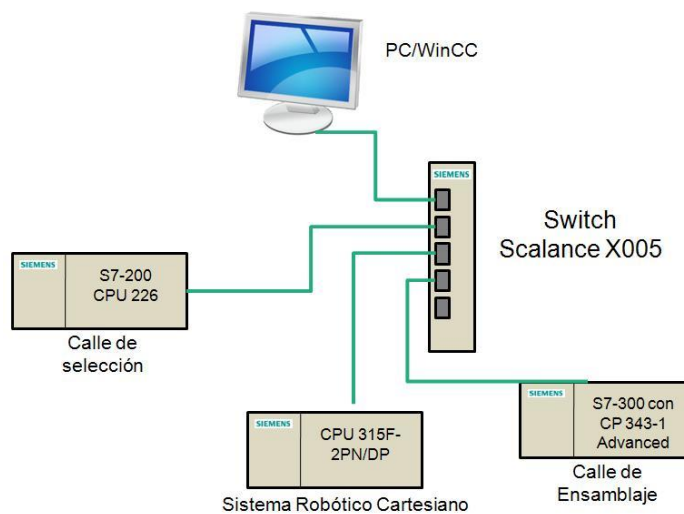
Figura 159. Switch Siemens-Scalance X005



Fuente: Catálogo Comunicación Industrial IK-PI 2009, Siemens; p. 2/107.

Con este dispositivo, el aspecto de la red sería el siguiente, teniendo en cuenta que se necesita de un equipo para visualizar el estado de los tres procesos, puede ser un PC que tenga instalado el software de supervisión WinCC, o un panel.

Figura 160. Red con Scalance X005



Fuente: los autores.

Se propone este dispositivo, pues cuenta con 5 puertos RJ-45, soporta velocidades de 10 y 100Mbps, es para conectar redes en estrella, y además es recomendado para pequeñas redes.

6.2 Interconexión Laboratorios Bloque I

Para el segundo caso, en el que se desean crear varias redes e interconectarlas entre sí, además de un acceso a internet, se debe hablar de routers, por lo tanto, de direcciones IP.

Para la red de la celda de manufactura del vehículo, se recomienda enlazar los procesos por medio del *Scalance X204-2*, es un switch, pero también se comporta como router, permite la asignación de direcciones IP por protocolo DHCP, así como direcciones fijas por medio del software Step 7; éste mismo dispositivo se puede emplear para enlazar los equipos del laboratorio de transferencia de calor del laboratorio I-205 por las características antes mencionadas.

Figura 161. Scalance X204-2



Fuente: Catálogo Comunicación Industrial IK-PI 2009, Siemens; p. 2/118.

Para los otros sistemas, estos son, el aire acondicionado del laboratorio I-206 y el de extracción de aceite del I-306, no se sugiere adaptar algún otro sistema para enlazarlos, pues no hay más sistemas o procesos dentro de los respectivos recintos a los cuales acoplarlos, pero cabe anotar que si en algún momento estos procesos desean expandirse junto a otros, el Scalance X204-2 también se adapta fácilmente a dichas aplicaciones. Es de recordar que el sistema de aire acondicionado cuenta con una unidad Ethernet

independiente, esta es la CP 343-1, y el sistema de extracción de aceite cuenta con el módulo CP 243-1 (ver Figura 162), estos son totalmente compatibles entre sí para esta aplicación en particular.

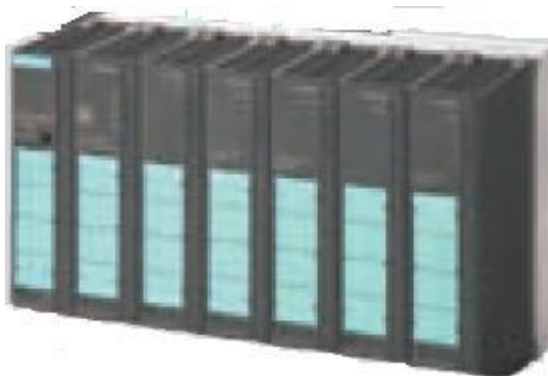
Figura 162. CP 243-1, módulo Ethernet para S7-200



Fuente: Catálogo Comunicación Industrial IK-PI 2009, Siemens; p. 2/262.

