



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

PROGRAMACIÓN DE CÉLULA DE

TRANSPORTE INDUSTRIAL CON XTS

Alumno: SOFÍA MARTÍN VARELA

Director: RAMIRO DIEZ ZAERA

JUNIO 2023

TÍTULO: PROGRAMACIÓN DE CÉLULA DE TRANSPORTE INDUSTRIAL CON XTS

AUTOR: SOFÍA MARTÍN VARELA

DIRECTOR DEL PROYECTO: RAMIRO DIEZ ZAERA

FECHA: 20 de febrero de 2023

RESUMEN

Durante la última década, el avance de las tecnologías ha motivado la aparición de un proceso de transformación digital de la industria que permite incrementar la competitividad y productividad de las empresas, mejorando considerablemente los resultados de negocio. En consecuencia, es necesario que las empresas se adapten a las diferentes necesidades del mercado, lo cual es posible gracias a una industria inteligente basada en sistemas de producción flexibles de manera que exista una mayor adaptabilidad ante cambios y una mayor vinculación entre el mundo físico y el mundo digital.

El presente Trabajo de Fin de Grado constituye una solución frente a la carencia de flexibilidad en las cadenas de producción a partir de la implementación de un sistema de transporte lineal modular, lo cual permite alcanzar la transformación del proceso productivo en un flujo completamente automatizado. La implementación del sistema de transporte en cuestión incluye el desarrollo del programa de control a partir de un software específico y el diseño de un panel de visualización que permite observar el estado del sistema y de los componentes implicados en tiempo real.

ABSTRACT

During the last decade, the advance of technologies has led to the emergence of a digital transformation process in the industry field which allows companies to increase their competitiveness and productivity, improving considerably business results. Consequently, it is necessary for companies to adapt to the different needs of the market, which is possible thanks to an intelligent industry based on flexible production systems so that there is a greater adaptability to changes and a higher link between the physical and digital world.

This Final Degree Project constitutes a solution over the lack of flexibility in production chains through the implementation of a modular linear transport system, which allows achieving the transformation of the production process into a totally automated flow. The integration of this transport system includes the development of the control program using a specific software and the design of a visualization panel that offers the possibility to determine the state of the system and the components involved in real time.

Índice

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Antecedentes.....	16
1.2 Objeto	17
1.3 Alcance.....	17
1.4 Metodología	18
1.4.1 Herramientas de Gestión y Documentación	18
1.4.2 Herramientas de Desarrollo	19
1.4.3 Herramientas de Diseño y Programación.....	21
1.5 Definiciones, abreviaturas y acrónimos.....	23
Capítulo 2. MEMORIA	26
2.1 Contextualización: Problemática actual.....	26
2.2 Información genérica.....	27
2.2.1 Industria 4.0	27
2.2.2 Pirámide CIM	30
2.2.3 Modelo OSI	34
2.2.4 Topologías de red	39
2.2.5 Protocolos de comunicación	43
2.2.6 Sistemas de monitorización y control	85
2.3 Software TwinCAT 3	91
2.3.1 Introducción.....	91
2.3.2 Secciones.....	92
2.4 eXtended Transport System	95
2.4.1 Módulos de motor (Motor Modules).....	95
2.4.2 Movers.....	97
2.4.3 Carril guía mecánico	99
2.5 Elementos de control y comunicación.....	100
2.6 Fuentes de alimentación	114
2.7 Elementos de protección y seguridad.....	117
2.8 Panel HMI	122
2.9 XTS Software	124

Capítulo 3. MÉTODO OPERATIVO	127
3.1 Estudio del proceso a automatizar	127
3.2 Creación y configuración de proyecto TwinCAT XAE.....	132
3.3 Controlador lógico programable (PLC).....	137
3.3.1 Programación de sección PLC	137
3.4 Motion.....	169
3.4.1 Programación de sección Motion	169
3.5 Interfaz HMI.....	175
3.5.1 Programación de sección TwinCAT HMI	175
3.6 TwinCAT Measurement Project.....	194
3.7 Diseño de soporte y lentes en SolidWorks.....	198
Capítulo 4. NORMATIVA Y MARCO LEGAL	204
4.1 Estudios aplicados al proyecto.....	204
4.2 Obtención de licencias.....	205
4.3 Listado de Normativa y Legislación	211
4.3.1 Marco social y ambiental	212
4.3.2 Marco económico.....	215
4.3.3 Marco técnico.....	216
Capítulo 5. ESTUDIO DEL IMPACTO	218
5.1 Estudio del impacto ambiental.....	218
5.2 Estudio del impacto social.....	220
5.3 Estudio del impacto económico.....	222
Capítulo 6. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA.....	223
6.1 Concepción.....	223
6.1.1 Estudio de mercado	225
6.1.2 Tamaño óptimo	227
6.1.3 Estudio técnico.....	231
6.2 Estudio económico y desarrollo de presupuesto.....	231
6.2.1 Costes de ingeniería	232
6.2.2 Costes de equipos y maquinaria.....	232
6.2.3 Coste de mano de obra	241

6.2.4	Costes de mantenimiento	242
6.2.5	Costes futuros	243
6.3	Inversión inicial	243
6.4	Estimación de los costes	244
6.5	Impuestos y tasas	246
6.6	Amortización.....	248
6.7	Coste total anual	250
6.8	Financiación del proyecto.....	251
6.9	Plan de Contingencias	252
6.10	Previsión de ingresos.....	258
6.11	Cuenta de resultados.....	259
6.12	Análisis económico	260
6.12.1	Valor Actual Neto	261
6.12.2	Tasa Interna de Retorno	261
6.12.3	Período de Recuperación	262
Capítulo 7.	<i>PLANIFICACIÓN TEMPORAL</i>.....	262
7.1	Actividades	262
7.2	Estructura de Descomposición del Proyecto (EDP).....	266
Capítulo 8.	<i>PLIEGO DE CONDICIONES</i>	267
8.1	Definición y alcance.....	267
8.2	Documentos que definen el estudio	267
8.3	Compatibilidad y relación entre documentos	267
8.4	Condiciones generales facultativas	268
8.4.1	Responsabilidades y derechos del Promotor	268
8.4.2	Responsabilidades y derechos del Contratista	269
8.4.3	Responsabilidades y derechos del Proyectista	270
8.4.4	Responsabilidades y derechos del Director	270
8.4.5	Responsabilidades y derechos del Proveedor	271
8.5	Plazos de ejecución y entrega.....	271
8.6	Condiciones de ejecución.....	273

8.6.1	Limitaciones de suministro y montaje	273
8.6.2	Garantías de suministro y funcionamiento	275
8.6.3	Criterios de modificación del proyecto	275
Capítulo 9. Pruebas y Simulación		276
Capítulo 10. Resultados y Conclusiones		279
10.1	Conclusiones	279
10.2	Limitaciones	280
10.3	Líneas Futuras	281
Capítulo 11. Anexos		282
11.1	Fichas técnicas de equipos	282
11.2	Lista de errores NC Motion	283
11.3	Licencias	284
Capítulo 12. Bibliografía		285

Índice de Figuras

Figura 1. Logo Dropbox	18
Figura 2. Logo Beckhoff Automation	19
Figura 3. Logo GitHub	19
Figura 4. Logo Microsoft Word	20
Figura 5. Logo Microsoft Excel	20
Figura 6. Logo Microsoft Power Point	20
Figura 7. Logo smartdraw	21
Figura 8. Logo Adobe Illustrator	21
Figura 9. Icono TwinCAT 3	22
Figura 10. Ícono SolidWorks	22
Figura 11. Formato de trama ADS	26
Figura 12. Pirámide CIM	31
Figura 13. Modelo OSI	35
Figura 14. Trama de capa de enlace de datos Modelo OSI	36
Figura 15. Topología de bus	40
Figura 16. Topología de árbol	41
Figura 17. Topología de estrella	42
Figura 18. Topología de anillo	43
Figura 19. Clasificación de buses de campo	45
Figura 20. Cable Actuator Sensor Interface	46
Figura 21. Ejemplo de red ASI	47
Figura 22. Cable de alimentación ASI	49
Figura 23. Conexión cable ASI	49
Figura 24. Trama de mensaje CAN	50
Figura 25. Principios de comunicación de CANOpen	52
Figura 26. Ejemplo de red DeviceNet	55
Figura 27. Ejemplo de red LONWorks	58
Figura 28. Aplicación de PROFIBUS EN modelo OSI	62
Figura 29. Cable de red Ethernet	66
Figura 30. Ethernet en modelo OSI	67
Figura 31. Aplicación de PROFINET en modelo OSI	70
Figura 32. Trama de PROFINET NRT	71
Figura 33. Trama de PROFINET RT	71

Figura 34. Ejemplo de red FIELDBUS HSE	73
Figura 35. Estructura de red OPC UA	74
Figura 36. Flexibilidad de protocolo OPC UA	75
Figura 37. Formato de trama EtherCAT	79
Figura 38. Topología de EtherCAT	80
Figura 39. Relojes distribuidos EtherCAT	81
Figura 40. Diferenciación entre EtherCAT y EtherCAT P	83
Figura 41. Ejemplo de controlador discreto	86
Figura 42. Ejemplo de PLC	87
Figura 43. Ejemplo de SCADA	89
Figura 44. Ejemplo Sistema de Control Distribuido	90
Figura 45. Programación TwinCAT 3	92
Figura 46. Módulos in-feed	97
Figura 47. Rodillos de los movers ZX9011-0070	98
Figura 48. Movers modelo AT9011-0070-0550	98
Figura 49. Encoder flag	99
Figura 50. Carril guía mecánico	100
Figura 51. Multiplicador CU2508	101
Figura 52. Extender CU8801-0000	103
Figura 53. Terminal EL9576	104
Figura 54. Pines de comunicación y alimentación presentes en los terminales	105
Figura 55. Terminal EL5101	106
Figura 56. Terminal EL1008	107
Figura 57. Terminal EL2008	108
Figura 58. Terminal de cabecera EK1100	109
Figura 59. PC industrial C6930-1106-0050	111
Figura 60. Elementos de PC de control	113
Figura 61. Fuente de alimentación para control y comunicación	115
Figura 62. Fuente de alimentación para XTS	116
Figura 63. Fuente de alimentación para terminales	117
Figura 64. Contactor Siemens Sirius	118
Figura 65. Diferencial Siemens 5SU1354 - 6KK10	119
Figura 66. Automático Siemens 5SY6516 – 7	120
Figura 67. Automático Siemens 5SY4204-7	121
Figura 68. Automático Siemens DC 5SL3016-7	121
Figura 69. Panel HMI modelo CP3916-0000	123

Figura 70. Extensión C9900-G034.....	123
Figura 71. Soporte para HMI C9900-M753.....	124
Figura 72. Entorno de trabajo XTS Configurator	126
Figura 73. Esquema del sistema de transporte	130
Figura 74. Estructura de proyecto TwinCAT XAE.....	132
Figura 75. Inclusión de licencias necesarias.....	133
Figura 76. Gestión de tareas y núcleos de CPU.....	134
Figura 77. Estructura de TcCOM Objects en proyecto TwinCAT XAE	135
Figura 78. Estructura de módulos de XTS	136
Figura 79. Configuración de Tracks de XTS	136
Figura 80. Configuración de estaciones de XTS	137
Figura 81. Estructura básica de proyecto de PLC	138
Figura 82. Inclusión de librerías en proyecto de PLC.....	138
Figura 83. Lista de variables globales de proyecto PLC	139
Figura 84. Mapeo de variables de entrada y salida del proyecto de PLC.....	141
Figura 85. Estructura de programa de control XTS	142
Figura 86. Variables internas definidas en clase padre Sec	143
Figura 87. Métodos y propiedades de clase padre Sec	145
Figura 88. Método Check_Div de clase padre Sec.....	145
Figura 89. Método CheckHomePosition de clase padre Sec	146
Figura 90. Método CheckMover de clase padre Sec.....	146
Figura 91. Método CheckMover2 de clase padre Sec.....	147
Figura 92. Método CheckMover3 de clase padre Sec.....	147
Figura 93. Método GearIn de clase padre Sec	148
Figura 94. Método GearOut de clase padre Sec	148
Figura 95. Método MoveAbs de clase padre Sec	149
Figura 96. Programación secuencia hija Sec1	150
Figura 97. Programación de secuencia hija Sec2	151
Figura 98. Programación de secuencia hija Sec3	153
Figura 99. Programación de secuencia hija Sec4	154
Figura 100. Estructura de XTS_Init en árbol de programa	155
Figura 101. Variables internas y bloques de función de XTS_Init.....	156
Figura 102. Programación de método MoverEnable de XTS_Init.....	157
Figura 103. Programación de método EnableGroup de XTS_Init.....	157
Figura 104. Programación de método AddAxisToGroup de XTS_Init.....	157
Figura 105. Programación de método Home de XTS_Init.....	157

Figura 106. Programación de método Reset de XTS_Init.....	158
Figura 107. Estructura de XTS_InitEnvironment en árbol de programa	158
Figura 108. Declaración de variables para XTS_InitEnvironment.....	159
Figura 109. Programación de XTS_InitEnvironment	159
Figura 110. Estructura de programa principal XTS en árbol de programa	160
Figura 111. Declaración de variables de programa principal XTS	161
Figura 112. Programación de secuencia Start en programa XTS.....	162
Figura 113. Programación de secuencia Stop en programa XTS.....	162
Figura 114. Programación de método Stop	163
Figura 115. Programación de secuencia Halt en programa XTS.....	163
Figura 116. Programación de método Halt	163
Figura 117. Verificación de errores en los ejes NC	164
Figura 118. Programa principal XTS.....	165
Figura 119. Diagrama de flujo completo del XTS	168
Figura 120. PLC/NC PTP Motion	169
Figura 121. Estructura proyecto Motion	170
Figura 122. Tareas proyecto Motion	171
Figura 123. Grupo de Collision Avoidance.....	171
Figura 124. Vinculación variables grupo CA.....	172
Figura 125. Configuración parámetros de eje NC	172
Figura 126. Vinculación de ejes entre proyecto PLC y NC.....	173
Figura 127. Configuración SoftDrive Axis 1	173
Figura 128. Online Axis 1	174
Figura 129. Creación de proyecto TwinCAT HMI	176
Figura 130. Arquitectura cliente - servidor HMI	178
Figura 131. Puertos para TE2000 y TF2000.....	179
Figura 132. Estructura de proyecto HMI	180
Figura 133. Inclusión de paquetes Nuget	181
Figura 134. Sección Imports de proyecto HMI.....	181
Figura 135. Sección Images de proyecto HMI.....	182
Figura 136. Sección Pantallas de proyecto HMI.....	182
Figura 137. Funciones incluidas en pantalla principal	183
Figura 138. Pantalla principal proyecto HMI	184
Figura 139. Símbolo pulsador Start.....	185
Figura 140. Símbolo pulsador Stop.....	185
Figura 141. Símbolo pulsador Restart.....	185

Figura 142. Símbolo pulsador Home.....	186
Figura 143. Eventos para alternancia entre pantallas	187
Figura 144. Inclusión y vinculación con vídeo mp4	187
Figura 145. Pantalla de Movimientos de proyecto HMI	188
Figura 146. Pantalla de Gráficos de proyecto HMI	190
Figura 147. Importación de proyecto Scope sobre HMI	190
Figura 148. Evento para alternancia de visualización de gráficos	191
Figura 149. Pantalla de Alarmas de proyecto HMI	192
Figura 150. Pantalla de Ayuda de proyecto HMI	193
Figura 151. Evento para alternancia de visualización de documentos PDF	194
Figura 152. Creación de proyecto TwinCAT Measurement.....	195
Figura 153. Arquitectura proyecto TwinCAT Measurement.....	195
Figura 154. Habilitación de comunicación con ADS Server	196
Figura 155. Inclusión de parámetros en DataPool.....	196
Figura 156. Apilamiento de las gráficas de cada eje	197
Figura 157. Arquitectura de gráficos para cada eje NC.....	197
Figura 158. Estructura de los gráficos para cada eje	198
Figura 159. Consideraciones para el diseño mecánico de los soportes de los movers	199
Figura 160. PETG 1,75mm transparente para creación de lentes.....	200
Figura 161. Impresora Creality Ender 3 S1.....	200
Figura 162. Motor paso a paso Creality 42 - 34.....	201
Figura 163. Diseño 3D de soportes mecánicos para movers.....	202
Figura 164. Diseño 3D de lentes.....	202
Figura 165. Vistas de soportes.....	203
Figura 166. Vistas de lentes	204
Figura 167. Población en paro en España 2002 – 2022	220
Figura 168. Ocupación de hombres y mujeres en Sector Industrial 2022	221
Figura 169. Diagrama circular de costes de XTS	234
Figura 170. Diagrama circular de costes de terminales	236
Figura 171. Diagrama circular de costes de controlador y elementos adicionales.....	238
Figura 172. Diagrama circular de costes de licencias	239
Figura 173. Diagrama circular de costes de elementos de protección y seguridad	241
Figura 174. Gráfico circular de costes de inversión inicial.....	244
Figura 175. Gráfico circular de costes adicionales	246
Figura 176. Plan de contingencias I	254
Figura 177. Plan de Contingencias II	255

Figura 178. Plan de Contingencias III	256
Figura 179. Plan de Contingencias IV	257
Figura 180. Cronograma y descomposición de actividades	265
Figura 181. Diagrama de Gantt	266

Índice de Tablas

Tabla 1. Trama de datos de MODBUS ASCII.....	59
Tabla 2. Requisitos para instalación de TE2000	178
Tabla 3. Cifra de negocios y población ocupada por Comunidad Autónoma España 2020.....	223
Tabla 4. Criterios de evaluación de la inversión según VAN y TIR	232
Tabla 5. Costes de sistema XTS.....	233
Tabla 6. Costes de terminales.....	235
Tabla 7. Costes de controlador y elementos adicionales	237
Tabla 8. Costes de componentes de panel HMI.....	238
Tabla 9. Costes de licencias.....	239
Tabla 10. Costes de elementos de protección y seguridad.....	240
Tabla 11. Coste de inversión inicial.....	244
Tabla 12. Costes adicionales del proyecto	245
Tabla 13. Coeficiente lineal y periodo de años máximo según Ley 27/2014	249
Tabla 14. Amortización de bienes	250
Tabla 15. Financiación externa para el proyecto	252
Tabla 16. Elementos críticos y posibles fallos	253
Tabla 17. Cuenta de resultados	260
Tabla 18. Análisis económico y flujos de caja	261

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Según la Agencia Internacional para la Prevención de la Ceguera, denotada por las siglas IAPC (International Agency for the Prevention of Blindness), actualmente alrededor de un 28% de la población mundial sufre de problemas de visión como astigmatismo, miopía o hipermetropía, entre otros. De acuerdo con esta información, se estima que esta cifra incrementa hasta alcanzar un 50% en 2050, lo que supone una población de alrededor de 4.800 millones de personas.

El proceso de creación de lentes oftálmicas, con independencia de si éstas se componen de cristal orgánico (plástico) o cristal mineral incluye una serie de etapas como preparación, generación de la superficie óptica, pulido, grabado, limpieza, tintado, tratamiento y control de calidad. Gracias al avance tecnológico, la gran mayoría de los procesos involucrados en la creación de lentes se encuentran automatizados. Sin embargo, para hacer frente a la creciente demanda, es necesario agilizar y optimizar las distintas fases del proceso productivo, lo cual constituye la base de este proyecto.

La implementación del sistema de transporte lineal XTS (eXtended Transport System) desarrollado por la compañía de origen alemán Beckhoff Automation permite incrementar tanto la velocidad del proceso (hasta un máximo de 4 metros por segundo) como la flexibilidad gracias a la posibilidad de programación de perfiles de movimiento individuales.

Este sistema permite agilizar el proceso productivo, posibilitando su implantación en cualquiera de las fases del mismo y logrando satisfacer las necesidades crecientes de la población.

1.2 Objeto

El objetivo principal del proyecto reside en la programación de una célula de transporte que permita incrementar la productividad y eficiencia de un proceso de producción de lentes oftálmicas, lo cual se realiza a partir de la integración de un sistema XTS.

El sistema desarrollado ofrece la posibilidad de ser implementado en cualquiera de las fases que constituyen proceso productivo de las lentes oftálmicas. Sin embargo, se ha considerado su integración en las fases de generación de la superficie de la lente y pulido de éstas, también conocida bajo el término “retallado”.

Los objetivos secundarios que persigue la realización del trabajo de fin de grado propuesto son, en primer lugar, ser capaz de integrar y aplicar transversalmente los conceptos estudiados a lo largo del grado de Ingeniería en Sistemas Industriales. En segundo lugar, programar el funcionamiento del sistema, lo cual es posible a partir del software TwinCAT, el cual ofrece múltiples herramientas. Además, el desarrollo de una interfaz que permita a los operarios obtener información sobre el estado del sistema en tiempo real, así como la implementación de funciones de seguridad permite alcanzar un mayor grado de control, prevenir posibles errores y reducir los costes de mantenimiento.

1.3 Alcance

La implementación de un sistema de transporte lineal como el XTS desarrollado por Beckhoff Automation proporciona una óptima solución frente a los problemas actuales en instalaciones con cintas mecánicas convencionales, otorgando una mayor flexibilidad y completa adaptabilidad al proceso productivo.

Se debe tener en consideración que la integración de una tecnología tan innovadora en la industria cuenta con una serie de limitaciones en cuanto al coste y las capacidades intelectuales de los trabajadores implicados en el proceso, siendo

necesaria la formación de personal para llevar a cabo un potencial uso de dicho sistema de transporte, lo cual será detallado posteriormente.

El desarrollo del sistema propuesto requiere conocimientos en cuanto a programación orientada a objetos (OOP – Object Oriented Programming), lenguajes de programación como C++, protocolos de comunicación como EtherCAT, así como el manejo del software de desarrollo TwinCAT 3. Con respecto a este último, se han integrado las secciones relativas a la programación del controlador lógico programable (PLC), la sección de Motion y la sección HMI para el desarrollo de una interfaz entre el hombre y la máquina que permita a éste la interacción con el proceso y la obtención de datos en tiempo real.

1.4 Metodología

Las herramientas implicadas en el desarrollo del proyecto se han clasificado en tres secciones: la primera relativa a la gestión y documentación de este, la segunda relativa al desarrollo y finalmente, una sección relativa a la programación del sistema y a la realización de pruebas.

1.4.1 Herramientas de Gestión y Documentación

- Dropbox

Dropbox es una herramienta de almacenamiento multiplataforma en la nube. Ha sido empleada para almacenar y mantener un registro de toda la información recopilada para la realización de proyecto.



Figura 1. Logo Dropbox

Fuente: Dropbox

- Beckhoff Automation

El servidor web de la compañía Beckhoff Automation ha permitido una obtención fiable de información técnica acerca del XTS, el PC industrial C6930 y los terminales de entradas y salidas etc.



Figura 2. Logo Beckhoff Automation

Fuente: Beckhoff Automation

- GitHub

Se trata de una plataforma de almacenamiento de proyectos basada en el sistema de control de versiones Git, lo que ha permitido una correcta sincronización de versiones entre todas las herramientas de desarrollo de software implicadas.



Figura 3. Logo GitHub

Fuente: GitHub

1.4.2 Herramientas de Desarrollo

- Microsoft Word

Microsoft Word es un software de procesamiento y tratamiento de programas de texto. Su facilidad de uso y apariencia ha motivado que sea seleccionada como la herramienta principal para el desarrollo del proyecto y la realización de diagramas de Gant y EDP (Estructura de Descomposición del Proyecto).



Figura 4. Logo Microsoft Word

Fuente: Microsoft

- Microsoft Excel

Microsoft Excel es una herramienta muy eficaz basada en una hoja de cálculo que permite gestionar información a partir de grandes cantidades de datos. Ha sido empleada para la generación de gráficos.



Figura 5. Logo Microsoft Excel

Fuente: Microsoft

- Microsoft Power Point

Microsoft Power Point es un software que permite el diseño y creación de presentaciones a partir de la combinación de elementos de texto, imágenes y vídeos. Ha sido empleado para desarrollar el documento de presentación oral de este proyecto.



Figura 6. Logo Microsoft Power Point

Fuente: Microsoft

- Smartdraw

Se trata de una herramienta de creación de diagramas de flujo, diagramas de ejecución de proyectos, imágenes comerciales, organigramas y mapas mentales. Ha sido empleado para el desarrollo de los planes de contingencia del proyecto.



Figura 7. Logo smartdraw

Fuente: smartdraw

- Adobe Illustrator

Se trata de una plataforma de edición gráfica empleada para el diseño y creación de tanto figuras como esquemas incluidos en el proyecto, de manera que, éstos sean en su mayoría elaboración propia.



Figura 8. Logo Adobe Illustrator

Fuente: Adobe Illustrator

1.4.3 Herramientas de Diseño y Programación

- TWINCAT 3

TwinCAT, cuyo nombre hace referencia a “The Windows Control and Automation Technology” es un software de control industrial que permite transformar cualquier sistema basado en un PC en un sistema de control en tiempo real. Provee una amplia flexibilidad en la programación, posibilitando la realización de modificaciones en cualquier momento.



Figura 9. Icono TwinCAT 3

Fuente: Beckhoff Automation

- XTS Software

Software destinado a la planificación y visualización de un proyecto basado en el sistema XTS. Se compone de diversas herramientas: el XTS Simulator y XTS Configuration Builder se encuentran enfocadas en la parametrización del sistema desarrollado mientras que el XTS Viewer o XTS Live View permiten visualizar el sistema en su totalidad y comprender la ejecución de las diversas secuencias del programa.

- SolidWorks

Se trata de un software de diseño mecánico basado en el diseño asistido por computadora (también conocido por las siglas CAD) que, a partir de un entorno de desarrollo basado en Microsoft Windows, permite la creación de modelos en tres dimensiones, así como ensamblajes y generación de planos.



Figura 10. Ícono SolidWorks

Fuente: SolidWorks

1.5 Definiciones, abreviaturas y acrónimos

- XTS (eXtended Transport System)
Sistema de transporte lineal de configuración modular desarrollado por Beckhoff Automation. Su funcionamiento a partir del principio de inducción magnética; lo que facilita el movimiento de los movers y su configuración modular permiten que éste se adapte a los diferentes requerimientos del cliente y de la instalación.

- PLC (Controlador Lógico Programable)
Sistema de control y monitorización de procesos industriales, ampliamente empleado en el ámbito de la automatización. Se basa en la supervisión continua del estado de los dispositivos de entrada, la toma de decisiones a partir de la lógica de control y la posterior actualización del estado de los dispositivos de salida.

- UPS (Uninterrupted Power Supply)
Sistema que permite mantener la alimentación eléctrica durante un tiempo limitado a partir del empleo de baterías u otros elementos almacenadores de carga como condensadores, de manera que, en caso de caídas de tensión, permitan realizar un correcto almacenamiento y apagado de los equipos conectados.

- LAN (Local Area Network)
Red de área local, esto es, un conjunto de dispositivos informáticos que comparten una conexión centralizada a internet siempre y cuando se encuentren en un área localizada.

- DVI (Digital Visual Interface)
Conector de video diseñado por Digital Display Working Group en 1999 con el objetivo de proporcionar una mejora en cuanto a calidad de visualización y transporte de señales digitales y analógicas.

- USB (Universal Serial Bus)

Bus de comunicaciones empleado para conectar y establecer la comunicación entre dispositivos electrónicos, computadoras y dispositivos periféricos en una red.

También hace referencia a un dispositivo de almacenamiento de información de tamaño reducido y bajo coste.

- Hardware

Conjunto de componentes físicos que integran el equipo.

- Software

Conjunto de programas, aplicaciones y reglas informáticas que posibilitan el funcionamiento del equipo.

- ISA (Instruction Set Architecture)

En español, arquitectura del conjunto de instrucciones, es la parte relativa al computador que actúa como interfaz entre el hardware y el software, especifica las capacidades del procesador y define la manera en que el software lleva a cabo el control de la unidad central de procesamiento o CPU.

- CPU (Central Processing Unit)

En español, unidad central de procesamiento, es el encargado de interpretar las instrucciones del programa informático a partir de operaciones lógicas, aritméticas o externas (procedentes de I/O). Se compone de tres elementos básicos:

- CU (Control Unit): unidad de control encargada de transmitir la información entre los diversos registros de la CPU y direccionar las instrucciones con la unidad aritmético-lógica.
- ALU (Arithmetic Logic Unit): unidad aritmético-lógica encargada de realizar las operaciones aritméticas y/o lógicas.

- Registros internos.

- RISC (Reduced Instruction Set Computer)

Tipología de arquitectura ISA diseñada en la década de 1980 con el objetivo de simplificar el diseño de los procesadores disponibles hasta el momento, optimizar en mayor medida el compilador y facilitar los modos de direccionamiento.

Se caracteriza por poseer instrucciones de simple formato y rápida decodificación, lo que disminuye el tiempo de ciclo y proporciona una mayor optimización del código de control.

- ARM (Advanced RISC Machine)

Procesador basado en una arquitectura RISC que especifica las reglas de funcionamiento del hardware para la ejecución de las diferentes instrucciones pertenecientes al software del equipo.

- ADS (Automation Device Specification)

Capa de transporte de datos dentro de TwinCAT desarrollada para llevar a cabo el intercambio de información entre diversos módulos de software como, por ejemplo, el establecimiento de la comunicación entre el PLC y NC.

Básicamente, constituye un método de acceso a la información del bus directamente desde el PC. El formato de las tramas que posibilitan la comunicación es el siguiente:

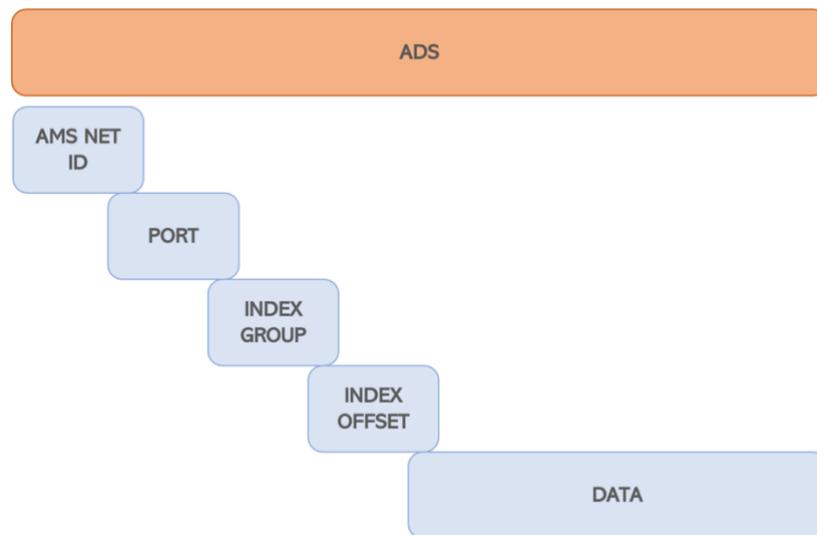


Figura 11.Formato de trama ADS

Fuente: Elaboración Propia

- AMSNetID: identificador del dispositivo que va a ser direccionado. Es tomado a partir de la dirección MAC del puerto Ethernet.
- Port Number: ofrece distinción entre los diversos sub-elementos conectados al equipo.
- Index Group: empleado para diferenciar los datos relativos a un mismo puerto.
- Index Offset: empleado para referenciar el inicio de lectura o escritura del byte.
- Data: datos transmitidos.

Capítulo 2. MEMORIA

2.1 Contextualización: Problemática actual

Como consecuencia de la necesidad creciente de optimización de tanto los procesos productivos como los recursos implicados en los mismos, las instalaciones con cintas transportadoras convencionales o elevadores resultan ser poco

competitivas en términos de rendimiento, adaptación a los clientes y adaptación al mercado.

El avance de las tecnologías y la llegada del denominado machine learning han provocado la aparición de sistemas de transporte que dotan de una mayor competitividad a las industrias, como el sistema de transporte lineal XTS. Una de sus principales ventajas es un incremento de la flexibilidad de la planta gracias a su configuración modular, lo que permite adaptar la máquina a las especificaciones del proceso productivo. Además, se ha verificado un incremento considerable en la productividad de los procesos, reduciendo los tiempos de espera y llegando prácticamente a eliminar los tiempos de inactividad. Otra de sus principales ventajas es la capacidad de adaptación a las diferentes fases implicadas en el proceso productivo, posibilitando la programación de perfiles de movimiento individual con parámetros de velocidad, aceleración y jerk distintos.

En comparación con los sistemas de transporte actuales, cuyo mantenimiento supone significativos costes de trabajo y recursos, la implantación de un sistema XTS conlleva un mantenimiento mínimo como consecuencia de su diseño robusto e innovador, lo que reduce la fricción y el posterior desgaste de los materiales.

2.2 Información genérica

2.2.1 Industria 4.0

La cuarta revolución industrial, también conocida como Industria 4.0 hace referencia al proceso de transformación digital de la industria nacido en Alemania a principios del año 2011.

Este concepto incluye la organización de los procesos que integran la cadena de valor de manera que exista una comunicación autónoma entre todos los equipos conectados. Su objetivo reside en la creación de una industria inteligente que permita, a partir de la obtención y el análisis de datos en tiempo real, dotar una mayor

adaptabilidad ante los cambios y una vinculación estrecha entre el mundo físico y el mundo digital.

Las tecnologías sobre las que se basa la industria 4.0 persiguen, en su aplicación conjunta, la conversión de la cadena de valor en un flujo completamente automatizado y optimizado de manera que permita incrementar la eficiencia, productividad y alcanzar una relación más estrecha entre los componentes y miembros implicados. Estas tecnologías son:

1. Integración vertical y horizontal: para alcanzar un flujo continuo en la cadena de valor es necesaria una íntegra comunicación entre todos los niveles, tanto verticalmente entre fabricantes, proveedores y clientes como horizontalmente en los distintos departamentos de la compañía.
2. Internet de las cosas (IOT): referente a la red colectiva de todos los objetos físicos conectados y la tecnología que permite la comunicación entre estos y los controladores centrales.
3. Big Data and Analytics: el análisis de datos conlleva una etapa de procesamiento debido al volumen y naturaleza de los mismos. Relacionado con la industria 4.0, el análisis de datos se convierte en un estándar para la toma de decisiones en tiempo real.
4. Simulación: las simulaciones permiten a los programadores observar el comportamiento de una máquina, dispositivo o equipo previamente a su puesta en marcha, lo que facilita la detección de errores y optimiza el proceso.
5. Robots autónomos: la integración de robots en industria ha crecido exponencialmente a lo largo de los últimos años con el objetivo de flexibilizar el proceso productivo. En consecuencia, se ha producido una sustitución

progresiva de la mano de obra humana, resultando especialmente positivo en aplicaciones peligrosas o repetitivas.

6. **Ciberseguridad:** el elevado grado de conectividad de la industria 4.0 conlleva un mayor riesgo de amenaza informática, por lo que es necesario implementar una serie de medidas con el objetivo de proteger los datos y la propiedad intelectual.
7. **Fabricación aditiva:** se trata de un concepto de producción industrial que permite producir en tres dimensiones según el prototipo recibido, lo que reduce el uso de materias primas y el stock. Este aspecto resulta de elevada importancia hoy en día debido a la crisis de materiales actual, por lo que es conveniente alcanzar el máximo aprovechamiento de los mismos.
8. **Computación en la nube:** la integración de trabajos informáticos en la nube permite mejorar la productividad de los procesos, dotando de un rápido almacenamiento y acceso a la información.
9. **Realidad aumentada:** tecnología cuyas aplicaciones van más allá de la industria. En el ámbito profesional o académico, puede ser empleado para proporcionar formación.

La transformación digital de la industria genera beneficios en distintos ámbitos:

- Generación de nuevos puestos de trabajo y sustitución de otros en diversos sectores. Esto se conoce también como efecto de sustitución (por robots, por ejemplo) y efecto de complementariedad y se basa en que la innovación conlleva una fase de formación y aprendizaje para hacer frente a las necesidades del mercado.
- Incremento en la calidad de los productos y servicios debido a la innovación en cuanto a materiales y procesos productivos.
- Creación de nuevos productos que incrementen la calidad de vida de las personas, de manera que el impacto medioambiental resulte inferior.

- Dotar a los procesos productivos de una mayor flexibilidad y eficiencia a partir de un empleo optimizado de las materias primas y los recursos energéticos.
- Supone una reducción en los plazos y una mayor posibilidad de personalización de los productos y servicios por parte de los clientes.

Como cualquier otra revolución, la implantación de un sistema basado en las nuevas tecnologías conlleva ciertos riesgos, especialmente en el ámbito de la seguridad como consecuencia de la elevada cantidad de datos en redes de comunicación. Es por ello por lo que se debe llevar a cabo la implantación de sistemas de seguridad (principalmente basados en encriptación) que permitan reducir la vulnerabilidad de los datos y protejan tanto la privacidad como la propiedad intelectual.

Como conclusión, la industria 4.0 persigue el desarrollo de un ecosistema innovador en el que las compañías evolucionen hacia modelos de negocio basados en el control constante y autónomo, dotando a los sistemas de una mayor seguridad, productividad, eficiencia y sostenibilidad. Para ello, es necesario llevar a cabo una inversión en formación de manera que se creen perfiles adecuados para las diferentes oportunidades de empleo generadas.

2.2.2 Pirámide CIM

Debido a la complejidad y exigencias de los procesos productivos, estos se pueden estructurar en diferentes modelos jerárquicos con el objetivo de incrementar su eficiencia. Uno de éstos es el conocido por las siglas CIM (Computer Integrated Manufacturing), el cual hace referencia a un modelo de automatización jerárquico de las redes que integran el proceso productivo con el objetivo de incrementar su flexibilidad, eficiencia, calidad de los productos y reducir tanto los costes como el tiempo empleado en el proceso.

Básicamente consiste en una arquitectura que divide en niveles todas las tareas que comprenden el proceso productivo en su totalidad, desde el diseño hasta el control de calidad y comercialización. El entorno CIM cuenta con cinco niveles, segmentados

según criterios como tipo y volumen de datos, velocidad de transmisión y funciones de cada uno de los mismos dentro del proceso automatizado. Su estructura, definida por el Natural Bureau of Standards (NBS), se muestra a continuación:

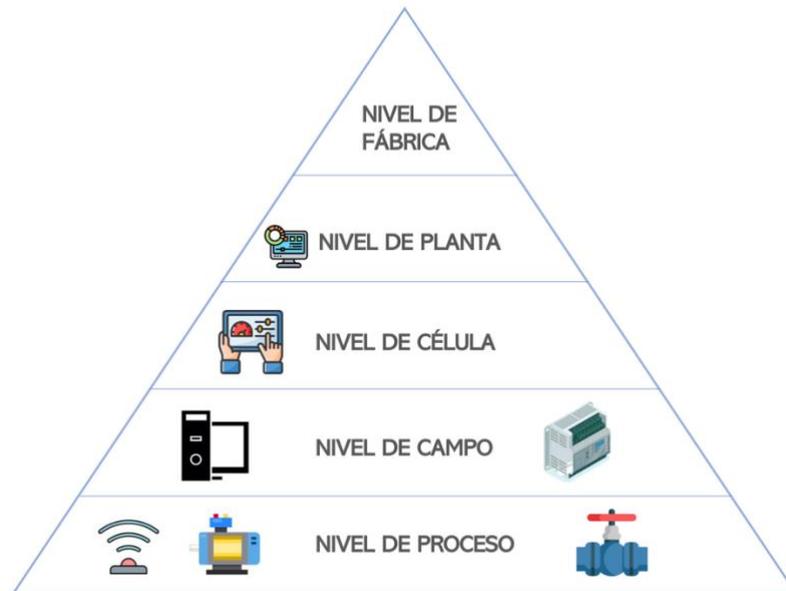


Figura 12. Pirámide CIM

Fuente: Elaboración Propia

Una de las principales utilidades de este modelo es la capacidad de comunicación horizontal y vertical entre niveles, de manera que existe un flujo de comunicación dentro del mismo y con los niveles superior e inferior (en caso de que existan).

El nivel más bajo, también conocido como “**Nivel de Proceso**”, corresponde con los dispositivos de campo como sensores y actuadores (hardware). Los sensores son aquellos dispositivos encargados de obtener información sobre el proceso en análisis y cuyo valor será interpretado, mientras que los actuadores son los encargados de llevar a cabo acciones sobre el sistema según las órdenes de control.

En este nivel, la comunicación se lleva a cabo a partir de buses de campo debido a que se gestiona menor cantidad de información y que el protocolo TCP/IP empleado por Ethernet genera retrasos que dificultan la monitorización del proceso en tiempo real.

El siguiente nivel corresponde con el “**Nivel de Campo**”, el cual contiene los elementos de mando y control del sistema, los cuales serán los encargados de regular el comportamiento de los dispositivos del nivel de instrumentación y transmitir la información recogida por éstos al nivel superior. En este nivel se incluyen equipos como pequeños autómatas programables, controladores PID (acción proporcional, integral y derivativa) etc.

El método de comunicación empleado puede ser una red industrial MODBUS, PROFIBUS, CAN etc. Sin embargo, se ha extendido el empleo de redes industriales como Industrial Ethernet, PROFINET o ETHERCAT, sobre el cual se centrará este proyecto.

El nivel intermedio, conocido como “**Nivel de Célula**” se compone de equipos como controladores lógicos programables (PLC), PCs industriales (IPC), Sistemas de Control Distribuido (DCS), Unidades Terminales Remotas (RTU) etc.

Este nivel es el encargado de controlar y gestionar los recursos a partir de las órdenes de los niveles superiores. Dicho control puede realizarse directamente con los sensores y actuadores a través de PCs embebidos o PLCs o bien, enviando las órdenes a los equipos del Nivel de Campo de manera que éstos se pongan en contacto con los dispositivos de campo correspondientes.

Es importante considerar que, en los niveles nombrados previamente, los dispositivos y equipos se encuentran ubicados en un entorno industrial, por lo que deberán contar con medidas adicionales de seguridad como aislamiento frente al ruido electromagnético y vibraciones o aquellas establecidas en la certificación IP correspondiente. De igual manera ocurre con las redes de comunicación, cuyo grado de protección debe ser superior para evitar problemas como sobrecalentamiento o sobrecarga.

El siguiente nivel es el conocido como “**Nivel de Planta**”, el cual es responsable de la toma de decisiones en tiempo real a partir de la información obtenida por niveles inferiores. Supervisa todo el proceso productivo, desde las materias primas hasta el producto ya finalizado, por lo que requiere un protocolo de comunicación que soporte grandes cantidades de datos. En consecuencia, se emplean redes de comunicación basadas en Ethernet como en el nivel de Control de Fábrica.

En este nivel se incluyen sistemas de supervisión y control como SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) e interfaces HMI (Human – Machine Interface). Un sistema SCADA es una herramienta de automatización y control industrial que permite supervisar, controlar, recopilar datos y generar informes en tiempo real sobre el estado de una aplicación concreta con el objetivo de evitar posibles errores e incrementar su eficiencia.

Finalmente, el nivel superior corresponde con el “**Nivel de Control de Fábrica**”, cuya misión es gestionar otro tipo de recursos que no influyen directamente sobre el producto final, sino sobre aspectos como monitorización de los ingresos, análisis de datos en tiempo real o establecimiento de políticas de producción. Debido a la gran cantidad de datos, se emplean redes de comunicación basadas en Ethernet, las cuales son capaces de soportar semejante volumen de información.

Un factor importante a considerar es que a medida que asciende el nivel en el modelo CIM, incrementa el volumen de datos y en consecuencia, disminuye la velocidad de transmisión de los mismos, lo cual influirá en las redes de comunicación necesarias para lograr una conexión entre todos los niveles y un control sobre el proceso automatizado. La integración de todos los procesos dentro de un mismo sistema jerarquizado permitirá convertir las grandes decisiones en cuanto a política empresarial en operaciones de control más simples.

Debido a los avances tecnológicos, existe una tendencia creciente en el uso de sistemas basados en Ethernet en todos los niveles del modelo CIM. Esto se debe, en parte, a que los sensores inteligentes relativos a la Industria 4.0 son capaces de

transmitir más información. A continuación, se exponen los métodos de comunicación entre los diferentes niveles del modelo CIM:

La comunicación entre el Nivel de Campo (sensores y actuadores) y el Nivel de Proceso (PLCs) se lleva a cabo a partir de un bus de campo, el cual permite a través de un solo cable obtener y enviar información a los diferentes dispositivos en tiempo real. La principal ventaja de un bus de campo es su carácter bidireccional y multipunto, de manera que se reduce considerablemente el cableado, lo que conlleva un incremento en la seguridad debido a una menor probabilidad de cortocircuitos.

La comunicación entre el resto de los niveles se lleva a cabo a partir de redes industriales, generalmente basadas en Ethernet, de manera que exista comunicación bidireccional entre todos los niveles que componen el proceso productivo.

2.2.3 Modelo OSI

El modelo OSI (Open Systems Interconnection – Sistemas de interconexión abierta) es un estándar creado en 1977 por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) que permite establecer la comunicación entre sistemas abiertos de diferentes fabricantes.

Es concebido como un lenguaje universal y un marco de referencia en cuanto a arquitecturas de interconexión de sistemas de comunicaciones. Se caracteriza por presentar una estructura jerárquica en la que el proceso completo de comunicación queda segmentado en capas con el objetivo de que cada una de ellas lleve a cabo unas funciones específicas, lo que facilita la detección de errores de comunicación.

Se estructura en siete capas de la siguiente manera:



Figura 13. Modelo OSI

Fuente: Elaboración Propia

Capa Física

Constituye la capa inferior del modelo OSI y es la encargada de definir las propiedades a nivel mecánico, eléctrico y funcional de las conexiones físicas. Básicamente, proporciona un medio para que se produzca la transmisión y recepción de información codificada (secuencia de 0 y 1 lógicos).

Algunas de sus funciones son:

- Definición del medio físico a través del cual se produce la transmisión de información (tipo de cable).
- Definición de propiedades mecánicas (tipo de conectores) y propiedades eléctricas del medio físico (nivel máximo de corriente, tensión etc).
- Definición de la manera en que se establece, mantiene e interrumpe la conexión.

Capa enlace de datos

Capa que permite la comunicación entre los procesos software de las capas superiores del modelo OSI y la capa física inferior a la misma. Se encarga de realizar el control de acceso al medio a través de protocolos como MAC (Media Access Control), además de la detección y notificación de errores y la transmisión de tramas, que poseen la siguiente estructura:



Figura 14. Trama de capa de enlace de datos Modelo OSI

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que la trama se compone de tres secciones principales: un encabezado, un paquete de datos y un tráiler, los cuales son explicados a continuación.

El objetivo del encabezado es proporcionar información sobre el inicio de la trama, así como el direccionamiento y el control de flujo. El paquete de datos contiene la información en sí y finalmente, el tráiler contiene información sobre posibles errores detectados y un patrón de bits para denotar el fin de la trama.

Capa de red

Capa encargada del direccionamiento y enrutamiento entre redes con el objetivo de garantizar la transferencia de información hacia su destino final empleando los dispositivos intermedios como métodos de enrutamiento. En esta capa, los grupos de datos se denominan paquetes y se clasifican según su encapsulado (encabezado que contiene la dirección de origen y dirección destino).

Una dirección IP es la identificación lógica de un dispositivo dentro de una red que emplee el protocolo de internet (Internet Protocol -IP). La dirección IP puede ser

estática o dinámica, en cuyo caso se asignará a través de un protocolo conocido como DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol).

Actualmente, existen dos tipos de protocolos de internet IP, diferenciados por el número de bits que componen la dirección. El protocolo IPv4 soporta hasta 32 bits mientras que el protocolo IPv6 es capaz de soportar direcciones hasta 128 bits.

Es importante diferenciar entre la dirección MAC, la cual corresponde a un número fijo asignado al dispositivo de red por el fabricante y la dirección IP, la cual se refiere a la dirección lógica en la red.

Capa de transporte

La capa de transporte es la encargada del envío de unidades de información (en este caso, denominadas segmentos o datagramas) desde el dispositivo de origen hasta el dispositivo de destino, así como otras funciones de control de errores, control de flujo, garantizar la confiabilidad entre hosts etc.

Los protocolos empleados en esta capa pueden ser TCP o UDP, cuyas principales diferencias son expuestas a continuación.

El Protocolo de Control de Transmisión (TCP – Transmission Control Protocol) es un estándar orientado a la transmisión de datos con conexión entre hosts de origen y destino. Se caracteriza por proporcionar una gran confiabilidad, siendo capaz de asegurar el envío correcto de los datagramas y en caso contrario, retransmitir los datos que hayan sido perdidos o dañados durante el envío. Otra de sus principales ventajas es la capacidad de control de flujo, de manera que, si el transmisor está desbordando el buffer del receptor por transmitir a una velocidad superior a la recomendable, el receptor es capaz de disminuir la tasa de transferencia de datos descartando paquetes. Además, es capaz de manejar simultáneamente dos secuencias de datos, por lo que actúa simultáneamente como transmisor y receptor.

TCP proporciona soporte a protocolos de aplicación como HTTP, FTP o SMTP, entre otros.

La comunicación para el protocolo TCP se compone de tres etapas básicas:

1. Establecimiento de conexión
2. Transferencia de datos
3. Fin de la conexión

El Protocolo de Datagramas de Usuario (UDP – User Datagram Protocol) permite realizar la transmisión de datos a través de la red sin necesidad de establecer conexión entre hosts. Se caracteriza por poseer una mayor velocidad de transmisión que el protocolo TCP, lo cual se debe a su menor confiabilidad ya que no es capaz de garantizar la entrega correcta y total de los datagramas transmitidos. Además, en caso de que un datagrama haya sido entregado incompleto, no es posible solicitar la retransmisión del paquete de nuevo, lo que conlleva un mayor riesgo de pérdida de información.

Capa de sesión

La capa de sesión es la encargada de mantener y controlar la conexión entre los dispositivos de la red, de manera que, en caso de errores en la comunicación, la conexión pueda reestablecerse sin problemas y sin pérdidas de información.

Capa de presentación

A diferencia del resto de capas, las cuales tratan sobre el modelo de conexión y el establecimiento de la comunicación, la capa de presentación se enfoca en la información que está siendo entregada. Su función reside en representar la información de manera que ésta pueda ser interpretada por otros equipos. Además, permite realizar acciones de compresión y codificación de la información, lo que puede resultar conveniente en aplicaciones que manejen elevadas cantidades de datos.

Capa de aplicación

La capa de aplicación permite tanto a usuarios como a procesos acceder a los servicios del resto de capas, de manera que facilita el redireccionamiento de dispositivos, la compartición de información y de recursos, entre otros aspectos. Algunos ejemplos son:

- HTTP o Protocolo de Transferencia de Hipertexto, el cual permite realizar la petición y transferencia de datos de archivos en el World Wide Web.
- SMTP o Protocolo Simple de Transferencia de Correo, el cual permite transferir mensajes y archivos de correo electrónico.

2.2.4 Topologías de red

La topología de red hace referencia a la disposición física de los distintos equipos que integran la red, pudiendo presentarse de múltiples maneras según la aplicación desarrollada.

Previamente a la explicación de las topologías de red existentes, se deben tener claros los componentes de una red y su finalidad dentro de la misma:

- Tarjetas de interfaz de red: tarjeta de circuito impreso que permite a los dispositivos conectarse e intercambiar información con la red siempre y cuando ésta se encuentre instalada en los dispositivos.
- Servidor: cuya función es almacenar archivos, recursos, programas y el sistema operativo de red, de manera que proporcionen acceso a todos los usuarios conectados.
- Clientes: dispositivos que se conectan a la red y tienen acceso a los recursos que ofrece el servidor.
- Medio de comunicación: tipo de enlace que permite la transmisión de información. Puede ser a través de un medio guiado (cable) o no guiado (inalámbrico).
- Terminales: establecen la conexión entre los computadores y la red, pudiendo diferenciarse entre enrutadores, interruptores etc.