Finalmente, para acoplar todos estos elementos, se sugiere la adaptación del *Scalance X414-3E*, que posee las mismas capacidades del X204, además de que permite la creación de redes virtuales (VLAN), comunicación plena con routers para aplicaciones en internet, de manera que todos y cada uno de los procesos pueden ser supervisados desde cualquier acceso vía internet. Maneja velocidades de 10, 100 y 1000Mbps, por tanto se presta para futuras ampliaciones en las que sea necesario manejar volúmenes grandes de información por medio de fibra óptica.

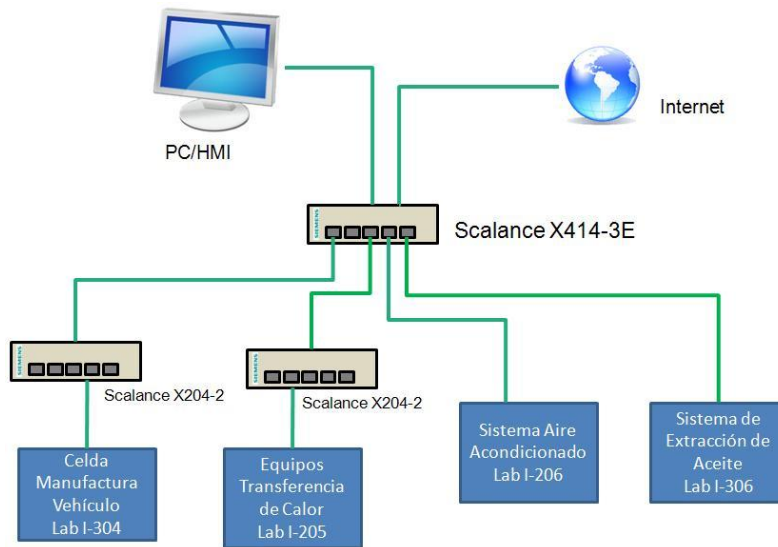
Figura 163. Scalance X414-3E



Fuente: Catálogo Comunicación Industrial IK-PI 2009, Siemens; p. 2/152.

Todos estos elementos estarían interconectados en topología estrella, cuyo aspecto se muestra a continuación.

Figura 164. Red final con todos los procesos



Fuente: los autores.

Los anteriores elementos hacen parte de los componentes activos dentro de una red Ethernet, pero para realizar dicha conexión se hace necesario elementos pasivos, es decir, los medios físicos de conexión.

Todas y cada una de estas unidades poseen puertos RJ-45 y soportan velocidades de 10 y 100Mbps, a diferencia del Scalance X414-3E, que además de soportar estas velocidades también llega hasta Gigabit Ethernet, es decir, los 1000Mbps.

Dado que siempre se pensó que cada proceso sea lo más cercano a lo que se encuentra en la industria, por ello se recomiendan estos equipos, además los cables que Siemens ofrece, dentro de los cuales se tienen los *IE FC RJ45 Cable 4X2*, son cables de par trenzado de ocho hilos como lo muestra la Figura 165.

Figura 165. Cable par trenzado Siemens-IE FC RJ45 Cable 4X2



Fuente: Catálogo Comunicación Industrial IK-PI 2009, Siemens; p. 2/53.

Dentro de los conectores, se tienen los *IE FC RJ45 Plug 4X2*, es un conector RJ45 de 8 pines, especial para alcanzar las velocidades de Gigabit Ethernet.

Figura 166. Conector IE FC RJ45 Plug 4X2



Fuente: Catálogo Comunicación Industrial IK-PI 2009, Siemens; p. 2/39.

La ventaja de estas opciones es que la persona misma puede realizar las conexiones cable-conector in situ; pero también se tiene la opción de adquirir cables que ya vienen con sus respectivos conectores. Es el caso de los *IE TP Cord*, son cables preconectados, con una longitud máxima de 100m (ver Figura 167).

Figura 167. Cable preconectado IE TP Cord



Fuente: Catálogo Comunicación Industrial IK-PI 2009, Siemens; p. 2/61.

Se han sugerido estas referencias en especial teniendo en cuenta el criterio de emplear elementos de tipo industrial, pero es necesario precisar que los equipos anteriormente mencionados funcionan plenamente con cualquier tipo de cable de par trenzado, así como de fibra óptica (teniendo en cuenta los conectores que se exigen), sea apantallado (STP), como es el caso de los cables antes descritos, ó sin apantallamiento (UTP) que son los que se encuentran normalmente en instalaciones de oficina.