Existen diversas topologías de cableado de los dispositivos según la aplicación:

1. Conexión en bus

Topología lineal en la que todos los usuarios de la red se conectan a través de un bus, el cual constituye el único canal de comunicaciones. Su principal ventaja es la presencia de un solo canal de comunicación, lo que implica una significativa simplificación de la arquitectura y una reducción tanto en los costes de instalación como los costes de mantenimiento.

Su principal desventaja es que un fallo en alguna de las conexiones con los usuarios de red se propaga en toda la línea de comunicación, deteniéndola y provocando una disminución en la eficiencia del sistema.



Figura 15. Topología de bus

Fuente: Elaboración Propia

2. Conexión en árbol

La topología de árbol puede contemplarse como una combinación de conexiones en estrella, a excepción de que ésta posee un nodo principal (generalmente un switch o hub) del cual se ramifican el resto de los nodos, constituyéndose una jerarquía.



Figura 16. Topología de árbol

Fuente: Elaboración Propia

Su principal ventaja con respecto a otras topologías es que debido al cableado punto a punto para cada segmento individual, si alguno de dichos segmentos falla, no afectará al resto de dispositivos, a excepción de que el segmento que falle sea el principal o tenga segmentos por debajo del mismo.

Sus principales desventajas son, como se ha comentado previamente, en caso de que el fallo se produzca en el segmento principal, éste se propagará a lo largo de los segmentos que se encuentren conectados al mismo. En segundo lugar, su configuración modular encarece considerablemente el coste de la instalación.

3. Conexión en estrella

La conexión en estrella presenta una unidad central activa sobre la que se encuentran conectados los diferentes usuarios mediante un modelo de conexión Punto a Punto (Point to Point – PTP).

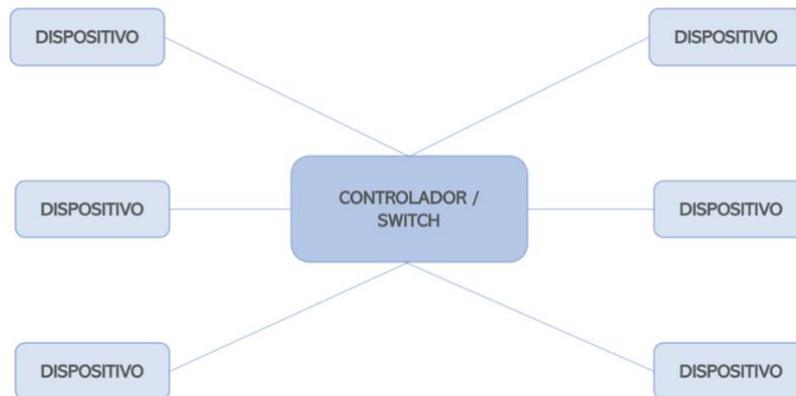


Figura 17. Topología de estrella

Fuente: Elaboración Propia

Sus principales ventajas son la centralización de la red en una sola unidad, la facilidad de agregar nuevos dispositivos y la independencia entre dispositivos, de manera que un fallo en alguno de ellos no interfiere en la comunicación del resto de dispositivos con la unidad central. Sin embargo, si la unidad central falla, toda la red caerá.

Su principal desventaja es un incremento del coste con respecto a otras topologías (anillo, bus) debido a la presencia de mayor cableado como consecuencia de la conexión punto a punto.

4. Conexión en anillo

Topología compuesta por dispositivos en forma de anillo, donde la comunicación se establece a partir del principio del paso de testigo. De esta manera, cuando un dispositivo ha finalizado su tarea, transmite la información al siguiente y así sucesivamente. Esto permite reducir las posibles pérdidas de datos por colisiones, pero ralentiza el sistema.

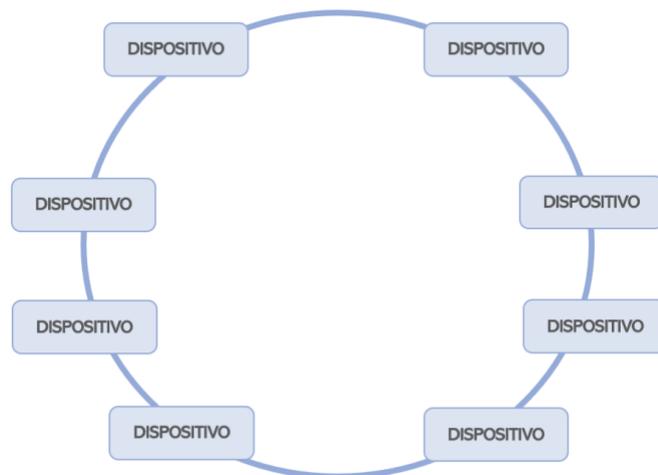


Figura 18. Topología de anillo

Fuente: Elaboración Propia

La principal ventaja de este modelo de conexión es la robustez y simplicidad de la arquitectura, lo que permite reducir los costes de instalación y mantenimiento debido a la presencia de menor cableado.

Una de las principales desventajas es que, en caso de fallo de comunicación en algún punto de la red, ésta se convierte en una topología en serie en la que se pierde la comunicación entre los dos dispositivos más cercanos al fallo. Sin embargo, este problema se puede solucionar con un anillo doble, de manera que en caso de fallo (por ejemplo, rotura de cable) se mantenga la integridad de la comunicación.

2.2.5 Protocolos de comunicación

2.2.5.1 Buses y redes de campo

2.2.5.1.1 Introducción

Las redes de campo son una tecnología de comunicación diseñada para aplicaciones de control industrial, especialmente en los niveles de proceso, campo y célula de la

pirámide CIM. Surgieron a mediados de la década de 1980 y desde 1990 su presencia en aplicaciones de automatización industrial ha incrementado exponencialmente. Para comprender en profundidad el funcionamiento de las redes de campo se deben tener en cuenta sus características principales:

1. La sustitución de señales con corriente entre 4 y 20 mA por señales digitales ha permitido en primer lugar, una reducción significativa del cableado y, en consecuencia, el coste y tiempo de la instalación. Esto se logra a partir del acceso a los dispositivos en paralelo mediante un solo cable y la presencia de un pequeño número de nodos/terminales.
Además, como consecuencia de la comunicación digital, se obtiene una mayor confiabilidad de los datos, permitiendo detectar si los datos enviados son fiables y se encuentran exentos de ruido y distorsiones. Otra de las principales ventajas es el acceso simultáneo a diferentes variables (conocido como acceso multivariable) lo que permite monitorizar todas las variables implicadas en el proceso en tiempo real.
2. Ofrece aplicaciones de control para Sistemas de Control Distribuido (DCS – Distributed Control System), facilitando el cableado y permitiendo la comunicación entre todos los dispositivos implicados de manera fiable, rápida y segura.
3. La mayoría de los buses de campo se basan en estándares abiertos, lo que proporciona interoperabilidad. Esto permite la conexión de dispositivos de diferentes fabricantes, incrementando significativamente la flexibilidad del sistema.
4. Comunicación bidireccional entre los dispositivos y el equipo de control.

A diferencia de la comunicación en los niveles superiores de Control de Fábrica y Planta del modelo CIM, la cual se realiza a partir de estándares basados en Ethernet,

para los niveles de campo y célula no se ha logrado imponer un bus de campo estándar, lo que dificulta la interoperabilidad comentada previamente. Debido a que no existe un único criterio de clasificación de los buses de campo actuales, éstos se han clasificado según su funcionalidad (en orden creciente), resultando los primeros los más sencillos y con menor número de prestaciones, a pesar de que generalmente resulten ser los más rápidos.

A medida que incrementa el nivel en el modelo CIM, aumentan también las exigencias de las redes de comunicación, siendo necesarias redes de mayor complejidad y funcionalidad. En la siguiente imagen se puede observar la clasificación de los distintos buses de campo según su complejidad, coste, funcionalidad y nivel de datos transferidos por mensaje.

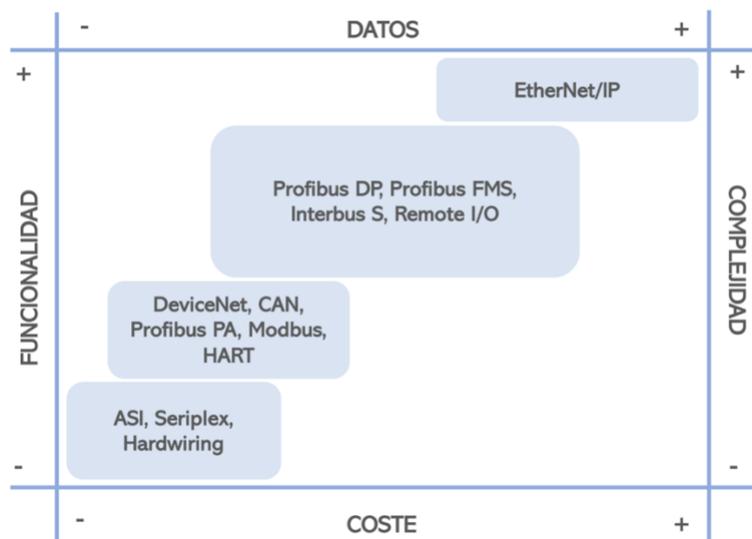


Figura 19. Clasificación de buses de campo

Fuente: Elaboración Propia

2.2.5.1.2 Clasificación

2.2.5.1.2.1 ASI (Actuator – Sensor Interface)

El bus ASI fue desarrollado en 1990 por diferentes compañías del sector con el objetivo de reducir el cableado entre los diferentes sensores y actuadores binarios

(basados en el principio todo-nada), de manera que viajase por un solo cable tanto los datos como la alimentación de los dispositivos. Se trata de un sistema de comunicación abierto basado en el estándar IEC 62026-2, cuya sencillez y bajo nivel de prestaciones le posicionan como protocolo de comunicación en el nivel inferior de la pirámide CIM.

El protocolo ASi sigue una arquitectura maestro - esclavo, en la que el nodo principal (conocido como ASi Master) se comunica con los diferentes nodos subordinados (conocidos como ASi Slaves). Básicamente, el maestro consulta cíclicamente el estado de las entradas digitales de cada uno de los esclavos y en base a estas, modifica el estado de los actuadores o salidas.

El cable ASi consiste en un cable plano con dos hilos metálicos sin trenzar ni apantallar por los cuales circulan tanto las señales de control como la corriente de alimentación de los sensores y actuadores. Generalmente, los esclavos consumen una corriente de 200 mA y poseen una tensión de operación entre 26.5 V y 31.6 V. En caso de que se deseen conectar dispositivos que requieran una mayor potencia de alimentación, se pueden alimentar con un cable independiente.

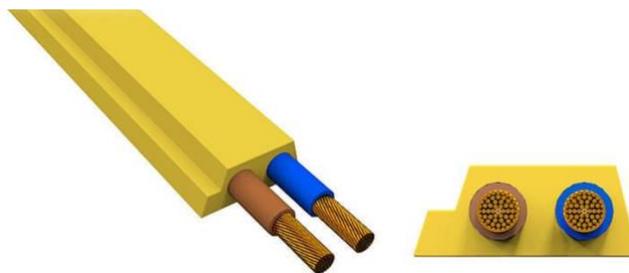


Figura 20. Cable Actuator Sensor Interface

Fuente: Bihl + Wiedemann. El cable ASi.

La capacidad de control del maestro sobre los esclavos depende de la versión del protocolo ASi. Versiones previas del protocolo permiten un control de hasta 31 dispositivos simples o 62 dispositivos avanzados repartidos en 100 metros (en

ausencia de repetidores), con cuatro entradas y salidas por dispositivo. En consecuencia, esto supone un total de 124 entradas/salidas para redes estándar y 248 entradas/salidas para redes avanzadas.

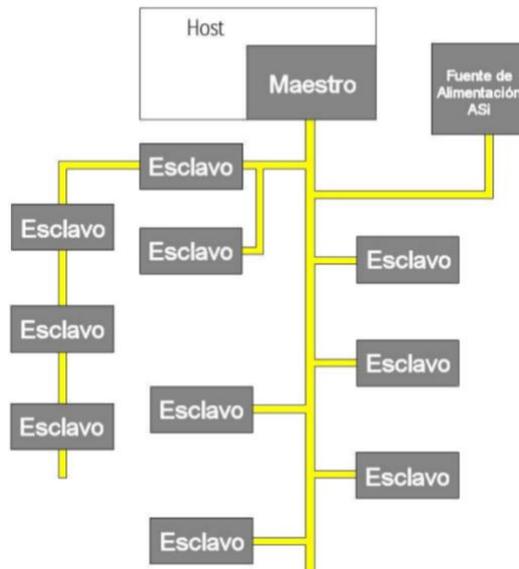


Figura 21. Ejemplo de red ASI

Fuente: Bihl + Wiedemann. El cable ASI.

Adicionalmente a su funcionamiento, posee un tiempo por ciclo de 5ms o 10ms, variable según la versión. La comunicación se realiza a partir de telegramas de 4 bits y el direccionamiento de los esclavos se puede realizar a través del maestro o bien, empleando un dispositivo especializado de direccionamiento.

Actualmente, el protocolo ASi se ha actualizado a la versión ASi – 5, la cual posee las siguientes características:

- Telegrama de 16 bits y transmisión cíclica de hasta 32 bytes.
- Máximo de 1.536 entradas y salidas binarias.
- Tiempo de ciclo máximo de 1.2 ms, lo cual es considerablemente inferior al tiempo de ciclo para versiones previas del protocolo.

Otra de sus principales características es la flexibilidad debido a que permite cualquier topología de cableado (estrella, árbol, bus) y cualquier configuración hasta 100

metros. En caso de desear ampliarla red, se pueden incorporar repetidores hasta una longitud máxima de red de 300 metros. El control de acceso al medio se realiza a partir de la siguiente secuencia cíclica: consulta del maestro, pausa y respuesta del esclavo.

De manera resumida, los elementos principales que constituyen este protocolo de comunicación son:

1. Maestro ASi: se encuentra conectado al elemento de control principal (generalmente un PLC). También puede encontrarse conectado a una pasarela de comunicación con el objetivo de permitir la comunicación con protocolos de nivel superior.
Sus funciones incluyen supervisar la red, realizar las configuraciones de los esclavos y ejecutar las operaciones de diagnóstico.
2. Esclavo ASi: elemento al que se conectan las entradas y salidas y sobre el que obtiene información el maestro ASi. Existen dos tipos de esclavos:
 - Genéricos: disponen de cuatro entradas y cuatro salidas que permiten conectar cualquier sensor y/o actuador binario.
 - Avanzados: a partir de un circuito integrado conocido como ASiC (Application Specific Integrated Circuit) que permite llevar a cabo tareas específicas.
3. Alimentación ASi: Fuente encargada de suministrar el valor de tensión y corriente adecuados para lograr el funcionamiento de los diferentes dispositivos que se encuentran conectados a la red. Proporciona una tensión continua de 30V y una corriente de hasta 8 A.

En caso de que sea necesario conectar otra tensión de alimentación, se pueden integrar fuentes de alimentación adicionales de 24 V DC y 230 V AC (de color negro y rojo, respectivamente).

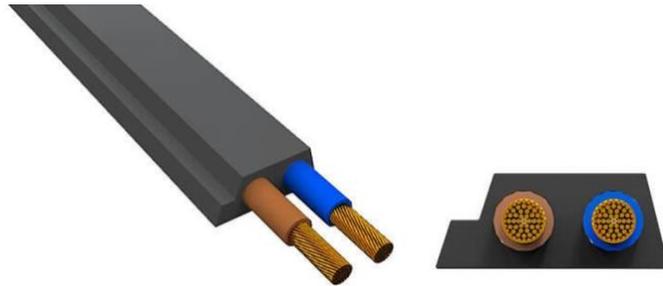


Figura 22. Cable de alimentación ASI

Fuente: Bihl + Wiedemann. El cable ASI.

4. Cable ASI: cable plano constituido por dos hilos metálicos sin apantallar con el objetivo de alcanzar cierto grado de inmunidad al ruido. Posee una guía de posicionamiento (DIN VDE 0295), color amarillo y una pequeña muesca en uno de sus lados para evitar la inversión de la polaridad y facilitar la instalación de este.

El método de conexión de los esclavos al cable ASI consiste en la perforación de la capa de aislante del cable y el contacto con ambos hilos metálicos en su interior. Adicionalmente, existen esclavos que incorporan un watchdog con el objetivo de detectar posibles fallos de conexión, de manera que otorgan un mayor grado de protección de la red.

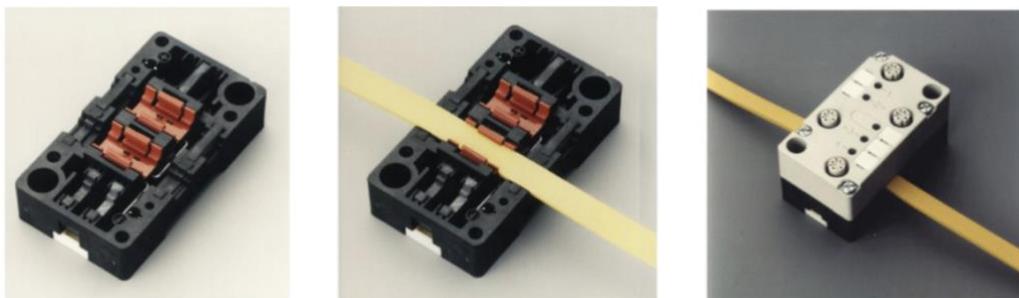


Figura 23. Conexión cable ASI

Fuente: M.P.M y F.P.M DPTO.ELECTRICIDAD-CIP ETI Tudela

2.2.5.1.2.2 CAN

El protocolo CAN (Control Area Network) fue desarrollado en 1986 por el fabricante alemán Robert Bosch. Se trata de un protocolo recogido en el estándar ISO 11898 y orientado al ámbito de la automoción, con el objetivo de reducir el cableado de los vehículos y en consecuencia, disminuir el peso de los mismos y el coste de instalación.

Este protocolo se basa en el principio “Productor / Consumidor” y funciona a base de mensajes. Consiste en que todos los nodos consumidores se encuentran constantemente a la escucha de los mensajes transmitidos por el nodo productor, también conocido como “árbitro de bus”.

La comunicación se lleva a cabo a través de mensajes que cuentan con un identificador de 11 bits (con un máximo de 29 bits en casos de equipos pesados), lo que implica la posibilidad de definir hasta 2^{11} mensajes diferentes. El concepto “broadcasting” hace referencia al proceso en el que un nodo productor transmite un mensaje a todos los nodos consumidores de la red y son éstos los que deciden si el mensaje va dirigido o no a él según su programación o configuración hardware.

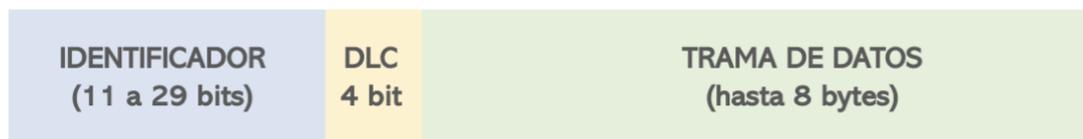


Figura 24. Trama de mensaje CAN

Fuente: Elaboración Propia

Algunas de las características de este bus de comunicación son:

- Posibilidad de establecer prioridades a partir del método CSMA/CR (Carrier Sense Multiple Access / Collision Resolution). Este método permite identificar colisiones en la transmisión de datos a la red de manera que, si se detecta una colisión, se emite una señal de aviso para detener el resto de las transmisiones y evitar que se produzca otra colisión.

- Sistema multimaestro de elevada fiabilidad.
- Capacidad de detección y notificación de errores, tanto puntuales como permanentes.
- Velocidad de transmisión desde 50 Kbps hasta 1 MBps para distancias entre 1 y 40 metros, respectivamente.
- Existen dos tipos de red CAN en función de su velocidad: CAN_H (alta velocidad) y CAN_L (baja velocidad)

Los componentes que integran este sistema de comunicación son:

1. Host: corresponde con el principal elemento de control, el cual se encarga de controlar el estado de los nodos que integran la red y comprobar la existencia de eventos o alarmas. Emplea la red de alta velocidad CAN_H.
2. Árbitro de bus: regula el tráfico de mensajes del bus, decidiendo el orden de envío de mensajes según las prioridades establecidas.
3. Nodos: controlados por el maestro y encargados de establecer la comunicación directa con el Host. Puede emplear la red de alta velocidad (CAN_H) o la red de baja velocidad (CAN_L) en función de la aplicación. Por ejemplo, el nodo encargado de controlar la climatización interior del vehículo empleará CAN_L mientras que el nodo encargado de controlar acciones de seguridad como la activación de los airbags o el frenado de emergencia empleará CAN_H.
4. Esclavos: desde la perspectiva del Host, los esclavos son los maestros mientras que, desde la perspectiva del Maestro, los esclavos son los sensores / actuadores.

2.2.5.1.2.3 CAN OPEN

CANOpen es un protocolo de comunicación basado en CAN desarrollado por la CiA (CAN in Automation) y orientado al ámbito de control industrial.

El modelo CANOpen se basa en el diccionario de objetos (OD – Device Object Dictionary), el cual hace referencia a un concepto que describe de manera estandarizada la funcionalidad y el comportamiento de cada dispositivo integrado en la red y permite configurarlo a través de mensajes transmitidos por medio del bus.

En este protocolo coexisten tanto perfiles de comunicación (Communication profiles) como perfiles de dispositivos (Device profiles). Los primeros contienen información sobre la manera en que se establece la comunicación mientras que los segundos hacen referencia a las características de los dispositivos como nombre, índice, tipos de datos, el carácter de estos (lectura, escritura o ambas) etc.



Figura 25. Principios de comunicación de CANOpen

Fuente: Elaboración Propia

El modelo CANOpen define cuatro tipos de mensajes, también conocidos como objetos de comunicación:

- Process Data Objects (PDO): mensajes de procesos u objetos empleados en el intercambio de datos en tiempo real, por lo que posee una mayor prioridad que el resto de los mensajes.

Los mecanismos de comunicación para la transmisión de PDOs pueden ocurrir de manera síncrona (a partir de objetos SYNC) o asíncrona (a partir de eventos o la activación de un temporizador).

- Service Data Objects (SDO): mensajes de servicio u objetos empleados para llevar a cabo las acciones de lectura o escritura sobre algún objeto del diccionario. Poseen una menor prioridad que los mensajes de procesos.
- Objetos administrativos (NMT – Network Management Objects): permiten llevar a cabo la configuración de las capas de red.
- Mensajes predefinidos (Special Function Objects): permiten llevar a cabo acciones de sincronización entre los objetos, así como la generación de avisos en caso de emergencia. Se debe tener en cuenta que existe un mensaje de emergencia por cada nodo.

El protocolo soporta diferentes métodos de comunicación:

1. Maestro / Esclavo: existe un nodo asignado como maestro que controla la comunicación en todo momento. Éste es el encargado de enviar o solicitar información al resto de nodos activos (esclavos).
2. Cliente / Servidor: existe un único cliente y servidor. El proceso consiste en la solicitud de datos por parte del cliente, la recepción de la petición por el servidor y la puesta en marcha de la tarea solicitada. Una vez finalizada la tarea, el servidor informa al cliente sobre su estado y los resultados de la tarea. Generalmente empleado para la configuración de dispositivos (SDO).
3. Productor / Consumidor: existe un productor y pueden existir varios consumidores o ninguno. La comunicación puede establecerse de dos maneras:

- Push: el productor emite un mensaje sin necesidad de confirmación de entrega por parte del consumidor. Es empleada para transmitir datos a elevada velocidad.
- Pull: el productor solicita un servicio con confirmación. Esto es, el consumidor debe asegurar la correcta entrega de la solicitud para evitar la pérdida de información. Se caracteriza por operar a una menor velocidad debido a la necesidad de recibir la confirmación de entrega del mensaje.

Algunas de las características que definen su funcionamiento son:

- Velocidad máxima de 1 Mbps.
- Transmisión de datos fiable como consecuencia del establecimiento de prioridades entre mensajes, lo que elimina la posibilidad de colisiones y consecuentemente, la pérdida de información.
- La longitud de los identificadores de mensaje es de 11 bits, donde los 4 primeros bits corresponden con el código de función (sincronización, emergencia, lectura, escritura) y los 7 restantes hacen referencia al identificador del nodo con el cual se establece la comunicación. Esto permite dotar de prioridad a las funciones críticas.

Por ejemplo, el identificador de emergencia es 0001xxxxxx mientras que el relativo a las marcas de tiempo es 0010xxxxxx.

- Detección de errores a partir de cinco mecanismos de detección de errores distintos, los cuales son capaces de detectar errores en el contenido o formato de la trama, por ejemplo.

2.2.5.1.2.4 DeviceNet

DeviceNet es un protocolo de comunicación basado en CAN y orientado a un nivel medio/bajo dentro de la pirámide de automatización, lo que corresponde con el nivel de planta y el nivel de célula.

Fue desarrollado por el fabricante de origen norteamericano Allen-Bradley en 1994. Debido a que se trata de un estándar abierto, en 1995 fue necesario crear la asociación ODVA (Open DeviceNet Vendor Association), encargada de controlar y gestionar todos los dispositivos que se adhieren a este protocolo.

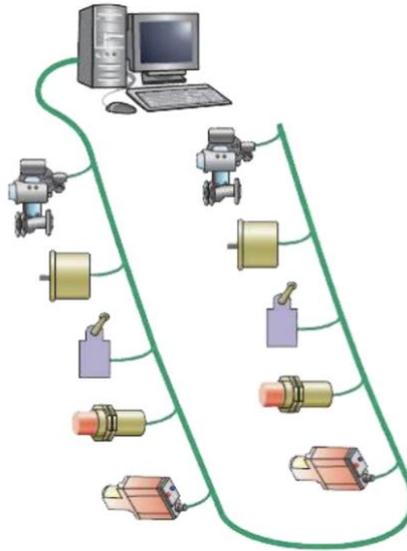


Figura 26. Ejemplo de red DeviceNet

Fuente: AutomationForum.co

Las principales características de este bus de comunicación son:

- Límite máximo de 64 nodos por red.
- Tamaño de mensaje de 8 bytes por nodo, lo que permanece invariable con respecto a CAN.
- Velocidad de transferencia de datos variable en función de la longitud de la red, pudiendo alcanzar un máximo de 500 Kbits/s.
- Longitud máxima de red de 500 metros.
- Topología en bus y posibilidad de bifurcaciones hacia nodos. Se debe tener en cuenta que la presencia de bifurcaciones disminuye la velocidad de transmisión de datos y la distancia máxima de la red.

Uno de los principales aspectos diferenciales de DeviceNet respecto a otras redes de comunicación es la posibilidad de integrar la alimentación en el mismo cable de transferencia de datos, lo que permite reducir los costes.

Sin embargo, presenta un ancho de banda limitado, lo que afectará y disminuirá la tasa de transferencia de datos.

2.2.5.1.2.5 COMPOBUS

Bus de comunicación impulsado por Omron y considerado una actualización de DeviceNet. Se pueden diferenciar dos versiones: Compobus D y Compobus S.

Compobus S se basa en un sistema de comunicación maestro – esclavo a través de un cable constituido por dos hilos trenzados y apantallados, lo que permite simplificar considerablemente el cableado tradicional ya que permite emplear el mismo cable para transportar tanto datos como alimentación.

Posee una velocidad máxima de transferencia de datos de 700 Kbits/s y un máximo de 32 esclavos. Teniendo en cuenta que cada esclavo permite la conexión de cuatro entradas y cuatro salidas, esto constituye un máximo de 256 entradas/salidas por esclavo. Generalmente se emplea para sistemas que no cuentan con numerosos dispositivos.

Compobus D presenta una arquitectura de comunicación maestro – esclavo a través de un cable que contiene entre tres y cinco hilos metálicos. Permite un máximo de 50 esclavos, lo que permite un máximo de 400 entradas/salidas por esclavo. Posee una velocidad de transferencia de datos de 500 Kbit/s y permite una mayor longitud de red.

2.2.5.1.2.6 LONWorks

LONWorks (Local Operating Networks) fue desarrollado por Echelon Corporation (California) a finales de la década de 1980. Se basa en el protocolo de comunicación

abierto LONTalk, impulsado también por la compañía e incluido en el estándar IEC 709.1 en el año 1999.

Este modelo de comunicación se caracteriza por emplear LON (Local Operating Networks) en vez de una red de área local, también conocido por las siglas LAN (Local Area Network). Estas redes difieren en cuanto a la cantidad de datos y la verificación del resultado de transmisión de estos. Una red LON es concebida como una red de control, no una red de datos, por lo que es capaz de transmitir mensajes cortos asegurando en todo momento una fiable transmisión de los mismos. A diferencia de la red LAN, que posee una velocidad de transmisión máxima de 100 Mbps, la red LON es considerablemente más lenta, alcanzando una velocidad máxima de 78 Kbps.

En consecuencia, es generalmente empleado en la automatización de edificios e infraestructuras como alumbrado público, más que en el ámbito industrial donde predominan otros estándares de comunicación.

El sistema de comunicación se compone de diversos nodos conectados al medio físico (cable) a través de transceptores. La comunicación con los nodos puede realizarse de manera descentralizada o siguiendo la lógica maestro - esclavo. Una de las principales ventajas de este modelo es su elevado rendimiento y robustez como consecuencia de la distribución de la carga a procesar, lo cual es posible gracias a la integración de una “neurona” en cada nodo. Ésta consta de tres procesadores de 8 bits dispuestos en paralelo, de manera que dos de ellos están reservados para la gestión del protocolo de comunicaciones mientras que el restante se encarga de la ejecución de las aplicaciones de cada nodo. En consecuencia, se consigue que la complejidad de las aplicaciones no interfiera en la red de comunicación.

Se debe tener en cuenta que todos los dispositivos que integran una red LONWorks son inteligentes, de manera que cuentan con procesadores desarrollados por Echelon Corporation y conocidos como NeuronChip, los cuales pueden ser programados en un lenguaje basado en C (Neuron C).

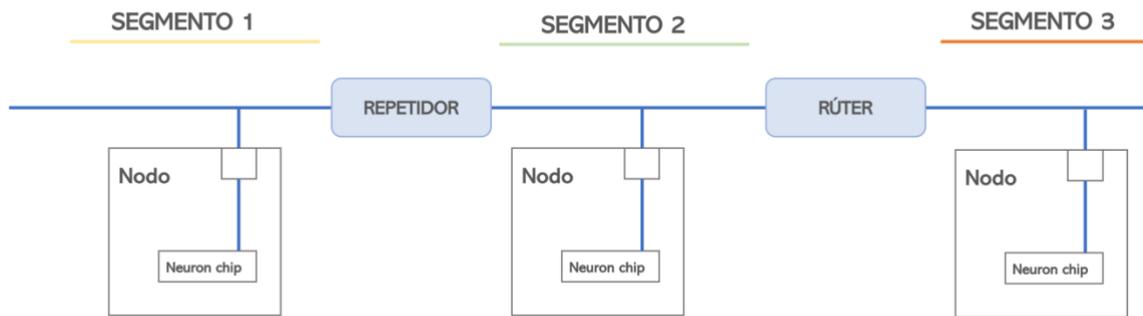


Figura 27. Ejemplo de red LONWorks

Fuente: Elaboración Propia

Una de las principales desventajas del modelo es una mayor dificultad de detección de errores debido a que no se realiza un control continuo del estado de los nodos. Sin embargo, si el acceso al medio se realiza por maestro-esclavo, se puede programar un envío de datos desde el esclavo al maestro para verificar la correcta comunicación entre ambos.

En función de la topología del medio físico, variará la velocidad de transmisión, el número máximo de dispositivos y la distancia máxima de la red. Por ejemplo, una topología en bus de par trenzado admite 64 dispositivos y una distancia máxima de 125 metros.

2.2.5.1.2.7 MODBUS

MODBUS es un protocolo de comunicación abierto de carácter industrial desarrollado por Modicon (ahora, Schneider Electric) a finales de la década de 1970. Inicialmente fue desarrollado para comunicar diferentes controladores lógicos programables pero su uso se ha ido extendiendo hasta convertirse en uno de los principales métodos de comunicación entre dispositivos de campo y controladores industriales.

Según el método de comunicación, se diferencian tres versiones de MODBUS: MODBUS ASCII, MODBUS RTU y finalmente, MODBUS TCP.

MODBUS ASCII

Constituye el primer método de comunicación desarrollado, basado en la transmisión de datos en formato ASCII. Es importante tener en cuenta que la trama de datos contiene tres caracteres especiales: el primero (:) denota el inicio de la trama mientras que los dos últimos corresponden al retorno de carro (CR) o salto de línea (LF). Esto facilita la detección de la trama con independencia de la secuencia de transmisión, siendo adecuada la implementación de módems.

Tabla 1. Trama de datos de MODBUS ASCII

Fuente: MODBUS ASCII. Colaboradores de Wikipedia.

Nombre	Longitud (bits)	Función
Inicio	1	símbolo ":" (En ASCII "3A")
Dirección	2	Dirección del dispositivo
Función	2	Código de función
Datos	N x 2	Datos (Longitud depende del tipo de mensaje)
LRC	2	Verificación de redundancia longitudinal
Fin	2	Retorno de carro/Avance de línea (CR/LF) (En ASCII "0D"/"0A")

Realizando una comparativa con el resto de las variantes MODBUS, MODBUS ASCII se caracteriza por poseer una menor velocidad. De manera que, si se desea transmitir una misma trama a igual velocidad, se requiere un mayor ancho de banda.

La aparición del resto de protocolos MODBUS provocó que este método fuera considerado obsoleto, siendo cada vez menos empleado en industria.

MODBUS RTU

Protocolo de comunicación que sigue una arquitectura maestro – esclavo centralizada sobre un puerto RS-232 o RS – 485. La longitud máxima de la red viene determinada por los puertos serie, alcanzando una longitud máxima de 15 metros para el puerto RS-232 y 1.200 metros para el puerto RS-485.

A diferencia del protocolo MODBUS ASCII, donde el espacio entre bytes resulta variable, el protocolo MODBUS RTU (Remote Terminal Unit – Unidades terminales remotas) envía los bytes consecutivamente, dejando un espacio temporal entre mensajes de alrededor de tres caracteres, lo cual actúa como un delimitador y permite al software interpretar el inicio y fin de un mensaje. Esto constituye la principal problemática en cuanto a la implementación de módems.

En este protocolo, cada byte cuenta con diez caracteres, ocho bits binarios enmarcados por un bit de inicio y fin. Una de sus principales ventajas es, debido a que se trata de un protocolo relativamente sencillo, opera a una elevada velocidad de transmisión, alcanzando una velocidad máxima de 115.200 bits por segundo.

MODBUS TCP/IP

MODBUS TCP/IP, cuyas siglas hacen referencia al protocolo de control de transmisión y protocolo de información (Transmission Control Protocol/Information Protocol), surgió con el objetivo de adaptar MODBUS al estándar Ethernet.

La principal ventaja de este protocolo es la capacidad de llevar a cabo múltiples transacciones de manera independiente por una sola conexión, la cual permite ser identificada, controlada y cancelada fácilmente. Esto proporciona una mayor robustez al estándar, otorgando una mayor tolerancia ante cambios de rendimiento, entre otros aspectos.

Posee una velocidad de transferencia máxima de 1 Gbit por segundo, una lógica maestro – esclavo y la capacidad de conexión de múltiples nodos.

2.2.5.1.2.8 INTERBUS

INTERBUS es una red de comunicación desarrollada por Phoenix Contac en la década de 1980 y enfocada al ámbito de automatización industrial. Se basa en una

arquitectura maestro – esclavo en la que el maestro está en constante comunicación con los niveles superiores del modelo CIM.

Surgió con el objetivo de simplificar el cableado en las redes de comunicación y ofrece una elevada funcionalidad en aplicaciones que requieran pocos nodos, alcanzándose una elevada velocidad máxima de 2 Mbits por segundo para aplicaciones que posean cables de fibra óptica. En caso de que el cable sea de par trenzado, la velocidad de transmisión desciende a 500 kbit por segundo.

Permite conectar hasta 512 dispositivos en 16 niveles distintos, lo que, teniendo en cuenta cuatro entradas y salidas por dispositivo, supone un total de 4.096 E/S. Sigue una topología de anillo, de manera que la comunicación entre todos los dispositivos constituye un camino cerrado.

Es importante tener en cuenta que, debido a que no se produce el direccionamiento de los dispositivos, la información que circula por la red es la misma para todos los dispositivos. Como información adicional, se basa en el estándar europeo EN 50254.

2.2.5.1.2.9 PROFIBUS

PROFIBUS surgió en el año 1986 como resultado de la investigación por parte de empresas e institutos relativos al Ministerio alemán de Educación e Investigación (BMBF). Su desarrollo y comercialización se vio apoyada por grandes compañías como ABB o Siemens. Como ocurre con cualquier otro protocolo, se han creado dos asociaciones encargadas de regular su uso y proponer posibles mejoras: PNO (Organización de Usuarios de Profibus) y PI (Profibus Internacional).

Se trata de un bus que, siguiendo una arquitectura maestro – esclavo, es capaz de funcionar en los niveles más altos del modelo CIM, a diferencia del resto de buses y redes de comunicación comentados previamente (a excepción de MODBUS TCP/IP).

Actualmente, se encuentra normalizado dentro del estándar alemán DIN 19245 y el estándar europeo EN 50170.

Programa de usuario		Perfiles de aplicación	
7	Capa de aplicación		Protocolo PROFIBUS DP (DP-V0, DP-V1, DP-V2)
6	Capa de presentación		No usada
5	Capa de sesión		
4	Capa de transporte		
3	Capa de red		
2	Capa de vínculo de datos		Enlace de datos fieldbus (FDL): Principio maestro-esclavo Principio token
1	Capa física		Tecnología de transmisión
Modelo de capas OSI		Implementación OSI en PROFIBUS	

Figura 28. Aplicación de PROFIBUS EN modelo OSI

Fuente: us.profinet.com

Según el campo de comunicación, se diferencian tres versiones de PROFIBUS: PROFIBUS DP, PROFIBUS PA y finalmente, PROFIBUS FMS.

PROFIBUS - DP

Como su propio nombre indica, es empleado para trabajar con periféricas distribuidas (Distributed Peripherals), donde las entradas y salidas se comunican a través de un controlador centralizado por áreas.

Se caracteriza por una elevada velocidad de transmisión, concretamente un rango entre 9.6 kbit y 12 Mbit por segundo. Además, la comunicación se realiza cíclicamente a partir de datagramas que se envían en modo multicast o broadcast por parte de los maestros. Éstos se clasifican en dos grupos, los maestros tipo 1 se encargan de las tareas de control, recibiendo y enviando datos, mientras que los maestros tipo 2 se encargan de las funciones de servicio técnico, diagnóstico y gestión de la red.

PROFIBUS - PA

Red de comunicación enfocada a la automatización de procesos (Process Automation) y basada en el estándar internacional IEC 11158 -2 para el nivel de campo. Este contiene la normativa de comunicación síncrona entre sensores de campo y la posibilidad de emplear cableados antiguos de 4 a 20 mA. A nivel de proceso, la comunicación se lleva a cabo a través de Ethernet. Es generalmente empleado en aplicaciones que requieren niveles superiores de seguridad como la industria química, donde existe un mayor riesgo de explosión.

Es concebido como una ampliación de PROFIBUS – DP diseñada para operar en entornos clasificados como ATEX, por lo que emplean el mismo protocolo de comunicación y, en consecuencia, facilita el acoplamiento de ambos en aplicaciones concretas. Posee una velocidad de transmisión inferior a PROFIBUS – DP, concretamente 31.25 kbit por segundo.

PROFIBUS – FMS

Versión de PROFIBUS orientada a la comunicación a nivel de control, concretamente las tareas de comunicación complejas y extensas entre diversos controladores (PLCs) o sistemas de control distribuido (DCS). Sin embargo, su uso está siendo sustituido por Ethernet debido a que ofrece una mayor eficiencia.

La comunicación puede establecerse entre maestros, o bien entre un maestro y un esclavo de la red. Con respecto al método de transmisión de paquetes, éste puede realizarse punto a punto, broadcast o multicast.

Los servicios que ofrece forman parte de aquellos definidos en el MMS (Manufacturing Message Specification), basados en el ISO 9506. El estándar MMS es referente al intercambio de información en tiempo real y la información de control entre dispositivos de la red y/o aplicaciones. Los dispositivos de la red son definidos como dispositivos

de campo virtuales, lo que ofrece múltiples ventajas como el acceso no solo a la información que entregan sino también a los datos internos.

Se caracteriza por poseer una velocidad de transmisión máxima de 12Mbit por segundo, admitiendo datos de usuario de hasta 244 bytes por servicio. Es comúnmente empleado como un entorno de programación orientada a objetos.

2.2.5.1.3 Conclusiones buses de campo

Habiendo realizado un resumen de algunos de los buses campo industriales existentes, se puede concluir que éstos presentan semejanzas en cuanto a su funcionamiento, diferenciándose principalmente en aspectos como velocidad de transmisión o volumen de datos enviados. Algunos de los protocolos más empleados a nivel de campo son MODBUS, PROFIBUS, CANOpen y ASi (Actuator – Sensor Interface).

El avance de las tecnologías y el mayor conocimiento sobre las comunicaciones a nivel industrial ha permitido incorporar atributos como redundancia o funciones específicas de seguridad con el objetivo de dotar una mayor continuidad y fiabilidad. Además, se han desarrollado métodos de comunicación más complejos con una mayor funcionalidad, velocidad de transmisión y capacidad de gestión de grandes cantidades de datos (como Ethernet, por ejemplo).

Cabe destacar que, a pesar de que su uso se encuentre generalmente centrado en niveles elevados del modelo CIM, EtherCAT puede ser empleado también a nivel de campo, por lo que puede considerarse un bus de campo de alto nivel y rendimiento.

2.2.5.2 Redes industriales

2.2.5.2.1 Ethernet

Ethernet es un estándar que permite realizar el intercambio de datos entre terminales (servidores, ordenadores, distribuidores...) que se encuentren conectados a una misma red local. Fue desarrollado a principios de la década de 1970, sin embargo, su ausencia de determinismo y fragilidad de cableado provocó que se popularizara de manera masiva en la década de 1980, convirtiéndose hasta día de hoy en uno de los métodos de comunicación más empleados.

Se basa en el estándar IEEE 802.3 (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), el cual ha sido modificado a lo largo de los años, siendo su última versión la desarrollada en 2018, correspondiente con el identificador 802.3 cd.

En una red Ethernet, se asigna a cada dispositivo una dirección MAC de 48 bits. Esta dirección permite a la red identificar todos los dispositivos y equipos que se encuentren conectados para que éstos puedan comunicarse y transmitir mensajes a altas frecuencias. El método de acceso al medio es CSMA/CD (Carrier – Sense Multiple Access with Collision Detection), en el cual los dispositivos deben verificar la disponibilidad de sus recursos y del canal de transmisión previamente a realizar el envío de información. Esto dota al sistema de transmisiones secuenciales y evita la colisión entre mensajes transmitidos por diferentes dispositivos.

El procedimiento para llevar a cabo las transmisiones en el siguiente:

- Verificación si existen tramas listas para ser transmitidas. En caso de que no se encuentren listas, esperar.
- Verificación de disponibilidad de medio. En caso de que el medio se encuentre ocupado, esperar.
- Transmisión de información y comprobación de colisiones.

- En caso de existir una colisión, detener la transmisión de información y reestablecer los contadores de retransmisión.
- Completar la transmisión de la trama correctamente.

Con respecto a la topología, las redes Ethernet se pueden estructurar como bus o como estrella a partir de diversidad de medios de transmisión (cobre, inalámbrico o fibra). Además, reduce los costes en cuanto al hardware y su instalación.



Figura 29. Cable de red Ethernet

Fuente: Ethernet RJ45 Cables. Microless.

En sus inicios, Ethernet se enfocaba al ámbito de oficina debido a su no determinismo y mayores velocidades de transmisión, lo que imposibilitaba su integración en aplicaciones con exigencias de control en tiempo real. Sin embargo, su evolución a lo largo de los años ha provocado que, poco a poco, se vaya introduciendo en el ámbito industrial y que diversos fabricantes hayan desarrollado protocolos de comunicación basados en Ethernet.

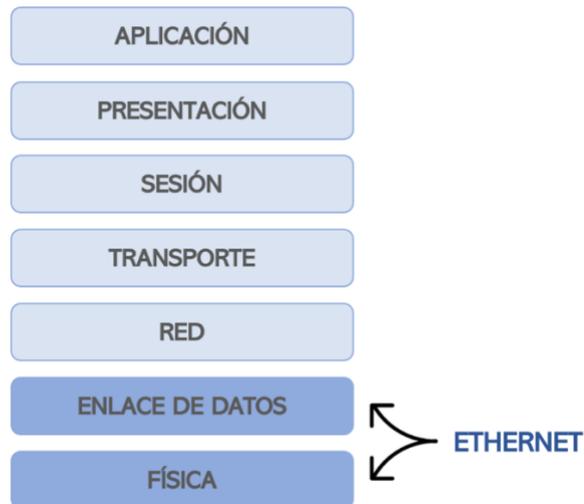


Figura 30. Ethernet en modelo OSI

Fuente: Elaboración Propia

Algunos de estos protocolos son: Ethernet IP, PROFINET, FIELDBUS HSE, OPC UA y EtherCAT, los cuales son expuestos a continuación.

2.2.5.2.2 Redes industriales basadas en Ethernet

2.2.5.2.2.1 ETHERNET IP

Protocolo de comunicación desarrollado al inicio de la década de 1990 con el objetivo de adaptar el protocolo CIP (empleado por redes como ControlNet) al protocolo Ethernet, para lo que emplea protocolos de control de transmisión (TCP), protocolos de datagramas de usuario (UDP) o protocolos de información (IP).

Permite la conexión de tipo bus, árbol o estrella, siendo ésta última la más extendida. Generalmente, una red Ethernet IP emplea una topología en estrella en la que todos los dispositivos se encuentran conectados punto a punto a un conmutador, el cual determinará la velocidad de transmisión.

Ofrece una alta velocidad de transmisión (con un máximo de 1 Gbit por segundo) y facilidad de detección de fallos y mantenimiento.

2.2.5.2.2.2 PROFINET

PROFINET es un protocolo de comunicación Ethernet basado en los estándares TCP/IP y desarrollado por la asociación PROFIBUS Internacional según IEC 61784-2. Es considerado una adaptación del protocolo PROFIBUS DP.

Una de las principales ventajas de PROFINET es que ofrece nuevas funcionalidades denominadas “perfiles” como PROFI-safe o PROFI-energy, el cual permite la gestión del consumo de potencia de los dispositivos y, en consecuencia, alcanzar un mayor ahorro de energía. Esto se consigue a partir de una interpretación especializada para cada uno de los datos transmitidos. Además, permite llevar a cabo tareas de diagnóstico, control en tiempo real y control de motores.

Existen numerosas variantes de este protocolo según criterios como su utilidad:

- PROFINET RT: empleado para la transmisión de datos en tiempo real, con un tiempo de 10 ms por ciclo.
- PROFINET IRT: empleado para la transmisión de datos en tiempo real de manera asíncrona, lo que permite alcanzar tiempos de 1 ms por ciclo, motivando su implementación en aplicaciones de control de movimiento.
- PROFINET I/O: protocolo utilizado para comunicaciones con periféricas distribuidas.
- PROFINET CBA: protocolo empleado generalmente para comunicar distintos controladores y enfocado a aplicaciones de automatización distribuida a nivel industrial.
- PROFINET MRP: protocolo empleado para la redundancia de medios, esto es, en aquellas aplicaciones en las que la disponibilidad resulta crítica. Se basa en la reestructuración de la topología de la red en caso de que exista un fallo de conexión en la misma.
- PROFINET MRRT: utilizado para redundancia en tiempo real (PROFINET RT).

Estos protocolos presentan compatibilidad, de manera que pueden coexistir entre ellos, así como con otras redes basadas en Ethernet industrial. Algunas de las características más importantes en cuanto al funcionamiento de PROFINET son:

- Topología flexible, lo que permite que se adapte a las demandas de comunicación de cada aplicación.
- Velocidad de transmisión máxima de 100 Mbit por segundo, en caso de que la comunicación se realice full-dúplex.
- Compatibilidad con Ethernet según el estándar IEEE.
- Elevada disponibilidad de planta como consecuencia de la redundancia de medios y diagnósticos inteligentes.
- Los componentes que integran la red PROFINET se pueden clasificar en tres grupos: controladores, dispositivos y supervisores.

Los controladores se encargan de ejecutar un programa de automatización y comunicarse con los dispositivos de E/S tanto cíclicamente como acíclicamente. Por su parte, los dispositivos de E/S hacen referencia a los sensores y actuadores del sistema, encargados de recopilar información sobre su estado y llevar a cabo acciones sobre el sistema. Los supervisores son aquellos equipos responsables de tareas de monitorización y diagnóstico como interfaces HMI, PCs etc.

- Posibilidad de conexión de hasta 200 módulo E/S por nodo.

Con respecto al modelo OSI, en función del servicio de comunicación (RT, NRT, IRT) PROFINET emplea diferentes protocolos encargados de transmitir la información entre los niveles.

En primer lugar, la implementación de la capa física es eléctrica, ya sea por un cable, una red inalámbrica o fibra óptica. Existen numerosos protocolos con posibilidad de ser implementados en este nivel, siendo los protocolos más comunes aquellos incluidos en el IEEE 802, concretamente el Ethernet cableado (IEE 802.3) y Ethernet Wireless o inalámbrico (802.11).

La comunicación en la capa de enlace de datos se lleva a cabo a través de Ethernet, por lo que cada dispositivo debe tener asignada una dirección MAC.

Para las capas de red, transporte y sesión se emplean protocolos IP (Protocolo de Internet), UDP (Protocolo de datagramas de usuario) y RPC (Llamada a procedimiento remoto) respectivamente. El uso de las direcciones IP, MAC y puertos UDP de estos protocolos facilita el procesamiento de los datos de PROFINET. Sin embargo, suponen una sobrecarga, lo que disminuye la velocidad de procesamiento y provoca que solo sean empleados en casos estrictamente necesarios.

Las capas superiores de presentación y aplicación se basan en PROFINET, lo cual es observable en la siguiente imagen:

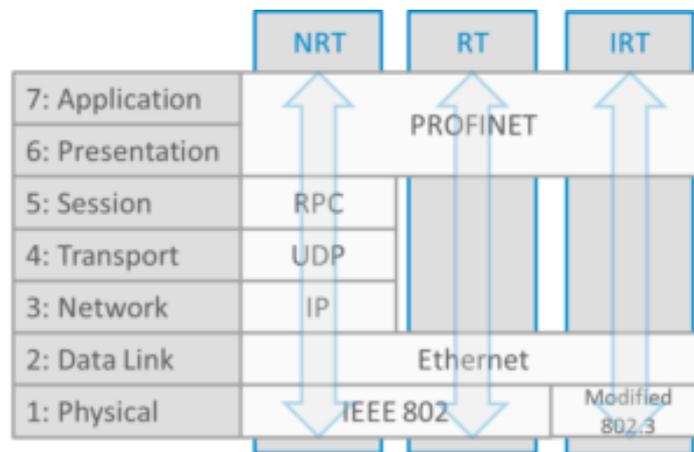


Figura 31. Aplicación de PROFINET en modelo OSI

Fuente: PROFINET University

PROFINET ofrece tres servicios de comunicación:

- NRT (No Real Time): empleado principalmente para tareas que no exigen determinismo como la transmisión de datos a niveles superiores o funciones de parametrización. Cuenta con una mayor latencia y jitter.