Como se ha expresado enfáticamente y con anterioridad, ésta es una propuesta preliminar dentro de las múltiples opciones que se pueden desarrollar para llevar a cabo dicho propósito, una de ellas y de bastante interés es la de acoplar todos estos sistemas aplicando tecnologías inalámbricas, pero ello también hace parte de la investigación que se desarrolle dentro del marco de otro proyecto de grado en el cual se puedan implementar más equipos y de otras marcas.

CONCLUSIONES

El sistema robótico cartesiano, en su estructura final posee carreras útiles de 1200X800X400mm en los ejes XYZ respectivamente, sobrepasando así las expectativas iniciales de diseño, dando como beneficio un área de trabajo mayor, dentro del cual se pueden acoplar varios procesos en donde el robot puede participar en parte de ellos para así recrear procesos de mayor complejidad y que se aproximen más a los procesos de la alta industria.

Pese a que no fue posible llevar a cabo las pruebas neumáticas con la presión necesaria para levantar la masa teórica de 3Kg, se pudo ver que estos sistemas están en plena capacidad de hacerlo, pues se logró levantar una carga de 750gr, es decir, el 25% de la carga nominal aún cuando se manejó una presión de 4bar, es decir, la mitad de la presión requerida.

El sistema robótico cartesiano está totalmente capacitado para acoplarse a cualquier proyecto futuro, al tener a su disposición equipos que le permiten acceder a redes Ethernet, con las cuales se pueden recrear procesos de mayor complejidad al poder manipular gran cantidad de datos en tiempo real, abriendo así la puerta a procesos en los que se manejen grandes bases de datos, como por ejemplo sistemas SQL, entre otros.

Este sistema es totalmente abierto a futuras modificaciones, de manera que no termina aquí, pues además de que se puede expandir, se presta para prácticas de laboratorio en las que sólo sea necesario el empleo de uno de sus accionamientos sin tener que hacer uso del resto.

Tanto la facultad de Ingeniería Mecánica, como Ingeniería Industrial han sido beneficiadas en gran proporción, pues con este sistema cartesiano se podrán asimilar conceptos teóricos que dentro del marco de algunas asignaturas de sus respectivos pensum sea algo que se dificulte para el estudiante al no verlo aplicado de una manera más directa.

RECOMENDACIONES

Como se mencionó anteriormente, el sistema robótico cartesiano es totalmente abierto para futuros proyectos en los cuales se puedan realizar mejoras. Por ejemplo, se puede fácilmente adaptar algún mecanismo como actuador final para realizar maquinado de piezas, como por ejemplo fresado, corte láser, entre otros. Para estas aplicaciones se hace estrictamente necesario de movimientos simultáneos. Para ello se recomienda generar programas basados en el lenguaje SCL, que es basado en Pascal, para la interpolación de las posiciones y velocidades que debe tomar cada eje para garantizar un movimiento simultáneo. Otra forma de lograrlo es adaptando la unidad CMXR de Festo, que es idóneo para este tipo de aplicaciones.

La mesa sobre la cual se tienen los elementos que manipula actualmente el sistema robótico cartesiano, no posee sensórica, de manera que para recrear un proceso más cercano a la realidad, se recomienda instalar sensores en cada uno de los lugares en donde se encuentren las piezas, de manera que el sistema lea esta información y sobre ella tome decisiones de prioridad al manipular dichas piezas.

El sistema robótico cartesiano en su tablero de potencia cuenta con una parada de emergencia que se encuentra habilitada, pero no existe alguna rutina que le indique al sistema cómo reaccionar ante un paro de emergencia. Se deja como tarea de un próximo proyecto la implementación de la guía de estudios de marchas y paradas GEMMA para aprovisionar al sistema de herramientas que le permitan reaccionar de manera controlada ante paros de emergencia o de cualquier otro tipo.

Se recomienda la adaptación de un panel de operador MP377 12" key&touch para la correcta manipulación del sistema robótico cartesiano, pues a pesar de que se desarrolló la interfaz HMI, no se cuenta con un dispositivo de supervisión del mismo. Se recomienda este panel en base a los requerimientos de expansión del presente proyecto, además de la gran versatilidad que ofrece, sobre todo al trabajar vía Ethernet en el intercambio de datos con los demás equipos que se vayan a acoplar.

Se recomienda el fijar las bases del sistema robótico cartesiano al piso para evitar problemas de vibración y desfase de los motores provocados por no estar empotrado.

BIBLIOGRAFÍA

ARDILA REY Jorge A., DÍAZ ROFRÍGUEZ Jorge Luis y PARDO GARCÍA Aldo Diseño e implementación de una celda de manufactura con el acople de PLC y manipulador RV-M1 utilizando el protocolo DDE [Publicación periódica]. - Pamplona-Colombia : Unipamplona, 2007. - 10 : Vol. 2.

BALCELLS Josep y ROMERAL Jose Luis Autómatas Programables [Libro]. - México : Alfaomega.

BEASLEY Jeffrey S. Networking [Libro]. - Michigan : Prentice Hall, 2008.

CLEMENTE Manuel DISEÑO, INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL [Libro]. - Valencia : Escuela Tecnica Superior de Ingeniera.

CUEVAS MARTINEZ William y JAIMES FLOREZ Oscar Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano Paletizador [Libro]. - Bucaramanga : UNAB, 2006.

FESTO Sensores en la técnica de fabricación [Libro]. - [s.l.] : FESTO.

HAMROCK Bernard J. Elementos de Máquinas [Libro]. - Mexico : Mc Graw Hill.

HAMROCK Bernard J., JACOBSON Bo y SCHMID Steven R. Elementos de Máquinas [Libro]. - Mexico : Mc Graw Hill, 2000.

HESSE Stefan Las Pinzas y sus Aplicaciones [Libro]. - [s.l.] : Festo.

HESSE Stefan Sujetar con Aire Comprimido y Vacío [Libro]. - [s.l.] : FESTO.

LOPEZ LOPEZ Cristian Eduardo y PLATA MOSQUERA Johanna Marcela DISEÑO, CONSTRUCCION Y PUESTA EN MARCHA DE UNA CALLE PARA LA SELECCIÓN DE OBJETOS CARACTERIZADOS POR SUS PROPIEDADES FÍSICAS [Libro]. - Bucaramanga : UPB, 2007.

MORALES MATA Ismael y TANG Yu Diseño mecatronico de un Robot cartesiano enfocado al corte de piezas de calzado [Libro].

PIEDRAFITA MORENO Ramón Ingeniería de la Automatización Industrial [Libro]. - México : Alfaomega, 2004.

PROFIBUS INTERNATIONAL Profibus, Technology and Application [Publicación periódica]. - 2002.

REYNDERS Deon y WRIGHT Edwin Practical TCP/IP and Ethernet Networking [Libro]. - Great Britain : Elsevier, 2003.

ROMERO Diego Introducción a Ethernet Industrial [Conferencia]. - Argentina : [s.n.], 2005.

SANCHEZ Martín [y otros] Historia de la Robótica: de Arquitas de Tarento al robot Da Vinci (Parte I) [En línea]. - Febrero de 2007. - <http://www.actasurologicas.info/v31/n02/pdf/3102OR01.pdf>.

SARAGOZA HEREDIA, Alberto Teoría de Colas [En línea]. - http://exa.unne.edu.ar/depar/areas/informatica/evalua/teoria_de_colas.pdf.

SERRANO Antonio Neumática [Libro]. - Madrid : Paraninfo.

SIEMENS Training document for the company-wide automation solution Totally Integrated Automation (T I A) [Libro]. - [s.l.] : SIEMENS.

STERLING Jr Donald J. y WISSLER Steven P. The Industrial Ethernet Networking Guide [Libro]. - [s.l.] : Thomson-Delmar Learning, 2003.

TORRES Fernando [y otros] Robots y Sistemas Sensoriales [Libro]. - Madrid : Prentice Hall, 2002.

Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales Taller de Ingeniería de Métodos [En línea]. - <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4100002/lecciones/taxonomia/layo ut.htm>.

UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL Robot AFMA [En línea] // UMR 6602 UBP - CNRS. - UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL. - <http://www.lasmea.univ-bpclermont.fr/spip.php?article340>.

UNIVERSITÉ LAVAL Tripteron et Quadrupteron [En línea] // LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DE L'UNIVERSITÉ LAVAL. - Université Laval. - <http://robot.gmc.ulaval.ca/fr/recherche/theme104.html>.