Para este tipo de comunicación, se emplean todas las capas del modelo OSI y debido a que los dispositivos cuentan con una dirección IP, se puede acceder a ellos a través de un proceso de enrutamiento o a través de Internet.

Los telegramas enviados tienen una longitud máxima de 1.518 bytes, distribuidos de la siguiente manera:

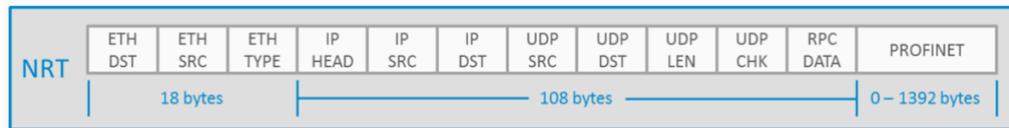


Figura 32. Trama de PROFINET NRT

Fuente: PROFINET University

- Real time (Tiempo Real): empleado para llevar a cabo tareas como control de movimiento debido a que no pueden ser ejecutadas a través de TCP/IP por un elevado valor de latencia y jitter.

Realizando una comparación con NRT, el canal en tiempo real posee menores tiempos de latencia y jitter. Sin embargo, la ausencia de direcciones IP imposibilita el acceso a los dispositivos a través del rúter o Internet. Además, emplea solo la capa física, capa de enlace, capa de presentación y capa de aplicación del modelo OSI con el objetivo de alcanzar la mayor velocidad de procesamiento posible.

Al igual que en el canal en tiempo no real (NRT), la longitud máxima de los telegramas enviados es 1.518 bytes, distribuidos de la siguiente manera:

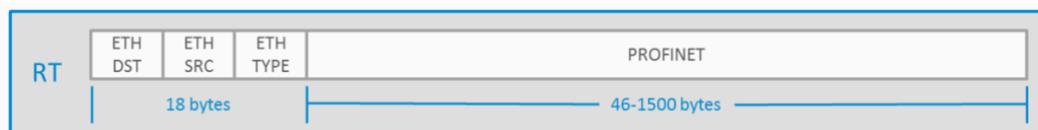


Figura 33. Trama de PROFINET RT

Fuente: PROFINET University

- Isochronous Real Time (Tiempo Real Isócrono): otorgan un alto grado de sincronización debido a tiempos de jitter del orden de sub - microsegundos, lo

que posibilita su empleo en aplicaciones de control de movimiento de alta precisión.

La principal diferencia entre RT e IRT es que la transmisión en tiempo real puede sufrir retrasos inesperados como consecuencia de los switches de Ethernet. Sin embargo, IRT actúa como un carril rápido con fluctuaciones y retrasos prácticamente inexistentes.

2.2.5.2.2.3 FIELDBUS HSE

Fieldbus HSE es un protocolo de comunicación industrial basado en Ethernet y desarrollado por Fieldbus Foundation con el objetivo de cubrir aquellas necesidades de una aplicación que el protocolo FieldBus H1 no era capaz de satisfacer.

Los protocolos Fieldbus H1 y Fieldbus HSE, cuyas siglas son High Speed Ethernet, se diferencian en los siguientes aspectos:

- Velocidad de transmisión de datos: El protocolo Fieldbus H1 es capaz de alcanzar velocidades de 31.25 kbit /s mientras que el protocolo Fieldbus HSE es considerablemente más rápido, alcanzando velocidades máximas de 100 Mbit/s.
- Implementación en niveles OSI: El protocolo Fieldbus H1 es empleado en los niveles inferiores del modelo OSI, por lo que generalmente se emplea para comunicación con los dispositivos de campo (sensores, actuadores etc). De manera contraria, el protocolo Fieldbus HSE es empleado en los niveles superiores del modelo OSI y generalmente es utilizado para conectar distintos controladores, servidores de datos o equipos de alta velocidad.

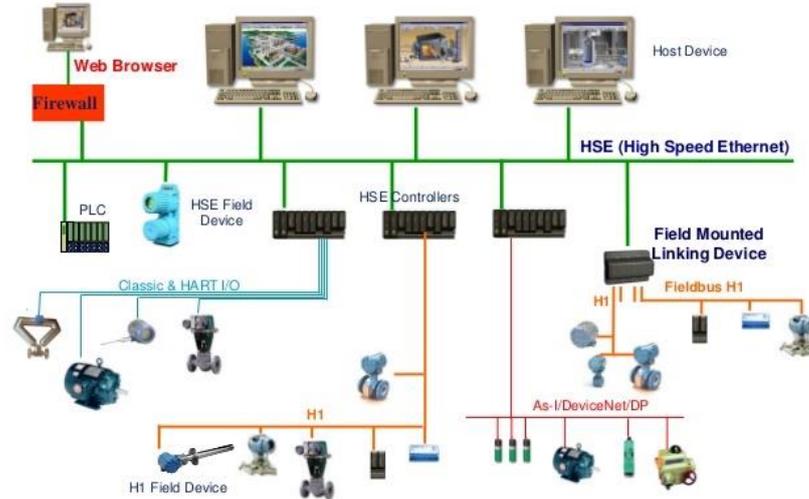


Figura 34. Ejemplo de red FIELDBUS HSE

Fuente: Forum Automation

2.2.5.2.2.4 Sercos III

Sercos III es una interfaz abierta estandarizada que fue desarrollada en 2003 y cuya comunicación síncrona y alta velocidad provocan que ésta sea empleada especialmente en aplicaciones de máquinas de alto rendimiento.

Desde la primera versión desarrollada en 1991 (Sercos I), su principal aspecto diferenciador siempre ha sido la elevada velocidad, alcanzando Sercos III una velocidad máxima de 100 Mbit por segundo.

Se basa en una arquitectura maestro – esclavo circular donde los datos inician y finalizan en el maestro. Éste es el encargado de iniciar la transmisión cíclica de datos entre los nodos, lo que se realiza en tiempos de ciclo estrictos definidos por el usuario y pudiendo variar entre $31.25 \mu\text{s}$ y 65 ms .

Admite hasta 511 dispositivos esclavos en una única red y ofrece redundancia. Además, proporciona un mayor control sobre la red, siendo capaz de detectar caídas de conexión de los esclavos en tiempos de $25 \mu\text{s}$, lo cual es inferior a un tiempo de ciclo.

Otra de sus características es que permite realizar conexiones en caliente (hot plug), de manera que se pueden insertar dispositivos esclavos mientras la comunicación se encuentra activa.

2.2.5.2.2.5 OPC UA

OPC, cuyas siglas indican OLE for Process Control, es un estándar de comunicación empleado en el ámbito de control y supervisión industrial. Se basa en el protocolo OLE (Object Linking and Embedding) desarrollado por Microsoft en 1990, el cual permite realizar la transferencia de datos entre aplicaciones y manejar documentos compuestos

Este protocolo sigue una arquitectura cliente – servidor, en la que diferentes clientes pueden acceder a la información de los servidores, permitiendo tanto lectura como escritura de sus variables. Permite a los clientes conectar a varios servidores con independencia de su fabricante, lo que flexibiliza la comunicación ya que no se requieren drivers específicos.

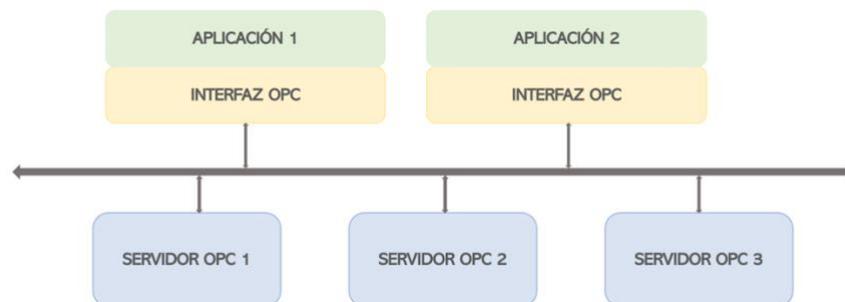


Figura 35. Estructura de red OPC UA

Fuente: Elaboración Propia

Debido a la elevada flexibilidad que ofrece, actualmente la mayoría de las fabricantes de equipos de instrumentación y sistemas de control han implementado el protocolo OPC en sus productos. Por ejemplo, los sistemas de control y supervisión SCADA

(Supervisory Control and Data Acquisition) han implementado protocolos OPC de manera que permita la comunicación con los diversos dispositivos de campo.

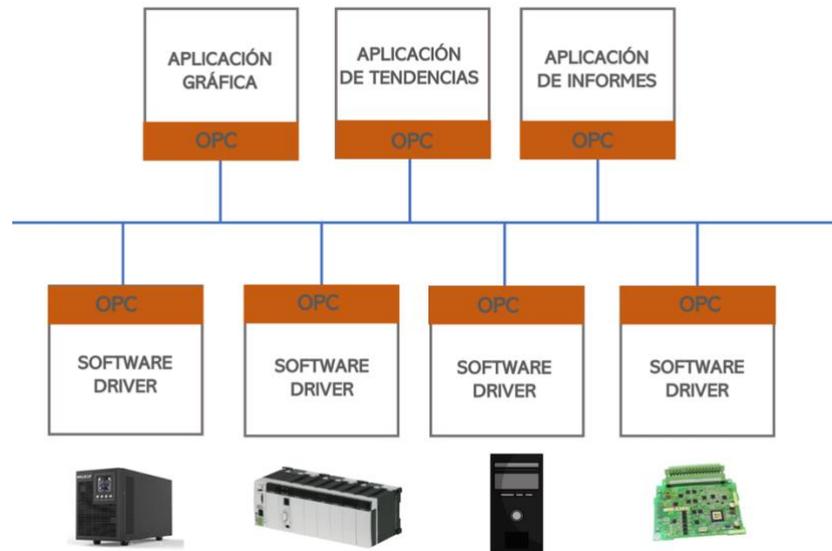


Figura 36. Flexibilidad de protocolo OPC UA

Fuente: Elaboración Propia

Desde su desarrollo en 1990, se han lanzado diferentes versiones del protocolo, como pueden ser OPC DA (Servidor de acceso a datos), OPC HDA (Servidor de acceso a datos históricos) u OPC AE (Servidor de alarmas y eventos). Sin embargo, la más empleada actualmente es OPC UA.

OPC UA (OPC Unified Architecture) es una versión del protocolo OPC que se caracteriza por presentar una arquitectura unificada, de manera que integra todas las funcionalidades del resto de versiones (acceso a datos actuales o históricos, gestión de eventos etc) además de incorporar la comunicación .NET en sustitución a la comunicación .DCOM (Modelo de Objetos de Componentes Distribuidos). Algunas de sus características son:

- El transporte de mensajes se realiza a partir de los protocolos HTTP, HTTPS y SOAP. Dichos mensajes son codificados con TCP.

- Permite transmitir datos en el interior de las máquinas implicadas, entre diversas máquinas o bien, de una máquina a otro sistema.
- Soporta lenguajes como ANSI C o Java debido a la compatibilidad con diferentes sistemas operativos.
- Los problemas de compatibilidad entre el firewall y el protocolo OPC tradicional son eliminados.
- Posibilidad de multihilo, lo que permite realizar la lectura y/o escritura de datos simultáneamente en diferentes dispositivos.

2.2.5.2.2.6 EtherCAT

EtherCAT es una tecnología basada en la red de comunicación Ethernet desarrollada en 2003 por la compañía EtherCAT Technology Group. Sus principales ventajas como elevado rendimiento, bajo coste y flexibilidad de topología han provocado que éste se convierta en un estándar de comunicación desde el año 2007.

El principio que ha permitido que se convierta en la tecnología basada en Ethernet más rápida en la actualidad es el denominado procesamiento al vuelo. De esta manera, cada nodo realiza una lectura de los datos de la trama mandada y escribe los datos de vuelta, siempre mientras la trama esté siendo entregada.

Esto permite alcanzar un mayor aprovechamiento del ancho de banda, ya que para establecer la comunicación basta con una sola trama por ciclo del programa. Esto además elimina la necesidad de emplear switches o hubs, ambos empleados para el envío de tramas a los dispositivos conectados a la red.

Con respecto a la topología, EtherCAT soporta hasta 65.535 dispositivos sin mostrar restricciones y permitiendo cualquier tipo de combinación entre topologías como lineal, árbol o anillo, por ejemplo. Gracias a la detección automática de dispositivos y equipos, permite la conexión y desconexión de nodos y segmentos de red mientras esté en funcionamiento (hot-plug), lo que implica la posibilidad de modificar los

componentes implicados sin necesidad de apagar el equipo al cual se encuentren conectados.

La comunicación puede establecerse para distintas arquitecturas, ya sean centralizadas o descentralizadas, soportando la comunicación entre maestros, entre esclavos y maestro -esclavo. A diferencia de un bus de campo tradicional, EtherCAT puede ser configurado para realizar la asignación de direcciones automáticamente, lo que elimina la necesidad de ajuste manual de las mismas. En consecuencia, no existe necesidad de realizar ajustes de red, establecer la configuración de los switches o el manejo de direcciones MAC (Media Access Address) o IP (Internet Protocol). Con respecto al ruido, la baja carga del bus y la capacidad de transmisión directa permiten mejorar e incrementar la inmunidad al ruido, lo que facilita la detección de errores y reduce el tiempo de detección.

Otra de sus principales ventajas es su bajo coste debido a que no requiere ninguna infraestructura activa de componentes, así como tarjetas especiales, tan solo un puerto Ethernet por parte del maestro. Además, se trata de una tecnología estandarizada internacionalmente, lo que dota de compatibilidad y versatilidad a la tecnología EtherCAT.

EtherCAT es una tecnología Ethernet que opera con tramas estándar y cuya capa física se encuentra definida en el Ethernet Standard IEE 802.3. Dicha tecnología cubre las necesidades y demandas en la industria de la automatización actual:

- Complejidad de los requerimientos en tiempo real con tiempos de respuesta deterministas.
- Presencia de abundancia de nodos en el sistema.

La tecnología EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) es capaz de resolver estas dificultades debido a su elevado rendimiento debido a que una sola

trama de datos es suficiente para mandar y recibir los datos de control de todos los nodos integrados en el sistema.

Su funcionamiento se basa en: el maestro envía un mensaje que recorre cada uno de los nodos. Cada dispositivo de campo realiza una lectura de los datos del mensaje que le corresponden al vuelo y posteriormente, inserta los datos adquiridos mientras se encuentra en funcionamiento. Finalmente, el último nodo en el segmento detecta un puerto abierto y envía el mensaje de vuelta al maestro empleando la tecnología full dúplex (en la cual se pueden transmitir los datos en ambas direcciones de manera simultánea).

La unidad de control emplea una red de transferencia de datos (MAC), lo que permite que el maestro sea implementado en cualquier plataforma hardware que contenga un puerto ethernet, independientemente del sistema operativo o el software utilizado. Los dispositivos de campo emplean ESC (Ethernet Slave Controller) para procesar tramas al vuelo.

El maestro EtherCAT es el único nodo dentro de un segmento al que se le permite mandar una trama activamente, siendo el resto de los nodos esclavos los encargados de reenviar la trama en sentido descendente. Este concepto permite evitar retrasos impredecibles y garantiza el determinismo. En consecuencia, el proceso solo se ve afectado por la propagación de retrasos en cuanto al hardware, alcanzando una tasa de efectividad de transmisión de datos superior al 90% y superior a 100Mb/s.

Protocolo EtherCAT

La estructura de la trama enviada por el maestro EtherCAT se basa en el estándar IEE 802.3 y tiene la siguiente forma:

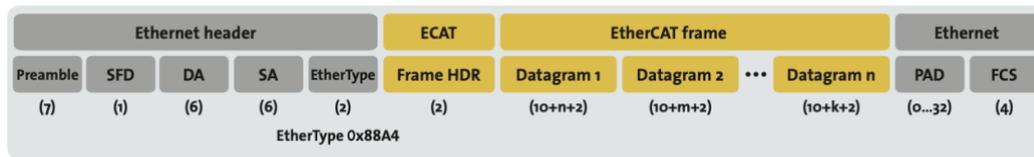


Figura 37. Formato de trama EtherCAT

Fuente: EtherCAT Technology Group

La trama se encuentra identificada por un identificador (EtherType field).

Por su parte, la trama EtherCAT se compone de:

- Cabecera EtherCAT: Define la acción a ejecutar por el maestro, ya sea lectura y/o escritura, acceso a un dispositivo de campo a partir de un direccionamiento directo o bien acceso a múltiples dispositivos de campo a partir de direccionamiento implícito.

El direccionamiento lógico se basa en lo siguiente:

Si múltiples nodos se direccionan en el mismo área, basta con un único datagrama, de manera que debido a que los datagramas contienen toda la información relativa al acceso de datos, el maestro puede decidir que dato acceder y el instante de acceso.

Los nodos solo deberán completar una trama EtherCAT con los datos de salida y enviarlo por DMA al controlador MAC. Cuando el controlador recibe los nuevos datos, la unidad de control puede copiar la trama de nuevo a la memoria del computador. Adicionalmente al direccionamiento lógico, la unidad de control puede direccionar también un dispositivo de campo según su posición en la red.

Después de comprobar la correcta configuración de la red, el maestro puede asignar a cada nodo una dirección fija y comunicarse a través de ella.

Para garantizar la comunicación entre nodos, las conexiones TCP/IP se puede canalizar a través de un canal de correo sin influir en cuanto a la transferencia de datos en tiempo real.

Durante el arranque, la unidad de control configura y mapea los datos de proceso en los dispositivos conectados. Se puede realizar la transmisión de datos de diferente volumen con cada nodo, mostrando un amplio rango entre 1 bit y varios kbytes.

Topología

EtherCAT soporta prácticamente todas las topologías (árbol, lineal, estrella o la denotada como daisy-chain). Es capaz de soportar una topología con cientos de nodos sin verse afectado por las limitaciones que normalmente acarrear el posicionamiento de switches/hubs en cascada.

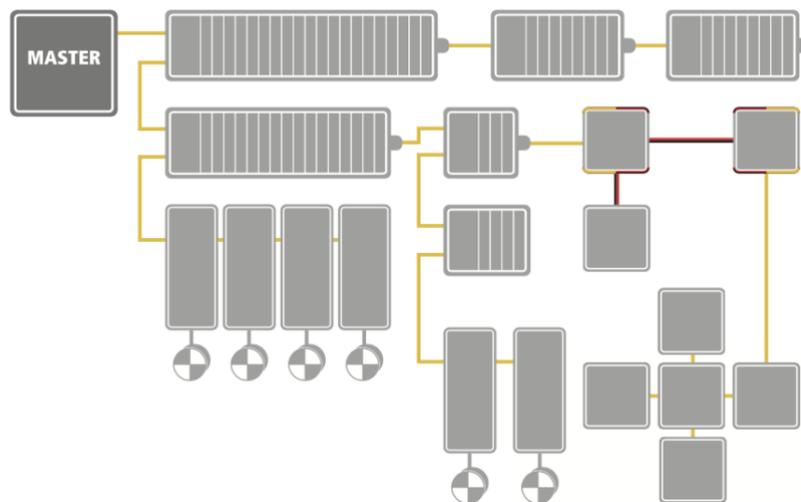


Figura 38. Topología de EtherCAT

Fuente: Fuente: EtherCAT Technology Group

Además, ofrece una amplia flexibilidad en cuanto al tipo de cable, de manera que cada segmento puede emplear el cable que más se adecue a sus necesidades. Permite conectar hasta 65.535 dispositivos, lo cual es considerado prácticamente ilimitado.

Relojes distribuidos para sincronización

En comparación con las comunicaciones íntegramente síncronas (las cuales sufren de errores de comunicación), los relojes distribuidos permiten alcanzar un alto grado

de tolerancia respecto a las vibraciones en el sistema de comunicaciones. De esta manera, EtherCAT emplea relojes distribuidos para la sincronización de los nodos.

La calibración de los relojes en los nodos se basa completamente en hardware, de manera que el tiempo del reloj distribuido del primer esclavo es distribuido cíclicamente al resto de dispositivos en el sistema. De esta manera, los relojes de los dispositivos de campo se ajustan al reloj de referencia nombrado previamente. Esto supone vibraciones en el sistema inferiores a 1 microsegundo.

Debido al tiempo de transmisión del tiempo del reloj de referencia (corresponde al denotado con la letra M) al resto de dispositivos de campo, el sistema puede sufrir cierto retraso, por lo que es importante medir y compensar dicha propagación de errores para cada dispositivo con el objetivo de alcanzar una correcta sincronización entre los mismos.

De manera que, si todos los nodos tienen la misma configuración y tiempo que el reloj de referencia, pueden ajustar sus señales de salida simultáneamente y fijar sus señales de entrada con una marca de tiempo de alta precisión.

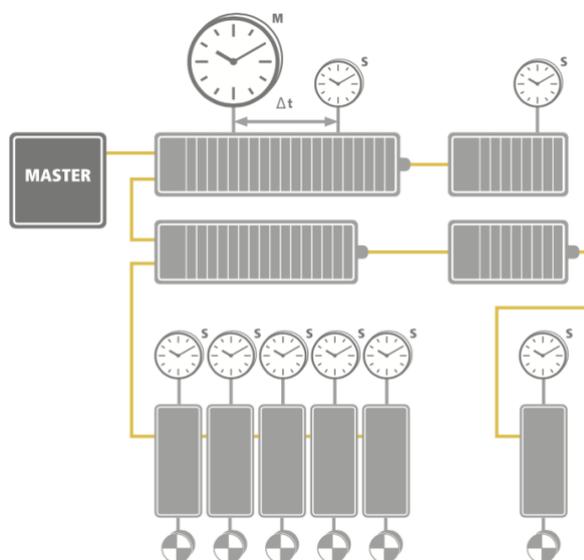


Figura 39. Relojes distribuidos EtherCAT

Fuente: Fuente: EtherCAT Technology Group

Una de las principales ventajas del empleo de relojes distribuidos es el desahogo de la unidad de control debido a que ciertas acciones como la toma de posición se realizan con el disparo del reloj local en vez de cuando se recibe la trama.

Localización de errores

EtherCAT cuenta con numerosas funciones de diagnóstico inherentes a su sistema con el objetivo de facilitar la detección de errores.

En primer lugar, EtherCAT ofrece la posibilidad de comparar la topología actual de la red con la topología planeada durante el boot-up.

En segundo lugar, el controlador EtherCAT de esclavos (EtherCAT Slave Controller) comprueba y verifica si la trama contiene errores. De manera que, si existe un error, el contador de errores se incrementa, lo que permite que el resto de los nodos conozcan la presencia del error en la trama. La principal utilidad del contador de errores reside en proporcionar a la unidad de control un método de detección de fallos rápido y eficaz, de manera que pueda comprobar el punto en el que se ha generado el fallo. Si el contador de fallos posee un valor que difiere del valor esperado, el maestro no enviará el datagrama a la aplicación de control. Además, es capaz de detectar el motivo de comportamiento inadecuado del sistema con ayuda de la información de error y estado de los nodos. Esto permite, además, evitar la propagación de errores en toda la línea, en caso contrario sería imposible detectar el origen del error.

EtherCAT P

Tecnología que permite la transmisión de datos y la alimentación a través de un solo cable. Presenta las mismas características en términos de protocolo y funcionamiento que EtherCAT ya que solo afecta a la capa física.

Dos fuentes de 24 V aisladas eléctricamente alimentan los dispositivos EtherCAT P, correspondiendo una de ellas al sistema y los sensores y la restante a los actuadores y equipos periféricos. Ambas fuentes son acopladas en la línea de comunicación EtherCAT.

Las principales ventajas de esta tecnología son:

- Cableado reducido y mayor robustez.
- Reducción de costes en cuanto a cableado.
- Menor huella en cuanto a dispositivos, equipos y máquinas.

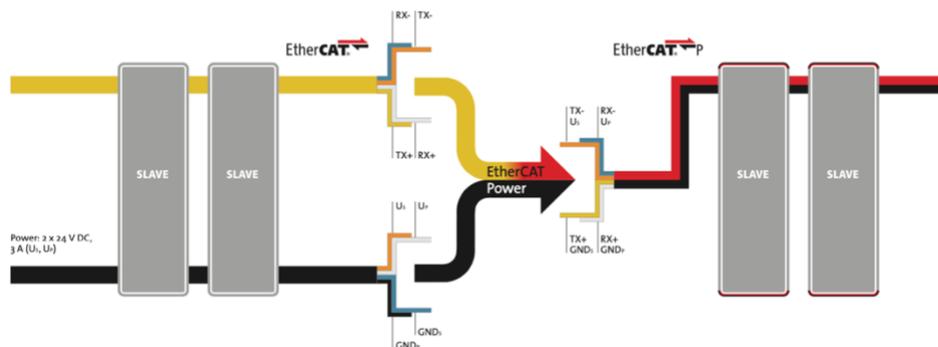


Figura 40. Diferenciación entre EtherCAT y EtherCAT P

Fuente: Fuente: EtherCAT Technology Group

Perfiles de comunicación

Con el objetivo de soportar una amplia variedad de dispositivos y capas de aplicación, los siguientes perfiles de comunicación son compatibles:

- CAN Application over EtherCAT (CoE)
- Servo drives (SoE)
- Ethernet over EtherCAT (EoE)
- File Access over EtherCAT (FoE)
- ADS over EtherCAT (AoE)

El dispositivo maestro es notificado acerca de qué perfiles de comunicación han sido implementados a partir de la descripción de dispositivos del esclavo.

EtherCAT Automation Protocol (EAP)

En ocasiones, máquinas o secciones de una máquina necesitan intercambiar información sobre su estado o sobre las acciones intermedias entre ellas. Adicionalmente, existe un controlador central que monitoriza el proceso completo, proporcionando al usuario información en cuanto a productividad y asignando órdenes a las diferentes estaciones de trabajo o secciones.

Este protocolo define los interfaces y servicios mostrados a continuación:

- Intercambio de datos entre maestros EtherCAT.
- Interfaz de comunicación con personas (Human Machine Interfaces HMI).
- Routing para el acceso a dispositivos que se encuentran por debajo de los segmentos EtherCAT.