ANEXOS

ANEXO A

PARAMETRIZACIÓN TARJETAS CONTROLADORAS DE LA SERIE CMMS-ST-C8-7 PARA LOS MOTORES PASO A PASO DE LA SERIE EMMS-ST

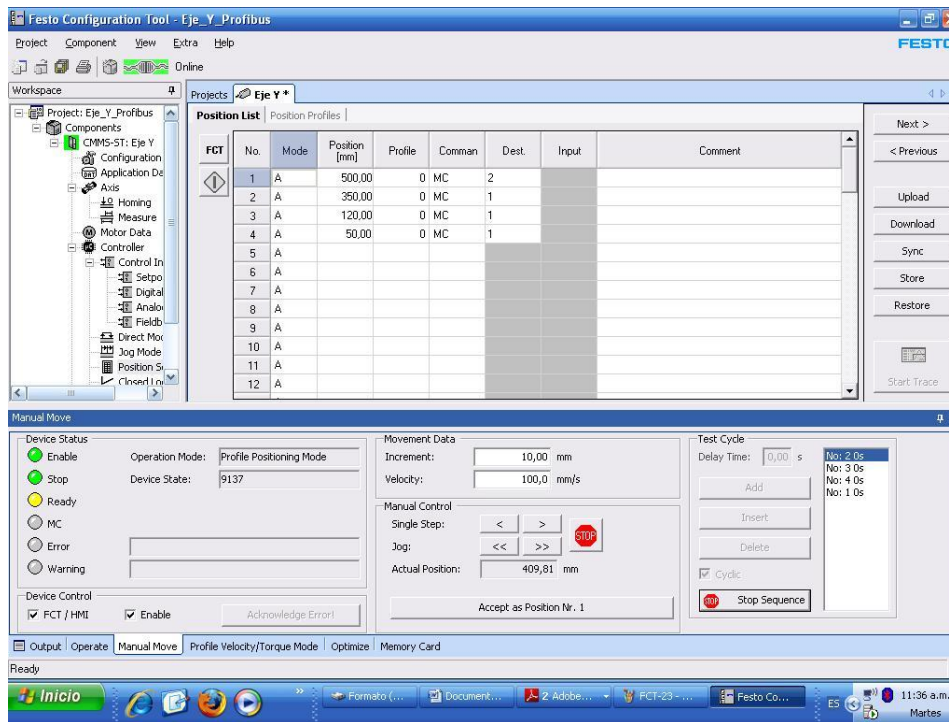
Dentro de la gama de motores paso a paso que ofrece la firma Festo se encuentran las series MTRE-ST y la EMMS-ST que son controlados por tarjetas de las series SEC-ST y CMMS-ST respectivamente.

A continuación se hará una descripción rápida y breve de cómo parametrizar las tarjetas controladoras tipo CMMS-ST-C8-7 de los motores paso a paso marca Festo, de la serie EMMS-ST; motores que se encuentran instalados en el sistema cartesiano para dar movimiento a los ejes X e Y. Tal configuración es para la primera puesta en marcha.

El software empleado para la parametrización de las tarjetas, el *Festo Configuration Tool-FCT* es exclusivo para la serie CMMS-ST.

1. Conectar la unidad controladora CMMS-ST-C8-7 con el cable tipo RS-232 en el puerto X5-Serial al PC desde donde se hará la parametrización, y energizar la unidad.
2. Abrir el software de parametrización *Festo Configuration Tool-FCT*.
3. Crear un nuevo proyecto y darle un nombre cualquiera. Seleccionar el tipo de elemento a parametrizar, en este caso la CMMS-ST, y digitar un nombre en *Componentname* y luego aceptar.
4. En la ventana que se abre, ingresar los parámetros de tarjeta, motor y eje a configurar, es decir, voltaje para la etapa de potencia, tipo de motor, tamaño del motor, tipo y tamaño del eje, carrera de trabajo, entre otros.
5. Pulsar el botón *Offline* para que se establezca comunicación entre el PC y la unidad controladora. El sistema mostrará la información que se encuentra guardada en la unidad y la que se parametrizó; pulsar en la opción *Download* para que los datos configurados anteriormente sean cargados en la unidad controladora.
6. Una vez establecida la comunicación entre ambos equipos, ir a la ventana *Homing*, en la parte inferior, seleccionar la pestaña *Operate*, y habilitar los recuadros *FCT/HMI* y *Enable*, el motor debe activarse. Luego, oprimir el botón *Start Homing*; se debe iniciar el recorrido de referenciado.
7. Una vez terminado el *Homing*, ir a la pestaña *Set Position Table*, en la ventana *Position List*, e introducir valores aleatorios de posiciones y velocidades a las que se desee llevar el eje. Se pueden introducir hasta 63 diferentes posiciones.
8. Una vez parametrizadas éstas posiciones, introducirlas en el recuadro que aparece en la parte inferior derecha de la ventana, luego se deben cargar a la unidad pulsando *Download*, y finalmente oprimir el botón *Run Sequence*; el eje debe empezar a desplazarse a las posiciones y velocidades anteriormente configuradas.

Figura 168. Ejecutando secuencia



Fuente: los autores.

La Figura 168 visualiza el FCT cuando el eje se está desplazando a las posiciones y velocidades configuradas para la primera puesta en marcha.

Para una información más detallada al respecto, dirigirse al manual de parametrización del mismo.

ANEXO B

PARAMETRIZACIÓN TARJETA CONTROLADORA DE LA SERIE SEC-AC PARA SERVOMOTORES DE LA SERIE MTR-AC

Dentro de la línea de servomotores que ofrece la firma Festo se encuentran las series MTR-AC y la EMMS-AS que son controlados por tarjetas de las series SEC-AC y CMMP-AS respectivamente.

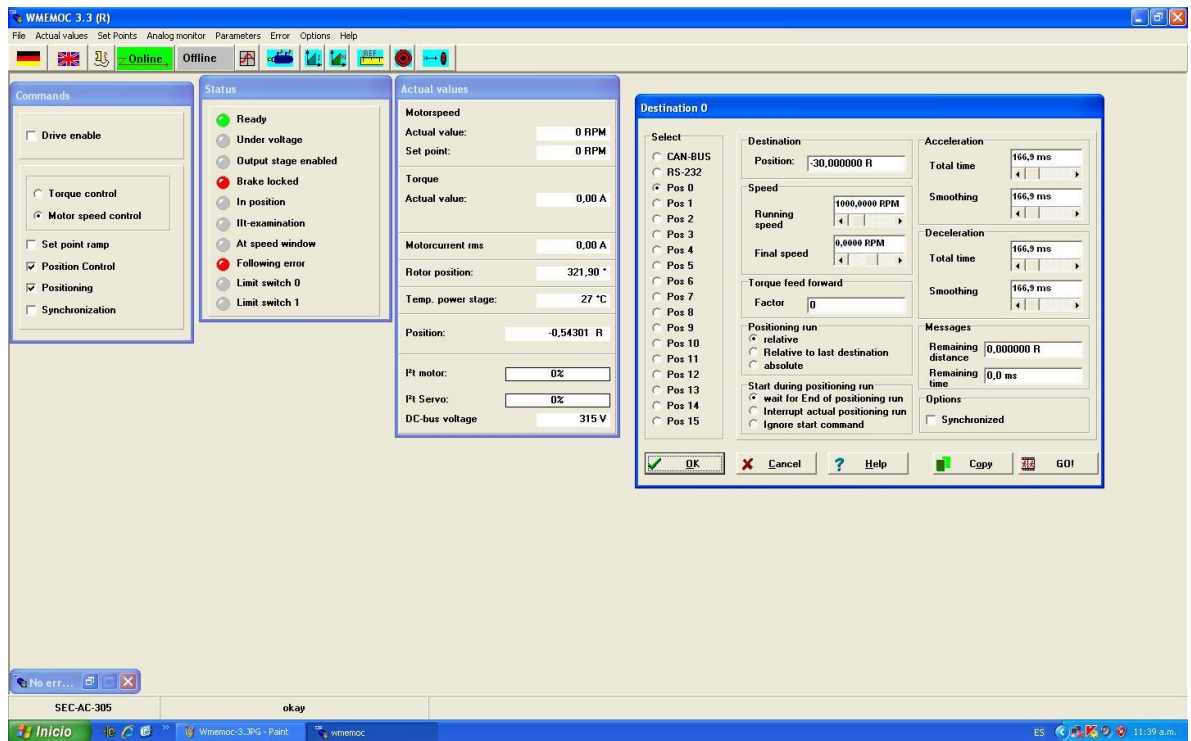
En el presente documento se hará una descripción breve y rápida de cómo configurar la tarjeta controladora SEC-AC-305-PB para el servomotor MTR-AC-40-3S-AB de la firma Festo, para la primera puesta en marcha de los mismos. Este motor se encuentra acoplado al cilindro DNCE-32-400-BS-“10”P-Q, el cual acciona el Eje Z del sistema cartesiano.⁵⁹

El software empleado para la parametrización de la tarjeta, el *Wmemoc* es exclusivo para la serie SEC-AC.