Los protocolos de comunicación empleados en EAP forman parte del estándar IEC 61158 y pueden ser transmitidos a partir de Ethernet.

El intercambio de datos cíclicos con EAP se basa en el principio de empuje o de sondeo. En el principio de empuje, cada nodo envía sus datos (ya sea con su propio tiempo de ciclo o un múltiplo de éste) y cada receptor se configura para recibir datos de remitentes específicos. Sin embargo, en el principio de sondeo, un nodo envía una trama al resto de nodos y cada uno le responde con su propio marco.

Integración de otros buses

El amplio ancho de banda de EtherCAT permite embeber buses de campo convencionales como un sistema subyacente a través de una puerta de enlace de

EtherCAT, lo cual resulta muy útil en migraciones desde buses de campo convencional a EtherCAT. Solo es necesario un puerto Ethernet.

La transformación digital se encuentra estrechamente relacionada con la necesidad de comunicación fluida, continua y estandarizada en procesos automatizados. En definitiva, EtherCAT es capaz de cumplir con los requisitos de la transformación digital gracias a su alto rendimiento, flexibilidad e interfaces abiertos. Éstos permiten integrar cualquier protocolo como OPC/ UA o MQTT ya sea dentro del maestro o en el resto de los dispositivos. Además, brinda la posibilidad de dotar de conectividad en la nube sin necesidad de modificar el controlador o los dispositivos de campo.

2.2.6 Sistemas de monitorización y control

2.2.6.1 Introducción

La automatización de los procesos conlleva la implementación de sistemas de monitorización y control, los que permiten la centralización de todos los procesos de una planta o un nodo en una misma interfaz, desde la cual se puede acceder a los datos en tiempo real, proporcionando un control continuo de su funcionamiento.

Esto permite la generación de informes en tiempo real y su almacenamiento en un servidor, el cual es accesible por los operarios u otros sistemas. En consecuencia, se logra incrementar la seguridad de los procesos gracias a una mayor prevención de riesgos y detección de ciberataques, lo que además permite reducir los costes tanto económicos como técnicos.

Los sistemas de control industrial (ICS – Industrial Control Systems) hacen referencia al conjunto de sistemas e instrumentos de control de procesos industriales, como puede ser un controlador discreto, un controlador lógico programable (PLC), un SCADA o sistemas de control distribuido (DCS), entre otros. Todos estos sistemas se encargan de monitorizar el estado de los procesos, de manera que obtienen información sobre las variables del proceso, realizan una comparación entre el valor

actual y el valor deseado y finalmente, ejecutan los comandos pertinentes logrando el comportamiento deseado.

2.2.6.2 Clasificación

2.2.6.2.1 Controlador discreto

Los controladores discretos son elementos de control empleados en sistemas simples debido a que solo permiten un bucle de control por controlador. De esta manera, para sistemas más complejos donde son necesarios múltiples bucles de control, resulta más adecuado emplear otro tipo de controladores como PLCs.

Presentan tanto un panel frontal como controles manuales básicos con el objetivo de que el operario pueda visualizar la información en tiempo real y controlar manualmente el proceso.



Figura 41. Ejemplo de controlador discreto

Fuente: OMRON

2.2.6.2.2 Controlador Lógico Programable

Un controlador lógico programable (PLC) es una computadora desarrollada a finales de la década de 1960 con el objetivo de controlar y monitorizar ciertos parámetros en un proceso industrial. Se compone de un sistema operativo y un entorno de

programación que acepta diversos lenguajes como lenguaje de contactos (ladder), diagrama de bloques o texto estructurado.

Estos permiten controlar sistemas a partir de la recepción de información por parte de los sensores (conectados a las entradas del PLC) y transmitir las órdenes de control a las diferentes máquinas y equipos para alcanzar el comportamiento deseado (conectadas a las salidas del PLC).



Figura 42. Ejemplo de PLC

Fuente: Beckhoff Automation

Algunas de las ventajas que ofrecen son una reducción de costes y del tamaño requerido para su instalación, así como la posibilidad de controlar diversas máquinas a la vez. Además, presenta una mayor resistencia frente a vibraciones, lo que provoca que se trate de un controlador robusto y eficaz.

2.2.6.2.3 SCADA

Un SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) es un sistema informático que permite controlar, supervisar, recopilar y transmitir datos de un proceso en tiempo real, lo que proporciona una monitorización continua del proceso.

Existen distintos tipos de sistemas SCADA, los cuales se pueden clasificar según su distribución geográfica o según su arquitectura. Según su distribución geográfica se diferencian entre sistemas centralizados, sistemas distribuidos y sistemas híbridos (como una combinación de los restantes). Según su arquitectura se diferencian entre

sistemas Standalone (no requieren software de control) y sistemas Servidor – Cliente (procesamiento de datos por parte del servidor).

La principal ventaja que ofrece es la posibilidad de controlar de manera precisa un sistema, eliminando por completo el error humano y generando una respuesta anticipada y óptima ante las diversas situaciones a las cuales puede verse sometido el sistema.

Con respecto a su estructura, se compone de diversas aplicaciones informáticas instaladas en un computador denominado MTU (Master Terminal Unit), encargado de controlar automáticamente el sistema gracias a la interacción con el resto de los equipos implicados:

- Sensores: encargados de recopilar información sobre el estado de las variables a controlar en el sistema.
- Actuadores: encargados de realizar las acciones sobre el sistema a controlar.
- PLCs: empleados para llevar a cabo el control de los dispositivos de campo y la ejecución de los comandos que modifiquen el estado de las salidas (actuadores).
- Unidades Terminales Remotas (RTUs): encargados de la gestión de los equipos físicos y de establecer la comunicación con niveles superiores.
- Redes de comunicación: arquitectura física o virtual a través del cual se produce la comunicación entre la Unidad Terminal Maestra (MTU) y el resto de los equipos (PLCs y RTUs).
- HMI: interfaz entre el operario y el sistema de control, el cual permite mostrar la información del proceso en tiempo real.

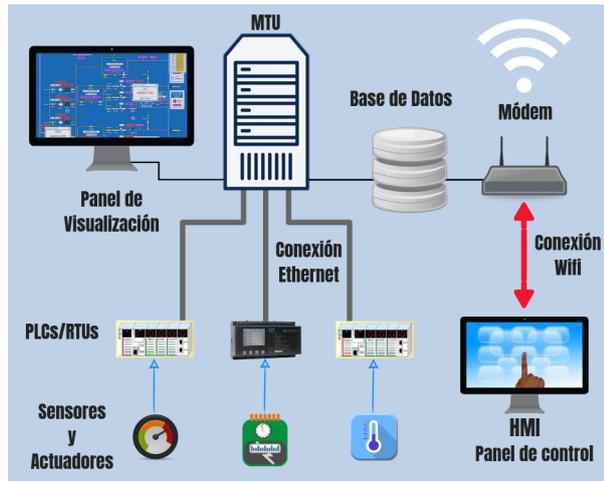


Figura 43. Ejemplo de SCADA

Fuente: SR Técnicos

Los SCADA son los sistemas de supervisión y control más empleados en la actualidad debido a la capacidad de supervisión de datos en tiempo real a partir de una interfaz gráfica muy intuitiva. Además, admite compatibilidad con distintos PLCs o controladores PID de distintos fabricantes siempre y cuando la comunicación se realice a partir de protocolos estándar.

2.2.6.2.4 Sistemas de Control Distribuido

Los sistemas de control distribuido (DCS – Distributed Control Systems) se caracterizan por la distribución de las funciones del controlador y los módulos a lo largo de todo el sistema. Es un sistema de control muy útil en la gestión de grandes procesos industriales, ya que, gracias a la red de comunicación entre los controladores se pueden monitorizar los parámetros localmente de una planta.

Algunas de sus ventajas son la gestión de alarmas y el registro de eventos de manera automática, lo que elimina los registros físicos y gráficos, reduciendo en consecuencia el cableado.

Con respecto a su estructura y funcionamiento, los periféricos se componen de los módulos de entrada y salida. Los procesadores reciben información de los módulos de entrada (obtenidos a partir de los elementos de detección a nivel de campo), la procesan y determinan las acciones de los módulos de salida.

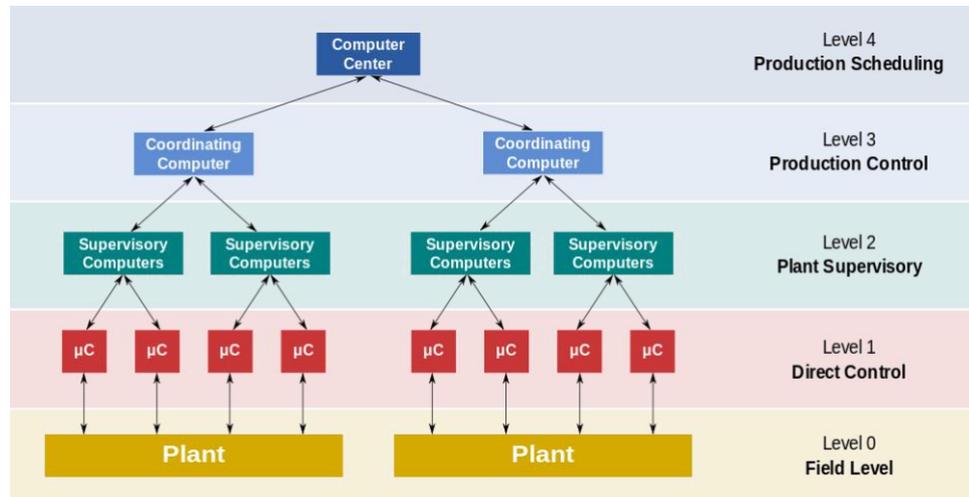


Figura 44. Ejemplo Sistema de Control Distribuido

Fuente: Wikipedia

2.2.6.2.5 MES / ERP

Los sistemas MES (Manufacturing Execution System) y ERP (Enterprise Resource Planning) son herramientas de gestión y análisis de datos empleados en los niveles más elevados de la pirámide CIM.

Un sistema MES es un software dinámico e integral que permite observar tanto de manera gráfica como analítica todos los datos de un proceso productivo, desde la obtención de las materias primas, pasando por su transformación en productos intermedios y finalmente, la obtención del producto final.

Un sistema ERP es una herramienta enfocada a la gestión y el control de una empresa, por lo que integra información relativa a los diferentes departamentos. De esta manera permite obtener una perspectiva integral del negocio, lo que facilita la toma de decisiones y la optimización de las operaciones.

Generalmente, estos sistemas deben estar conectados a Internet con el objetivo de contar con un registro actualizado de datos, lo que incrementa considerablemente su vulnerabilidad en cuanto a ciberataques.

2.3 Software TwinCAT 3

2.3.1 Introducción

TwinCAT es un software de control industrial desarrollado en 1996 con el objetivo transformar cualquier sistema basado en un PC en un sistema de control en tiempo real con múltiples controladores (PLCs). Su nombre procede del término The Windows Control and Automation Technology.

Su configuración modular ofrece la posibilidad de realizar modificaciones sobre el proyecto en cualquier momento, incrementando la flexibilidad y provocando un nivel de rendimiento acorde a la tecnología EtherCAT.

Existe una clara distinción en cuanto a las secciones disponibles:

- XAE (eXtended Automation Engineering – Ingeniería de Automatización Extendida): plataforma de desarrollo que permite programar y configurar el hardware. Además de los lenguajes de programación incluidos en el IEC 61131-3, ofrece la posibilidad de programar en C, C++, así como herramientas como Matlab y Simulink.

Además, integra funciones de diagnóstico y control de hardware, funciones de depuración y herramientas adicionales como osciloscopio a nivel de software.

- XAR (eXtended Automation Runtime): runtime en el que se ejecuta el código del programa que permite controlar la máquina y/o instalación. Dos de sus principales ventajas son, en primer lugar, la posibilidad de incluir módulos adicionales que incluyan funciones específicas y, en segundo lugar, la ejecución de tareas independientes de la ejecución del sistema operativo, lo que incrementa el rendimiento de la herramienta.

Como se ha comentado previamente, una de las principales ventajas de TwinCAT con respecto a otros sistemas es la posibilidad de construir un sistema de control con adaptabilidad a los requisitos de cada proyecto. Esto se debe a la presencia de más de 100 funciones distintas, como la descrita a continuación.

TwinCAT 3 System: Incluye la gestión de licencias, la asignación de tareas y gestión de los núcleos de la unidad central de procesamiento (CPU) así como funcionalidades adicionales como la redundancia (TF1100) o el runtime para Matlab o Simulink (TF1400).



Figura 45. Programación TwinCAT 3

Fuente: Beckhoff Automation

2.3.2 Secciones

TwinCAT 3 Controller: proporciona funciones de control de temperatura, así como controladores básicos (P, I, D) y controladores avanzados (PI y PID) que permiten ajustar los parámetros motrices del sistema. Además, ofrece controladores por ancho de pulso (PWM – Pulse Width Modulation), generadores de señales y filtros.

TwinCAT 3 Motion Control: incluye todos aquellos paquetes relacionados con el control y la configuración de motores y servo-motores, desde aplicaciones básicas

PTP (Punto a Punto) a aplicaciones complejas CNC (Control Numérico Computarizado).

Contiene diversos paquetes diferenciados según el número de ejes a controlar (con un máximo de 255 ejes para TF5020) o las acciones que posibilitan (acoplamiento entre ejes de manera estática, acoplamiento al vuelo, transformaciones cinemáticas, interpolación etc)

TwinCAT 3 HMI: se trata de un entorno de desarrollo que ofrece un editor gráfico completamente integrado en TwinCAT. Posibilita el desarrollo de interfaces de usuario a través de las cuales no solo se visualiza la evolución del proceso en tiempo real, sino que también permite la interacción con el sistema en caso de que se disponga de paneles de control.

Una de las principales ventajas es la posibilidad de generar un diseño adaptativo (también conocido como “responsively”), de manera que la interfaz gráfica se adapte automáticamente a la orientación, tamaño y resolución de la pantalla donde vaya a ser visualizado. Esto se logra a partir del ajuste del tamaño de los componentes de manera proporcional a la dimensión de la pantalla del entorno de desarrollo.

Los diferentes paquetes se pueden clasificar según el número de clientes requeridos, el método de comunicación con los targets y el número de éstos. Se debe tener en cuenta que será necesario incluir tantos paquetes como exija la aplicación desarrollada.

TwinCAT 3 Measurement: se trata de un software de medición que incluye funciones de supervisión de procesos y máquinas, registro de documentación, análisis de datos y representación gráfica de los mismos tanto de manera histórica como en tiempo real.

Además, contiene funciones que posibilitan la aplicación de métodos de correlación complejos (TF3510), monitorización de energía y cálculo de valores de tensión, corriente y potencia eficaz (TF3650) e implementación de filtros digitales (TF3680), entre otros.

TwinCAT 3 Connectivity: posibilita la comunicación e interacción con otros sistemas a partir de protocolos diferentes de EtherCAT industrial.

Algunos de los protocolos que son admisibles a través de la implementación de paquetes incluidos en esta sección son: JSON (TF6020), OPC UA (TF6105), Modbus RTU (TF6255), PROFINET RT (TF6270), Ethernet IP (TF6280) o Modbus TCP (TF6250).

Algunas de las ventajas que ofrece TwinCAT con respecto al resto de software de automatización actuales son las siguientes:

- Menor esfuerzo de ingeniería. Esto se debe a que todos los componentes que integra TwinCAT 3, desde la programación del PLC hasta la visualización y análisis de datos, se encuentran incluidos dentro de Microsoft Visual Studio. En consecuencia, se requiere un menor tiempo de familiarización con el software.
- Posibilidad de trabajo en equipo a través de sistemas de gestión de código fuente como Git o BitBucket. Estos permiten la implementación y visualización de cambios tanto de manera individual como colectiva, favoreciendo el trabajo en equipo y la puesta en común de conocimientos.
- Amplia variedad de interfaces y compatibilidad con múltiples protocolos de comunicación a nivel de campo. En consecuencia, se alcanza un mayor grado de centralización de la información, permitiendo la comunicación entre diversos protocolos y siendo capaz de almacenarlos en la nube.
- Fácil mantenimiento y reutilización de los componentes del software como consecuencia de su arquitectura modular, lo que facilita la implementación de cambios e incrementa la flexibilidad del proceso de programación.
- Posibilidad de programación orientada a objetos y variedad de lenguajes de programación que se encuentren incluidos en el estándar IEC 61131 - 3.

2.4 eXtended Transport System

El sistema de transporte lineal XTS (eXtended Transport System) fue desarrollado por la compañía Beckhoff Automation.

Se trata de una nueva tecnología basada en un sistema de transporte de configuración modular sin cables (NTC – No Cable Technology) que combina ventajas de sistemas lineales y rotatorios, incrementando significativamente la flexibilidad de la instalación. Su funcionamiento se basa en el movimiento de los denominados “movers” a partir de la generación de fuerzas electromagnéticas resultantes de la circulación de corriente a través de las bobinas en presencia de placas magnéticas.

Para poder llevar a cabo la aplicación propuesta, se debe analizar cada uno de los componentes que integran el XTS y su funcionalidad.

2.4.1 Módulos de motor (Motor Modules)

Se trata de módulos con electrónica de potencia y registro de posición de manera completamente integrada, constituyendo una unidad única junto a los movers.

Los módulos de motor se componen de bobinas electromagnéticas y todas las funcionalidades activas que permiten el funcionamiento del sistema. El suministro de corriente eléctrica sobre las bobinas provoca la generación de fuerzas magnéticas acorde a la Ley de Faraday. La acción de los imanes de los movers sobre las fuerzas magnéticas provoca una variación del flujo magnético, posibilitando así el movimiento de los movers sobre el carril.

Los módulos se pueden clasificar según diferentes criterios como alimentación, longitud o curvatura.

Según el método de alimentación, se diferencian entre módulos con alimentación directa e indirecta. Los módulos con alimentación directa (también denominados módulos in-feed) son aquellos que poseen una toma directa para posibilitar la conexión de los cables de potencia y comunicación. La conexión de dichos cables

puede realizarse de manera convencional a través de dos cables (uno de potencia y otro de comunicación a través de EtherCAT) o bien, a través de EtherCAT P. Esta última es una tecnología que permite comunicar y alimentar a través de un único cable Ethernet estándar de cuatro hilos.

Los módulos con alimentación indirecta no poseen una conexión directa con los cables de potencia y comunicación, sino que ésta se transmite a través de tarjetas posicionadas entre módulos con alimentación y sin alimentación directa.

Este aspecto resulta de elevada importancia en cuanto al diseño de la estructura del XTS ya que la potencia entregada por el módulo in-feed debe ser suficiente para garantizar el movimiento de los movers. Según las especificaciones técnicas y acorde a un funcionamiento estándar, se estima una longitud máxima de tres metros por cada módulo in-feed. Sin embargo, este parámetro es variable según aspectos como número de movers, aceleración y velocidad de los mismos, carga etc.

Las especificaciones técnicas que se deben tener en cuenta para comprender en totalidad el funcionamiento del XTS son:

- Potencia de alimentación 24/ 48V, relativa a la detección de posición de los movers y la potencia de excitación de las bobinas presentes en los módulos. Se debe tener en cuenta que dicho valor puede presentar variaciones en un rango $\pm 15\%$, lo cual afectará al rendimiento del sistema de transporte.
- Consumo de corriente nominal de 16 A, pudiendo alcanzar un valor de corriente pico de 48 A en un corto plazo.
- Máxima longitud de 3 metros por módulo de potencia.
- Consumo de potencia variable según la velocidad por mover. Si estos se mueven a una velocidad constante de 2 m/s, poseen un consumo de 30 W. De manera proporcional, si alcanzan la velocidad máxima de 4 m/s, el consumo incrementa a 60 W.
- Fuerza nominal de 30 N.
- Fuerza máxima de detención de 100 N.

- Repetibilidad unidireccional inferior a $\pm 0,01$, la cual puede excederse en caso de diferencias significativas de temperatura en los módulos motor.
- Exactitud absoluta inferior a $\pm 0,25$, la cual puede excederse en caso de exceso de temperatura del módulo o ausencia de paralelismo entre el denominado “encoder flag” y el módulo.
- Posibilidad de módulos in-feed de diferentes curvaturas: $\pm 22,5^\circ$ o 45° .

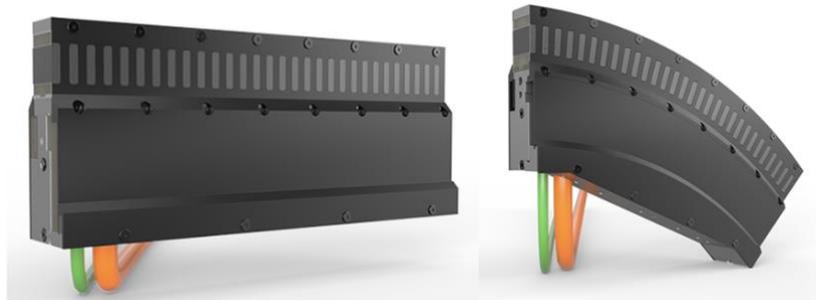


Figura 46. Módulos in-feed

Fuente: Beckhoff Automation

2.4.2 Movers

Los movers son componentes pasivos que, gracias a los campos magnéticos generados por la circulación de corriente eléctrica a través de las bobinas de los módulos, son capaces de moverse linealmente sobre el carril mecánico.

A nivel mecánico, constan de un soporte de aluminio, rodillos o ruedas de plástico y un conjunto de placas magnéticas. Su composición a partir de aluminio otorga a los movers un nivel de rigidez que permite soportar cargas de hasta 1.3 kg. Además, la combinación del soporte de aluminio y los rodillos de plástico ofrece una disminución en los requerimientos de lubricación, siendo especialmente ventajoso en entornos como el ámbito farmacéutico.

El modelo de mover empleado en este proyecto es AT9011 – 0070 - 0550, el cual se caracteriza por:

- Longitud de 70 mm.
- Presencia de 6 rodillos tipo ZX9011 -0070, los cuales posibilitan el deslizamiento de los movers sobre el carril. De estos seis rodillos, cuatro cuentan con tornillos de hombro corto y los dos restantes con tornillos de hombro largo. Además, para garantizar una correcta sujeción de estos se requieren tapones de sellado y tuercas de ajuste.



Figura 47. Rodillos de los movers ZX9011-0070

Fuente: Beckhoff Automation

- Presencia de dos platos magnéticos de 50mm con cinco imanes, lo que supone un total de cinco polos magnéticos. Sin embargo, el número de polos podría variar según los requerimientos de la aplicación desarrollada pues influiría en la intensidad de las fuerzas magnéticas generadas.



Figura 48. Movers modelo AT9011-0070-0550

Fuente: Beckhoff Automation

- La identificación de los movers se realiza a partir de los denominados “encoder flags”. Éstos se posicionan en los extremos de los movers y permiten detectar su posición en todo momento, lo cual facilita el desarrollo del programa de

control e incrementa la precisión del sistema. Para el modelo de mover empleado, el encoder flag posee un grosor de 1.2 mm.

En caso de que se disponga de mover 1, éste debe contar con un encoder flag específico que permita distinguirlo respecto al resto. En la aplicación desarrollada, no se dispone de mover 1 y, en consecuencia, la identificación de los movers se realizará de manera estándar y en orden ascendente, esto es, del mover 1 al mover 8.



Figura 49. Encoder flag

Fuente: Beckhoff Automation

El proceso de detección consiste en la realización de un pequeño movimiento por parte de los movers, moviéndose todos menos uno de ellos en una misma dirección debido a que este primer mover dispone de los imanes invertidos. El mover cuyo movimiento se opone al resto es el identificado como principal y permite identificar consecutivamente el resto de movers.

2.4.3 Carril guía mecánico

Componente pasivo constituido por la agrupación de segmentos rectos o curvos (45° y 180°) sobre el cual se produce el deslizamiento de los movers.

Se compone de aluminio con un revestimiento que proporciona resistencia a la abrasión y se caracteriza por la ligera necesidad de lubricación como consecuencia de la composición plástica de los rodillos que se encuentran en contacto con el carril.



Figura 50. Carril guía mecánico

Fuente: Beckhoff Automation

2.5 Elementos de control y comunicación

El cuadro de control del sistema analizado se compone de una serie de equipos y tarjetas que permiten alcanzar un correcto funcionamiento del XTS, los cuales se exponen a continuación:

CU2508

El equipo CU2508 es un multiplicador de puertos Ethernet en tiempo real desarrollado por Beckhoff Automation que permite la conexión de hasta ocho redes Ethernet independientes, alcanzando una tasa de transferencia de datos máxima de hasta 100 Mbit por segundo.

El CU2508 no se encarga de la generación y el procesamiento de información por sí mismo, sino del reenvío de las tramas recibidas desde el controlador hacia los dispositivos de campo y viceversa.

La comunicación con el PC se realiza a través de un puerto Ethernet (denotado como X9 respectivamente) con una tasa de transferencia de datos de 1 Gbit por segundo, lo cual dota al sistema de un elevado rendimiento. Permite la recepción y envío de tramas Ethernet compatibles con IEEE802.3 a través de un cable de cobre de hasta 100 metros y un conector RJ45, alcanzando una precisión de orden de microsegundos.

Su principal utilidad reside en la disponibilidad de ocho puertos Ethernet en tiempo real, de los cuales los cuatro puertos superiores (X1, X2, X3 y X4 respectivamente) son empleados para la comunicación con el resto de los equipos implicados en el sistema. Los cuatro puertos restantes irán conectados a los diferentes módulos in-feed del XTS.

En caso de disponer de múltiples CU2508, uno de ellos actuará como el maestro y los restantes, como esclavos. Los esclavos se conectarán a través de los puertos superiores y se sincronizarán con los relojes distribuidos del mismo, de manera que la transferencia de datos será síncrona. Es importante tener en cuenta que, para esta configuración, los esclavos EtherCAT (como entradas y salidas, o bien, otro CU2508) deberán colgar de otro puerto del PC separado de aquel empleado para el XTS. Dicha configuración es observable a continuación:



Figura 51. Multiplicador CU2508

Fuente: Beckhoff Automation

En definitiva, se trata de un dispositivo que permite canalizar los telegramas de datos a través de una conexión Gbit y los envía a los dispositivos correspondientes en el momento especificado. Las principales características que definen su comportamiento son:

- Compatibilidad con diversidad de protocolos de comunicación: Ethernet TCP/IP, EtherCAT y PROFINET, entre otros.
- Presencia de ocho puertos con tasa de transferencia de datos de 100 Mbit/s y un puerto adicional con velocidad 1 Gbit/s.
- Interfaz Ethernet a través de conector RJ45.
- Alimentación de 24V DC y 250 mA.
- Temperatura de operación entre 0° y 55°.
- Protección IP20, lo que implica protección frente a sólidos de tamaño superior a 12 mm y ausencia de protección frente a líquidos.
- El sistema puede sufrir cierto retraso en la transmisión de los datos como consecuencia de las diferentes velocidades de transmisión y/o el tiempo de ejecución de las tareas.

Por ejemplo, supongamos que, para una aplicación determinada, se están empleando los puertos X1 y X2 del equipo CU2508. Además, el bit del terminal de salida del puerto X1 se encuentra en un marco temporal de 7 μ s mientras que para el puerto X2 es 118 μ s. Esto provoca un retraso en la salida de la señal del puerto X2 de 111 μ s con respecto a la salida del puerto X1.

CU8801-0000

Se trata de un extender desarrollado por Beckhoff Automation que permite ampliar los límites de longitud del cable USB, el cual, en condiciones estándar, alcanza una longitud máxima de cinco metros.



Figura 52. Extender CU8801-0000

Fuente: Beckhoff Automation

Sus principales características son:

- Capacidad de extensión del cable hasta 50 metros, lo que permite ampliar la distancia entre el puerto USB y la unidad receptora.
- Ausencia de necesidad de fuente de alimentación. Basta con el suministro de 5V DC vía USB.
- Fácil instalación y diseño industrial compacto.
- Cable de red CAT5 estándar para conexión con puerto RJ45.
- Funciones de diagnóstico a través indicadores luminosos para indicar el estado de la alimentación, la conexión entre el transmisor y receptor, la transferencia de datos etc.

Terminales

Adicionalmente a los componentes expuestos, se han incluido los siguientes terminales y/o tarjetas:

EL9576: El terminal EL9576 de Beckhoff consta de condensadores de alto rendimiento con el objetivo de estabilizar la tensión de la fuente de alimentación y proteger al sistema frente a variaciones bruscas de temperatura y la tensión.

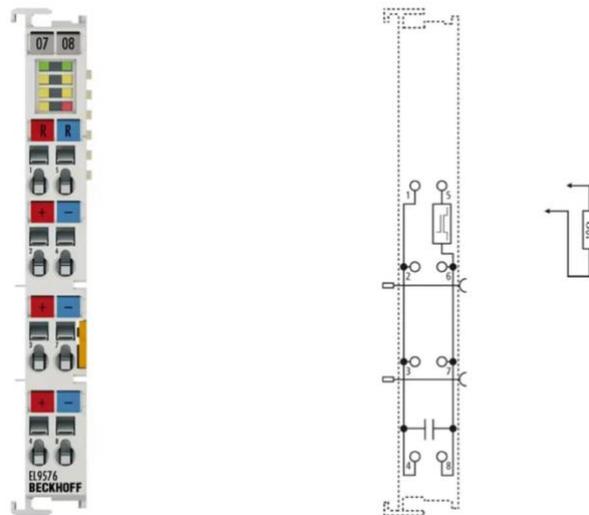


Figura 53. Terminal EL9576

Fuente: Beckhoff Automation

Como se puede observar, dispone de una serie de indicadores luminosos en la parte superior de la tarjeta que indican la ocurrencia de errores genéricos, así como valores de tensión y/o temperatura fuera del rango preestablecido.

En caso de que existan corrientes de retorno, éstas se almacenan para evitar las sobretensiones y si la energía regenerativa supera la capacidad máxima de los condensadores, ésta se disipa a través de una resistencia de frenado externa, evitando así dañar los componentes implicados. Una de las principales ventajas es la posibilidad de parametrizar dicho umbral directamente en TwinCAT System Manager, acorde a los requerimientos de la aplicación desarrollada.

Es importante tener en cuenta que la alimentación de los terminales se realiza a través de los denominados “Power Contacts” posicionados en los extremos laterales de las tarjetas. Adicionalmente, las tarjetas disponen de seis pines, cuatro de ellos relativos a la comunicación y los dos restantes empleados para la alimentación de los dispositivos de campo conectados. Este aspecto es importante en cuanto al diseño de una aplicación, ya que la alimentación suministrada deberá ser suficiente para todas las tarjetas conectadas.

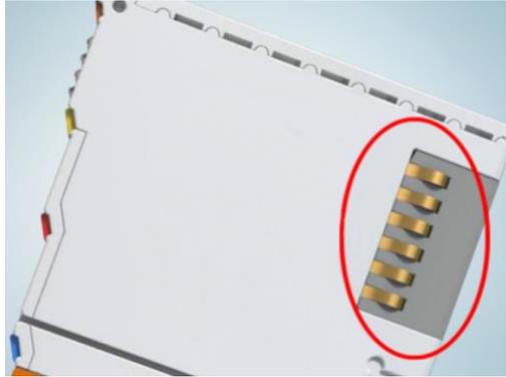


Figura 54. Pines de comunicación y alimentación presentes en los terminales

Fuente: Beckhoff Automation

Su posicionamiento en los laterales de los terminales incrementa la seguridad de los equipos ya que dicha localización impide el contacto humano con los mismos.

Finalmente, algunas de las características más relevantes en cuanto a los terminales EL9576 son las siguientes:

- Capacidad de condensadores de 155 μF y resistencia de frenado de 10 Ω .
- Resistencia interna inferior a 5 m Ω .
- Tensión nominal hasta 72 V.
- Corriente de rizado máxima de 10 A.
- Resistencia frente a vibraciones acorde a EN 60068-2-6 / EN 60068-2-27.
- Protección IP20, lo que ofrece protección frente a solidos de hasta 12mm y ausencia de protección frente a líquidos.

EL5101: El terminal EL5101 constituye una interfaz para la conexión directa con los encoders incrementales que proporcionan la posición de cada uno de los movers en tiempo real. Los encoders pueden contar con señales diferenciales (RS-422) o bien señales TTL (Time To Live) de terminación única.

Permite evaluar frecuencias de entrada de hasta 1 MHz y cuenta con dos entradas digitales adicionales para configurar, almacenar o bloquear el estado del contador.

Además, posibilita la evaluación y medición del período o frecuencia de una señal con una resolución de hasta 100 ns.

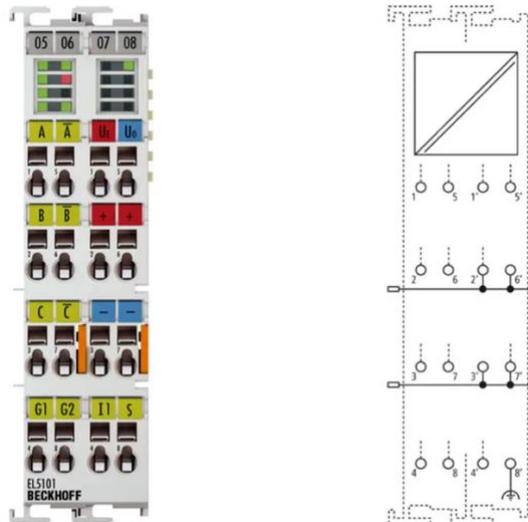


Figura 55. Terminal EL5101

Fuente: Beckhoff Automation

Algunas de las características más relevantes a tener en cuenta son:

- Alimentación de 24V y 5V directa a través de los puntos de conexión de los terminales y los power contacts.
- Compatibilidad con encoder incremental, diferencial (RS-422), de terminación única (TTL), contador o generador de pulsos.
- Tensión de operación del encoder de 5V DC y corriente máxima de 0.5 A.
- Frecuencia máxima de 1 MHz y resolución de 1/256 bit.
- Lectura síncrona de posición gracias al uso de relojes distribuidos.
- Funcionalidades adicionales como detección de rotura de cable, medición de duración de período y/o frecuencia, micro incrementos, filtros etc.
- Temperatura de operación entre -25 ° y 60 °.
- Certificación para entornos explosivos ATEX.
- Resistencia frente a vibraciones conforme a EN 60068-2-6/ EN 60068-2-27.

EL1008: El terminal EL1008 es una tarjeta de ocho entradas digitales que adquiere señales de control binarias desde el nivel de proceso y las transmite a la unidad de automatización superior de manera eléctricamente aislada.

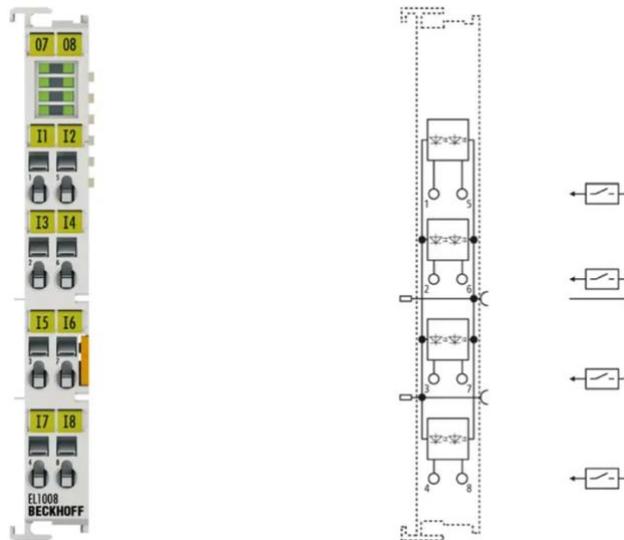


Figura 56. Terminal EL1008

Fuente: Beckhoff Automation

Algunas de las características a tener en cuenta son:

- Conexión de las entradas a través de una tecnología basada en un solo cable con especificación EN 61131-2 (tipo 1/3).
- Tensión nominal de 24 V proporcionada gracias a los power contacts posicionados en los extremos laterales del terminal.
- Señal como 0 lógico para tensión en rango -3 V y 5 V.
- Señal como 1 lógico para tensión en rango 11 V y 30 V.
- Corriente de entrada de 3 mA.
- Aislamiento eléctrico de hasta 500V.
- Temperatura de operación entre -25 ° y 60 °.
- Consumo de corriente por parte de power contacts de 2 mA (sin considerar carga).
- Certificación CE (cumplimiento de reglamento europeo), ATEX (entornos explosivos) y UL, entre otras.

- Presencia de ocho indicadores luminosos en la parte superior para indicar el estado de las entradas digitales.

EL2008: se trata de un terminal de ocho salidas digitales transmitidas desde el dispositivo de automatización superior a los actuadores del nivel de proceso con aislamiento eléctrico.

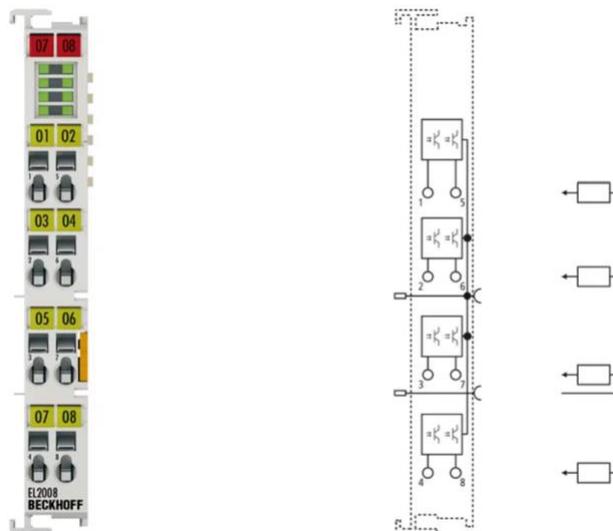


Figura 57. Terminal EL2008

Fuente: Beckhoff Automation

Algunos de los aspectos más relevantes a tener en cuenta son:

- Posibilidad de conexión de diferentes tipos de carga como inductiva, óhmica o de lámpara (conocida como “lamp load”).
- Máxima corriente de salida por canal con valor 0,5 A.
- Funcionalidades de seguridad como protección frente a cortocircuitos y protección frente a polaridad inversa.
- Consumo del bus EtherCAT de 110 mA.
- Aislamiento eléctrico de hasta 500 V.
- Temperatura de operación entre -25 ° y 60 °.
- Consumo de corriente por parte de power contacts de 2 mA (sin considerar carga).

- Presencia de ocho indicadores luminosos en la parte superior del terminal para indicar el estado de las salidas.
- Certificación CE, ATEX, UL etc.

EK1100: Se trata de una cabecera que actúa como enlace entre los terminales EtherCAT y el protocolo EtherCAT a nivel de bus de campo. Permite convertir los telegramas transmitidos a través de Ethernet 100BASE-TX a una representación apta para el E-bus.

Como se ha comentado previamente, una estación cuenta con una cabecera y una serie de terminales EtherCAT que son detectados automáticamente y mostrados en la imagen del proceso.



Figura 58. Terminal de cabecera EK1100

Fuente: Beckhoff Automation

Como se puede observar, la cabecera EK1100 cuenta con dos conectores RJ45, el conector superior es empleado para establecer la conexión a la red mientras que el conector inferior es empleado para la conexión opcional de otros dispositivos EtherCAT.

La alimentación de 24V se suministra directamente a través del acoplador, alcanzando una entrega máxima de potencia de 10 W (corriente de 2 A y tensión de 5 V). Se debe tener en cuenta que la alimentación a través de los power contacts debe suministrar

un valor de corriente suficiente para todos los terminales adjuntos, lo que supone una limitación en cuanto al diseño de la instalación. En caso de que se requieran valores superiores de corriente, es posible integrar terminales de alimentación específicos como el EL9410.

Las características más relevantes en cuanto al acoplador EK110 son las siguientes:

- Cable Ethernet/ EtherCAT de categoría mínima CAT5 como medio empleado para la transferencia de datos.
- Distancia máxima entre estaciones de 100 metros.
- Número máximo de terminales EtherCAT de 65.534.
- Tasa de transferencia de datos de 100 Mbit por segundo.
- Retraso de aproximadamente 1 μ s.
- Aislamiento eléctrico de hasta 500 V.
- Certificación CE, ATEX, UL etc.

C6930-1106-0050

Para poder llevar a cabo el control del sistema de transporte XTS es necesaria la integración de un PC industrial, concretamente el modelo C6930 – 1106 - 0050 de la compañía Beckhoff Automation. Se trata de un controlador programable de elevada robustez como consecuencia de su carcasa compacta de aluminio y la presencia de todos los conectores en un lateral de esta, como es observable a continuación:



Figura 59. PC industrial C6930-1106-0050

Fuente: Beckhoff Automation

El equipo dispone de un sistema de refrigeración a partir de aletas situadas en la parte posterior derecha, lo que posibilita el funcionamiento adecuado del equipo hasta temperaturas de 55 °C. Ofrece máxima seguridad y disponibilidad de datos gracias a que dispone de un sistema de alimentación ininterrumpida integrado (SAI), de manera que la información permanece protegida en casos de caída de tensión como consecuencia de la carga de condensadores.

Además, presenta los siguientes interfaces:

- Puerto X101 para suministro de fuente de alimentación con valor de tensión nominal de 24 Voltios y corriente de 6.25 Amperios.

En caso de que se disponga de un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI o en inglés, UPS Uninterrupted Power Supply), se deberán conectar las baterías a los pines 1 y 2 respectivamente. Dicho sistema permite, a partir de la carga de unos condensadores, el suministro de alimentación adicional para garantizar el almacenamiento de la información.

- Dos conectores RJ45 (X102 y X103) que permiten la conexión entre los diferentes componentes integrados en la red. Se trata de dos puertos de conexión de red de área local (LAN – Local Area Network) con capacidad máxima de transferencia de datos de 1000 Mbit por segundo.

La presencia de dos interfaces Ethernet independientes provoca que el C6930 se convierta en una unidad central de procesamiento compacta y óptima para un sistema de control EtherCAT.

Adicionalmente, como ocurre en la mayoría de los equipos desarrollados por Beckhoff Automation, se perciben indicadores luminosos referentes al resultado del proceso de comunicación y la velocidad de transferencia de datos, lo que facilita el proceso de detección de errores a los operarios.

- Cuatro puertos USB (X104, X105, X106, X107) destinados a la conexión de dispositivos periféricos que dispongan de interfaces USB.
- Un puerto DVI (Digital Visual Interface) que ofrece la posibilidad de conexión a un monitor. Es importante tener en cuenta que solo se permite la transmisión de señales digitales.
- Un conector serie RS232 (X109).



Figura 60. Elementos de PC de control

Fuente: Beckhoff Automation

En definitiva, la presencia de múltiples interfaces en un mismo equipo constituye una plataforma de control de elevado rendimiento, siendo especialmente útil en aplicaciones de ingeniería mecánica.

Con respecto a la topología de PC industrial de la serie C69xx, se pueden clasificar según criterios como la capacidad de almacenamiento de datos y las características de los procesadores.

El PC industrial C6930 cuenta con un controlador SATA RAID que permite la duplicación de dos discos duros, tarjetas CFast o SSD, lo que incrementa la capacidad de almacenamiento y evita la saturación del equipo.

Algunas de las características técnicas a tener en cuenta son las siguientes:

- Procesador Core i7 – 4700EQ de 2,4 GHz.
- Dos módulos de memoria RAM (Random Access Memory) de 4.096 MBytes.

- Memoria HDD de 240 GBytes 3D – Flash.
- Tamaño reducido de 90 mm x 235 mm x 121 mm (ancho, altura y profundidad).
- Facilidad del proceso de instalación y desinstalación.
- Facilidad de limpieza y mantenimiento como consecuencia de su elevada robustez.
- Tensión de alimentación variable entre 20.4 y 28.8 V en puerto COM3.
- Resistencia frente vibraciones acorde al estándar IEC 60068-2-6.
- Resistencia frente colisiones según el estándar IEC 60068-2-27.
- Rango de temperatura de almacenamiento y transporte: desde -25 °C hasta +65 °C.
- Rango de temperatura de operatividad: desde +0 °C hasta +55 °C.
- Presencia de ranuras libres para módulos PCIe (Peripheral Component Interconnect Express), lo que facilita la extensión del equipo y la integración de interfaces adicionales de Ethernet, USB o PROFIBUS.

2.6 Fuentes de alimentación

Las fuentes de alimentación necesarias para el funcionamiento del XTS y todos los elementos de control, comunicación y terminales implicados son las siguientes:

QS20.241

Se trata de una fuente de alimentación de la compañía PULS, especializada en la creación de fuentes de alimentación. Es empleada para alimentar los elementos de control y comunicación.

Sus principales características son las siguientes:

- Tensión nominal de 24 a 28 V DC.
- Rango de corriente entregada de 17 Amperios a 20 Amperios, para una tensión de 24 y 28 V respectivamente.
- Potencia entregada de 480 W.
- Eficiencia del 93,3%.

- Pérdidas de potencia de 31.4 W, aproximadamente.

*Corto periodo de tiempo se entiende como cuatro segundos.



Figura 61. Fuente de alimentación para control y comunicación

Fuente: PULS web

QS40.241

Se trata de una fuente de alimentación desarrollada por PULS, la cual es empleada para la alimentación de los módulos del XTS. Sus principales características son:

- Tensión nominal de salida de 24 V DC, pudiendo alcanzar un valor de 28 Voltios DC.
- Corriente variable entre 34,3 y 40 Amperios de manera continua o bien, entre 51,5 y 60 Amperios para un corto periodo de tiempo.
- Potencia entregada de 960 W de manera continua y 1.440 W en un corto periodo de tiempo.
- Eficiencia del 94,6%.
- Pérdidas de potencias en rango 54,8 y 65,6 W.

*Corto periodo de tiempo se entiende como cuatro segundos.



Figura 62. Fuente de alimentación para XTS

Fuente: PULS web

PS1111 – 2403 – 0002

Se trata de una fuente de alimentación desarrollada por la compañía Beckhoff Automation que se encarga de suministrar corriente a los terminales.

Sus características principales son:

- Tensión de salida de 24 V DC.
- Corriente entregada de 3,8 Amperios.
- Potencia entregada de 90 V.
- Rango de temperatura entre -10 °C y 70 °C.
- Eficiencia del 93,8%.
- Protección IP20 así como resistencia frente a vibraciones acorde a EN 60068-2-26 y resistencia frente a impactos acorde a EN 60068-2-27.



Figura 63. Fuente de alimentación para terminales

Fuente: Beckhoff Automation

2.7 Elementos de protección y seguridad

De igual manera que cualquier instalación o equipo de carácter eléctrico, el sistema debe contar con una serie de elementos y medidas de seguridad que protejan tanto el sistema como las personas que se encuentren en contacto con el cuadro de control, ya que el XTS es un sistema de transporte diseñado para operar de manera autónoma y sin contacto humano.

La implementación de estos elementos es una medida de seguridad necesaria para la aprobación y puesta en marcha de los equipos, lo cual contribuye con la prevención de riesgos laborales.

Los elementos de seguridad y protección implementados son los siguientes:

SIEMENS SIRIUS 3RT2526-2BB40

Se trata de un contactor desarrollado por la compañía Siemens que permite aislar circuitos eléctricos gracias a la conmutación de una serie de contactos. Sus características principales son las siguientes:

- Tensión de aislamiento del circuito principal y del circuito auxiliar de 690 V.
- Resistencia a tensión de choque de 6 kV para el circuito principal y auxiliar.
- Presencia de dos contactos NA y dos contactos NC para el circuito principal. El término NA hace referencia a un contacto normalmente abierto y el término NC a un contacto normalmente cerrado.
- Alimentación de 24 V de corriente continua.
- Empleo de fusibles entre 35 y 63 Amperios como medida de protección frente a cortocircuitos.
- El retardo de apertura con corriente continua posee un valor máximo de 18 ms mientras que el retardo de cierre puede alcanzar hasta 170 ms.
- Temperatura durante funcionamiento entre -25 °C y 60 °C.
- Temperatura durante almacenamiento entre -55 °C y 80 °C.



Figura 64. Contactor Siemens Sirius

Fuente: Siemens

SIEMENS 5SU1354 - 6KK10

Se trata de un interruptor diferencial desarrollado por Siemens que dota de seguridad a las personas que se encuentren en contacto con las instalaciones y/o equipos donde sea instalado. Su funcionamiento se basa en el corte de la corriente eléctrica en caso de que se detecte una diferencia en la magnitud de la corriente que entra y la corriente que sale de un circuito eléctrico, evitando así la posibilidad de las personas de sufrir una descarga eléctrica.



Figura 65. Diferencial Siemens 5SU1354 - 6KK10

Fuente: Siemens

Sus características principales son las siguientes:

- Presencia de dos polos magnéticos de tipo 1P + N.
- Categoría de sobretensión III y grado de protección IP20.
- Tensión de aislamiento de 264 V.
- Resistencia frente a tensión de choque de 4.000 V y frente a corriente de 1.000 Amperios.
- Temperatura de funcionamiento entre -25 °C y 55 °C.
- Temperatura de almacenamiento entre -40 °C y 75 °C.

AUTOMÁTICOS MAGNETOTÉRMICOS SIEMENS

Se trata de un dispositivo capaz de interrumpir la corriente eléctrica que circula por un circuito cuando ésta alcance ciertos valores máximos con el objetivo de proteger el resto de las componentes que integran el circuito.

En el cuadro de control del sistema se perciben tres automáticos de la compañía Siemens, los cuales son expuestos a continuación.

5SY6516 - 7



Figura 66. Automático Siemens 5SY6516 – 7

Fuente: Siemens

Sus principales características son:

- Presencia de dos polos magnéticos tipo 1P + N.
- Categoría de sobretensión III y grado de protección IP20.
- Tensión de alimentación de 230 V.
- Capacidad de conmutación de hasta 6.000 Amperios según el estándar EN 60898.
- Poder de corte de corriente de cortocircuito hasta 5.000 Amperios.
- Resistencia a vibraciones según IEC 60068-2-6.

5SY4204- 7

Se trata de un interruptor automático de dos polos y poder de corte de hasta 10.000 Amperios a través de un disparo de clase C.

Los valores de tensión y corriente nominal son 400 V AC y 4 Amperios, respectivamente.



Figura 67. Automático Siemens 5SY4204-7

Fuente: Siemens

AUTOMÁTICOS MAGNETOTÉRMICOS DC

Con el objetivo de proteger completamente el circuito, ha sido necesario implementar automáticos magnetotérmicos de corriente continua, concretamente el modelo 5SL3016-7 de la compañía Siemens, el cual se muestra a continuación:



Figura 68. Automático Siemens DC 5SL3016-7

Fuente: Siemens

Sus principales características son:

- Diseño compacto y vida útil mecánica de hasta 10.000 ciclos de maniobra.
- Categoría de sobretensión III y protección IP20.
- Valor de alimentación asignado de 230V AC y 60V DC.
- Poder de corte de corriente de hasta 4.500 Amperios.,
- Resistencia a vibraciones según estándar IEC 60068-2-6.

2.8 Panel HMI

Para incrementar la optimización y centralización de la información del proceso industrial se ha decidido implementar un panel HMI (Human-Machine Interface), el cual constituye una interfaz entre los operarios y la máquina. De esta manera, se puede observar información sobre el sistema en tiempo real, así como interactuar con el proceso a través de los diferentes pulsadores o la seta de emergencia.

En éste se mostrará información en tiempo real sobre los posibles errores y alertas relativos a todos los elementos que componen el sistema, así como parámetros relativos al XTS (corriente, consumo, velocidad y posición de los movers, entre otros).

El panel de control implementado es el modelo CP3916-0000 de la compañía Beckhoff Automation, cuyas principales características se describen a continuación:

- Pantalla táctil de 15.6 pulgadas, orientación vertical y resolución de 1.366 x 768 píxeles.
- Carcasa de aluminio con protección IP65.
- Presencia de conectores DVI y USB con velocidad de transmisión de 480Mbit por segundo y distancia máxima de 50 metros con respecto al PC de control.