⁵⁹ Cabe resaltar que la descripción que se hará pertenece a un ejemplo de aplicación; la parametrización real del servo contiene más parámetros de los que aquí se muestran.

1. Conectar la unidad controladora SEC-AC-305 con el cable tipo RS-232 en el puerto X5-Serial al PC desde donde se hará la parametrización, y energizar la unidad.
2. Abrir el software de parametrización *Wmemoc 3.3*. Una vez abierto el software, dirigirse a *File, Parameter Set, Read from file and store into servo*
3. En la ventana que se abre, seleccionar el tipo de motor y orientación del mismo, así como la unidad a la que se acoplará, el cual será un motor MTR-AC-40, orientación vertical y seleccionar el *DNCE 32U 10-AC-40-3s-Ax*.
4. Establecer el mando del servo para la primera puesta en marcha desde el PC, siguiendo la ruta *Parameters, Device Parameters, Regulator enable logic*, y luego seleccionar la opción *DIn5 and serial port (RS-232)*.
5. El sistema debe comprobar algunos parámetros, para ello se debe seguir la ruta *Parameters, Motor Data*. En la ventana que emerge, pulsar *Auto detect*, aquí el servo empieza a moverse lentamente y de manera pulsada en ambas direcciones, es por esta razón que debe estar desacoplado del DNCE. Para habilitar el servo, debe seleccionarse la opción *Drive Enable* que aparece en una ventana llamada *Commands*, de lo contrario el motor no se moverá.
6. Una vez terminado esta parte se procede a conectar el motor con el cilindro DNCE, luego de ello, dentro del *Wmemoc* dirigirse a *Parameters, Device parameters, Limit Switch Logic*, aquí se configuran los sensores como normalmente abiertos, para ello se selecciona la opción *Shutter*.
7. Para realizar el Homing, se debe ir a *Parameters, Positioning Reference position*. En la ventana emergente, introducir el valor de 40 en *Max. Turns Permitted*, los otros valores no se deben modificar, excepto *Direction*, el cual debe estar en *Turn Right*. Una vez parametrizada esta parte, pulsar *GO*, el servo empezará a realizar el Homing.
8. Una vez terminado el recorrido de referenciado, se puede proceder a realizar las pruebas de posicionamiento con valores que se deseen, para esto se debe seleccionar *Parameters, Positioning, Destination Parameters* e ingresar los valores deseados a los que debe dirigirse el servo.
9. Finalmente, se deben guardar los cambios en la unidad SEC-AC, para ello se debe ir a *Parameters, Save parameters*, de esta manera se guarda la información.

Figura 169. Posiciones en Wmemoc



Fuente: los autores.

La Figura 169 muestra el aspecto del software Wmemoc 3.3 con la ventana de posiciones.

Para una información más detallada al respecto, dirigirse al manual de parametrización del mismo.

ANEXO C

CONFIGURACIÓN PROFIBUS DE LAS TARJETAS CONTROLADORAS LOS MOTORES PASO A PASO DE LA SERIE CMMS-ST Y SERVOMOTOR DE LA SERIE SEC-AC DE LA MARCA FESTO DENTRO DEL ENTORNO DE SIEMENS SIMATIC STEP 7

Para una completa y más detallada información de cómo realizar esta configuración, dirigirse al manual del mismo. En este manual se hace una descripción paso a paso de cómo configurar la red Profibus dentro del entorno de Simatic Step 7, software desarrollado por la firma Siemens para la configuración y programación de los PLC de las series S7-300 y S7-400 entre otros dispositivos.

Dicha red Profibus es configurada para la comunicación entre el PLC que gobierna el sistema cartesiano, el cual es de referencia 315F-2PN/DP, y las tarjetas de marca Festo que controlan los motores que accionan los ejes X-Y-Z; estas tarjetas son de referencia CMMS-ST-C8-7 para los ejes X-Y, y SEC-AC-305-PB para el eje Z.

La descripción hecha es basada en un ejemplo de aplicación, por tanto los nombres que allí se mencionan no son necesariamente los que se encuentran en la programación final del sistema.