Figura 69. Panel HMI modelo CP3916-0000

Fuente: Beckhoff Automation

Adicionalmente y con el objetivo de incrementar la funcionalidad del panel, se han integrado los siguientes componentes adicionales:

C9900-G034

Se trata de una extensión de pulsadores específica para los paneles CP3x16 con pantalla de 15.6 pulgadas.

Incluye cuatro pulsadores de diámetro 30 milímetros con señales luminosas, así como una seta de emergencia modelo RAFI RAFIX 22FS+. Además, permite la lectura del estado de los pulsadores vía USB, entre otros aspectos.



Figura 70. Extensión C9900-G034

Fuente: Beckhoff Automation

C9900-M753

Se trata de un adaptador inclinable y giratorio para el brazo que soporta el panel HMI, lo cual dota de una mayor flexibilidad al sistema, posibilitando que éste se adapte a las necesidades de la aplicación.

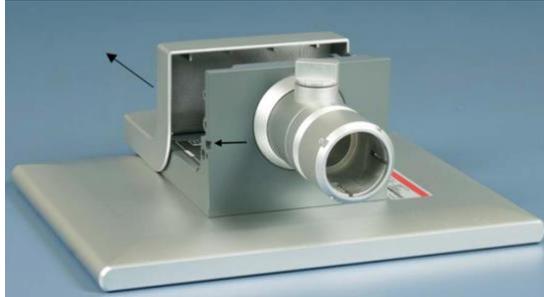


Figura 71. Soporte para HMI C9900-M753

Fuente: Beckhoff Automation

C9900-K360

Se trata de un kit que se compone de un cable DVI de longitud de 3 metros, un cable CAT 5 de 3 metros para la conexión con el puerto USB-E-2.0, un convertor del puerto USB al puerto USB-E-2.0 y finalmente, un cable USB de longitud 1 metro.

2.9 XTS Software

El software del XTS proporciona un apoyo al usuario que incluye desde la parametrización y programación de aplicaciones hasta operaciones de simulación y diagnóstico del sistema, de manera que el programador puede ir corroborando el funcionamiento del sistema de manera que actúe de la manera deseada.

El sistema XTS permite reemplazar soluciones mecánicas que anteriormente resultaban complejas de manera innovadora, lo que es posible gracias al software de programación, constuyendo la base de este sistema mecatrónico.

Se debe tener en cuenta que, a pesar de que el funcionamiento del XTS se base únicamente en la parametrización y definición de perfiles de movimiento de los movers, los cuales se mueven gracias al campo magnético generado como consecuencia de los imanes, la programación resulta compleja. En consecuencia, la posibilidad de verificar la ejecución de las instrucciones de control de manera secuencial es de elevada utilidad, permitiendo la detección de fallos de manera más sencilla y rápida.

Adicionalmente, el software integra funciones de diagnóstico, de manera que la detección y corrección de errores se realiza de manera rápida.

Otra de las principales ventajas que ofrece este software es la posibilidad de ensamblar el diseño del sistema de transporte de manera modular, para lo cual se dispone de las herramientas XTS Simulaton Builder y XTS Configurator. En éstas, se diseña virtualmente el diseño de la planta a partir de la inclusión de los módulos, se selecciona el número de movers y se definen los aspectos relativos a la XTS Processing Unit.

La unidad de procesamiento (XTS Processing Unit) permite asignar las diferentes tareas y los tiempos de ciclo de éstas a los núcleos disponibles del PC de control. Esto resulta de elevada importancia ya que es conveniente que la tarea que ejecute el XTS (denotada como XTS Task) sea ejecutada por un núcleo de manera independiente con el objetivo de dotar al sistema de una mayor optimización y rendimiento.

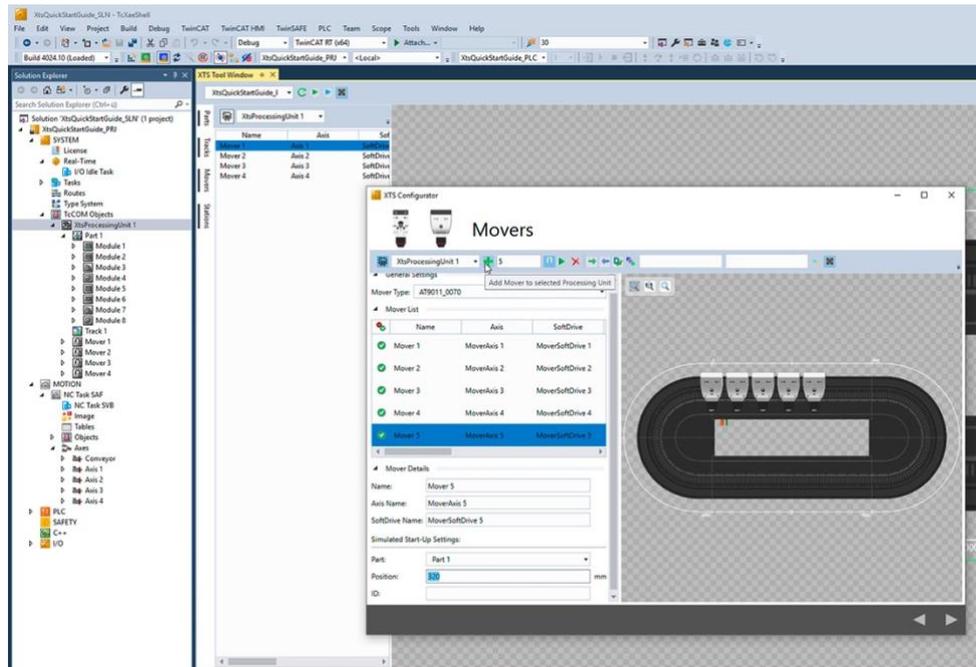


Figura 72. Entorno de trabajo XTS Configurator

Fuente: Beckhoff Automation

Uno de los aspectos diferenciadores con respecto a otros sistemas de transporte es la posibilidad de definir diferentes perfiles de movimiento para los movers, siendo posible la realización de movimientos simples o altamente complejos. En este último caso, resulta ventajoso que cada uno de los movers se programe en el software de desarrollo como un servomotor, lo cual puede realizarse a partir de bloques de función previamente definidos.

Desde un punto de vista comercial, la posibilidad de mostrar el diseño de la planta y el funcionamiento del XTS de manera virtual a través del XTS Viewer o XTS Live View permite captar un mayor número de clientes ya que éstos son capaces de percibir visualmente y en tiempo real la potencialidad del sistema de transporte.

Capítulo 3. MÉTODO OPERATIVO

3.1 Estudio del proceso a automatizar

El sistema propuesto supone un incremento en la productividad, eficiencia y velocidad de producción de lentes oftálmicas, entre las que se diferencian lentes de stock y las lentes de precisión individualizadas.

Las lentes de stock se fabrican a partir de un método de moldeo por inyección en grandes cantidades, proporcionando un menor rendimiento y siendo una solución óptima en casos de necesidad de corrección visual urgente.

De manera contraria, las lentes de precisión individualizadas se fabrican a partir de un proceso de producción basado en la tecnología freeform en la que el óptico genera un perfil exhaustivo y detallado de las lentes, proporcionando un mayor rendimiento y una mayor calidad.

Como consecuencia de su elevada flexibilidad, el sistema de transporte que integra el XTS es válido para ambos métodos de producción. Sin embargo, con el objetivo de incrementar los beneficios se ha optado por las lentes individualizadas, cuyo proceso productivo se describe a continuación.

La primera etapa consiste en la preparación de las lentes una vez recibida la petición por parte del óptico, el cual debe haber realizado previamente un estudio oftalmológico al cliente con el objetivo de obtener los datos necesarios para su fabricación.

La fabricación de este tipo de lentes se realiza a partir de lentes semiterminadas, las cuales poseen una graduación determinada en la cara anterior, siendo necesario únicamente el procesamiento de la cara posterior a partir de la tecnología freeform. A estas lentes también se las conoce como “bucks” debido a su similitud con los discos de hockey.

Una vez extraído el par de lentes semiterminadas del almacén, se bloquean y se genera el perfil de la cara posterior más adecuado según los parámetros y características obtenidos en el estudio oftalmológico. La generación del perfil se realiza a partir de un método de control numérico computarizado (también conocido por las siglas CNC) de cinco ejes, lo que permite otorgar la graduación y la forma adecuada a la lente.

Posteriormente, las lentes se someten a una fase de pulido con el objetivo de perfeccionar la superficie de éstas. Esta fase resulta de elevada importancia ya que, si la superficie de las lentes no resulta perfecta, los revestimientos posteriores no se adherirán correctamente y se separarán, disminuyendo la eficacia de las lentes.

Una vez pulidas las lentes, se procede al desbloqueo de las mismas y la inmersión en agua caliente (concretamente 50 °C), lo que permite eliminar cualquier resto de impureza como polvo o restos procedentes de la fase de pulido. Después, se procede a su secado con aire.

Es importante tener en cuenta que el agua empleada en la fase de limpieza se somete a unos tratamientos para ser reutilizada, lo que disminuye el consumo de agua e incrementa la contribución con la preservación y el cuidado del medio ambiente.

La siguiente etapa es el tintado de las lentes, pudiendo realizarse con capas de óxidos metálicos o colorantes textiles según la composición de la lente. Si las lentes son orgánicas se realizará con colorantes textiles mientras que, si se trata de lentes de cristal, el tintado consiste en la aplicación de óxidos metálicos con el objetivo de dotar a la lente el color correcto.

La última etapa del proceso de fabricación consiste en la aplicación de una serie de tratamientos que confieren a las lentes una mayor resistencia, una mayor nitidez, una protección frente a arañazos y propiedades antirreflejos.

Resulta evidente que, una vez finalizado el proceso de creación y tratamiento de las lentes, éstas se someten a un exhaustivo control de calidad donde se verifica que aspectos como grosor y diámetro de la superficie sean los correctos.

Una vez detallado el proceso de fabricación de lentes oftálmicas y teniendo en cuenta la flexibilidad del sistema de transporte XTS, se puede observar que éste puede ser implantado a lo largo de todas las etapas que componen el proceso productivo, incluyendo las fases de inmersión y secado.

Esto es gracias a la posibilidad de definición de los perfiles de movimiento individuales para cada uno de los movers, de manera que se respeta el tiempo de cada una de las etapas.

El sistema desarrollado hace referencia a varias fases del proceso productivo de lentes oftálmicas, concretamente la fase de sujeción de la lente, generación de perfil de la cara posterior y pulido.

El sistema ha sido diseñado en tres estaciones de trabajo:

En la primera estación, que abarca desde la posición 0 mm hasta la posición 250 mm, se producirá la deposición de las lentes semiterminadas previamente extraídas del almacén sobre el soporte de los movers, de manera que éstas se dirijan hacia la siguiente estación de procesado CNC.

Una vez posicionadas las lentes sobre el soporte, se entrega una señal por cada mover, indicando que las lentes semiterminadas ya se encuentran posicionadas y posibilitando el avance de los movers hacia la siguiente estación.

La estación intermedia, que abarca desde la posición 650 mm hasta la posición 900 mm, es donde se lleva a cabo la fase de generación del perfil de las lentes. Los movers permanecen en esta estación durante el tiempo suficiente para que el proceso se complete. Para ello, un brazo robótico será el encargado de extraer las lentes de los

movers y depositarlas sobre una pinza de sujeción que las mantendrá fijas durante el proceso CNC.

Una vez realizado el perfil, las lentes se devuelven a los movers y éstos se dirigen hacia la siguiente estación.

La última estación, que abarca desde la posición 1.250 mm hasta la posición 1.500 mm, consiste en el pulido de las lentes y la retirada de las mismas del sistema XTS.

De igual manera que en la estación anterior, las lentes son extraídas por un brazo robótico de los soportes de los movers y éste las deposita en una superficie hasta que el proceso de pulido se complete. Una vez retiradas las lentes, se entrega una señal de manera que los movers puedan avanzar de nuevo hacia la posición de salida (también conocida como Home) y el proceso vuelve a repetirse.

Las diferentes estaciones de trabajo se pueden observar en la siguiente figura:

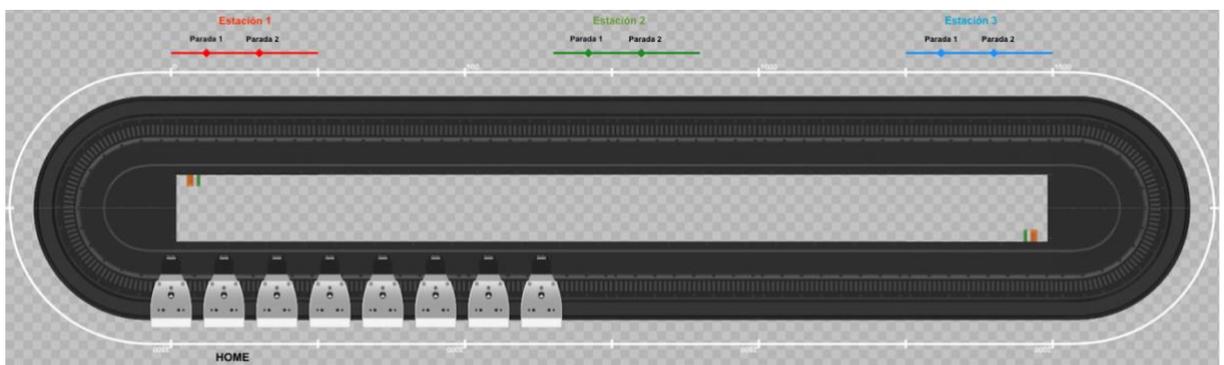


Figura 73. Esquema del sistema de transporte

Fuente: TwinCAT 3

La primera estación (de color rojo) comprende desde la posición 0 mm hasta la posición 250 mm, con posiciones de parada de los movers de 60 mm y 150 mm, respectivamente.

La segunda estación (de color verde) comprende desde la posición 650 mm hasta la posición 900 mm, con posiciones de parada de los movers de 710 mm y 800 mm, respectivamente.

La tercera estación (de color azul) comprende desde la posición 1.250 mm hasta la posición 1.500 mm, con posiciones de parada de los movers de 1.310 mm y 1.400 mm, respectivamente.

Las posiciones de detención de los movers han sido definidas teniendo en cuenta la dimensión de estos, respetando una distancia entre centros de los movers de 90 milímetros. Dicha distancia es conocida como “gap” y permite evitar la colisión entre los movers, lo que proporciona una mayor seguridad al sistema.

De manera resumida, un ciclo del sistema consiste en lo siguiente:

- Los dos primeros movers posicionados en Home se dirigen acoplados hacia la estación 1 a velocidad de 1 m/s, deteniéndose en las posiciones de parada comentadas previamente. Una vez alcanzada dicha estación, se depositan las lentes sobre los soportes de los movers e informa sobre su estado al programa de control.
- Una vez recibida la información por parte del sistema, los movers se dirigen acoplados hacia la siguiente estación a una velocidad de 1 m/s, en la que permanecen un tiempo de 45 segundos durante el cual se realizaría el perfil posterior de las lentes a partir de un método de control numérico computarizado (CNC) de 5 ejes en una máquina ajena al XTS.

En el instante en que los dos primeros movers comienzan su movimiento hacia la siguiente estación, los dos movers consecutivos posicionados en Home se dirigen hacia la estación 1.

- Una vez transcurrido dicho tiempo, los movers avanzan acoplados hacia la estación 3 a una velocidad constante de 1 m/s, deteniéndose en las posiciones de parada previamente definidas. En esta fase se realiza el pulido de las lentes en una máquina ajena al XTS, de manera que cuando se ha completado el proceso se envía una señal que informa al programa de control para el posterior desacople de los movers y su movimiento individual hacia Home.
En el instante en que los movers avanzan hacia la estación 3, los movers que se encuentran en la estación 1 avanzan hacia la estación 2 siempre y cuando se hayan depositado las piezas sobre los soportes.

Una vez finalizadas estas secuencias, el proceso se repite de manera cíclica.

Para posibilitar el correcto funcionamiento de estas secuencias, ha sido necesario definir numerosas condiciones de manera que el sistema opere adecuadamente y de manera síncrona, lo cual se muestra en los siguientes apartados de este documento.

3.2 Creación y configuración de proyecto TwinCAT XAE

La creación del proyecto de TwinCAT XAE incluye la generación de una estructura predeterminada en la vista del Solution Explorer, que se compone de los siguientes módulos mostrados a continuación:

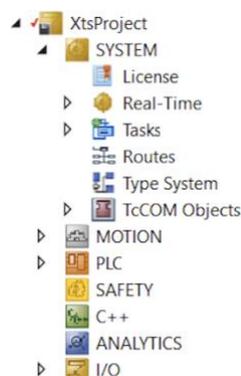


Figura 74. Estructura de proyecto TwinCAT XAE

Fuente: TwinCAT 3

La sección System hace referencia a la configuración del sistema y de las tareas en tiempo real.

En la sección de licencias se han incluido todas aquellas necesarias para llevar a cabo el proyecto, las cuales se muestran a continuación:

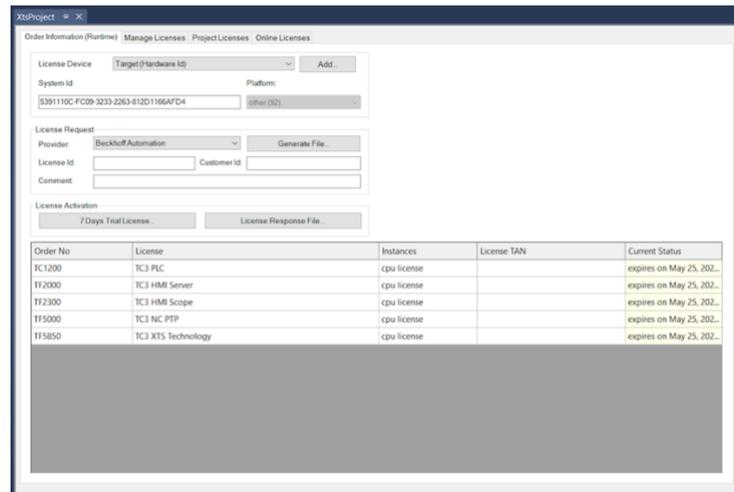


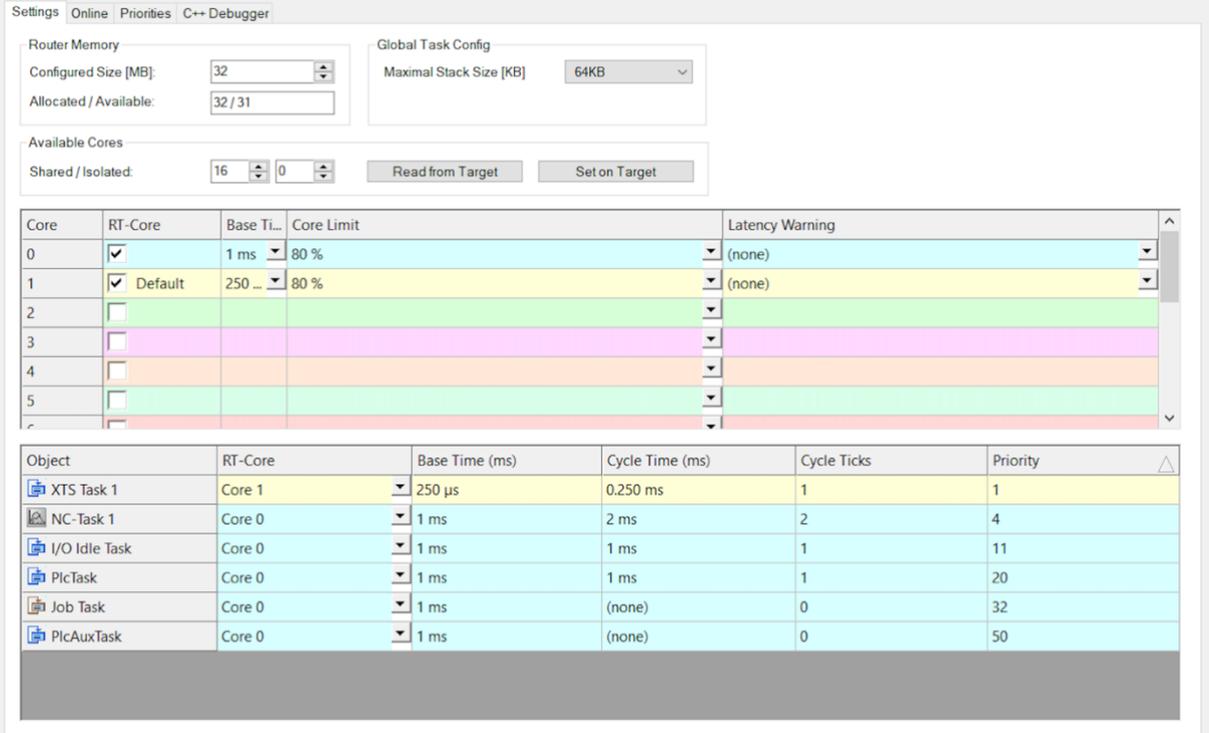
Figura 75. Inclusión de licencias necesarias

Fuente: TwinCAT 3

Para el desarrollo del proyecto se han empleado licencias de prueba que deben ser reactivadas cada siete días. Sin embargo, si el proyecto se implantase en la industria de creación de lentes oftálmicas propuesta, es necesaria la compra de las licencias con los costes establecidos en el estudio económico del proyecto.

En la sección Real-Time se gestiona el uso de los núcleos de la CPU. Aquí se puede especificar el tiempo de base y el tiempo de ciclo de cada tarea, la prioridad de cada una de ellas, el núcleo que ejecutará cada tarea y el porcentaje de cada núcleo que será destinado a las tareas.

En la siguiente imagen se observa que la CPU dispone de ocho núcleos, de los cuales solo se emplean dos de ellos, uno reservado para ejecutar la tarea del XTS (Core 1) y el restante (Core 0) para ejecutar el resto de tareas.



The screenshot shows the 'Settings' window in TwinCAT 3, specifically the 'Online' tab. It displays configuration for Router Memory (32 MB) and Global Task Config (64KB stack size). Under 'Available Cores', 16 cores are shared and 0 are isolated. A table below shows core configurations for cores 0 through 5, with Core 0 and Core 1 selected. Core 0 has a base time of 1 ms and a core limit of 80%. Core 1 has a base time of 250 μs and a core limit of 80%. A second table lists tasks and their assignments: XTS Task 1 is assigned to Core 1, while NC-Task 1, I/O Idle Task, PlcTask, Job Task, and PlcAuxTask are assigned to Core 0.

Core	RT-Core	Base Ti...	Core Limit	Latency Warning
0	<input checked="" type="checkbox"/>	1 ms	80 %	(none)
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Default 250 ...	80 %	(none)
2	<input type="checkbox"/>			
3	<input type="checkbox"/>			
4	<input type="checkbox"/>			
5	<input type="checkbox"/>			

Object	RT-Core	Base Time (ms)	Cycle Time (ms)	Cycle Ticks	Priority
XTS Task 1	Core 1	250 μs	0.250 ms	1	1
NC-Task 1	Core 0	1 ms	2 ms	2	4
I/O Idle Task	Core 0	1 ms	1 ms	1	11
PlcTask	Core 0	1 ms	1 ms	1	20
Job Task	Core 0	1 ms	(none)	0	32
PlcAuxTask	Core 0	1 ms	(none)	0	50

Figura 76. Gestión de tareas y núcleos de CPU

Fuente: TwinCAT 3

Es importante tener en cuenta que la tarea del XTS debe ser ejecutada de manera aislada por un núcleo ya que es la tarea más rápida y la que más recursos necesita. El aislamiento de un núcleo provoca que éste deje de estar compartido por Windows, de manera que TwinCAT puede utilizarlo al 100%.

Con respecto a las tareas PLCTask y NC – Task 1, es conveniente que éstas sean ejecutadas por un núcleo independiente al que ejecuta la tarea del XTS. Para estas tareas no es necesario modificar el tiempo de ciclo y el tiempo base por defecto.

En el momento de creación del proyecto XTS a partir de la herramienta XTS Simulation Builder se generan automáticamente una sección de XTS Processing Unit y una sección de Info Server en TcCOM Objects.

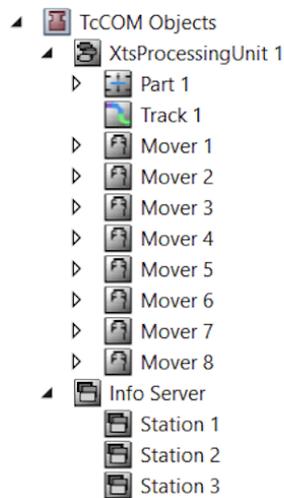


Figura 77. Estructura de TcCOM Objects en proyecto TwinCAT XAE

Fuente: TwinCAT 3

La Unidad de Procesamiento constituye el elemento central del XTS, incluyendo todos los subelementos y requiriendo una tarea del XTS. En caso de que se desearan controlar varios XTS, deberán añadirse más unidades de procesamiento, una por cada sistema XTS. Dentro de esta sección encontramos:

- Part 1: constituida por los módulos de motor (con toma directa de alimentación y sin alimentación directa), de los cuales 12 son módulos rectos (dos de ellos in-feed) y 4 son módulos con cierta curvatura, constituyendo un circuito cerrado.

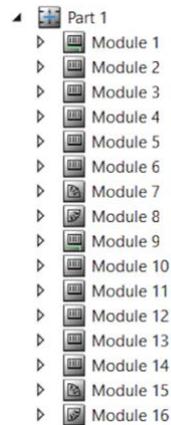


Figura 78. Estructura de módulos de XTS

Fuente: TwinCAT 3

- Track 1: se trata de una combinación de las partes creadas previamente, sobre las cuales se pueden desplazar los movers.

En el momento de creación de los tracks, se debe especificar que se trata de un circuito cerrado, lo cual se realiza marcando el checkbox “Is closed” en el XTS Simulation Builder.

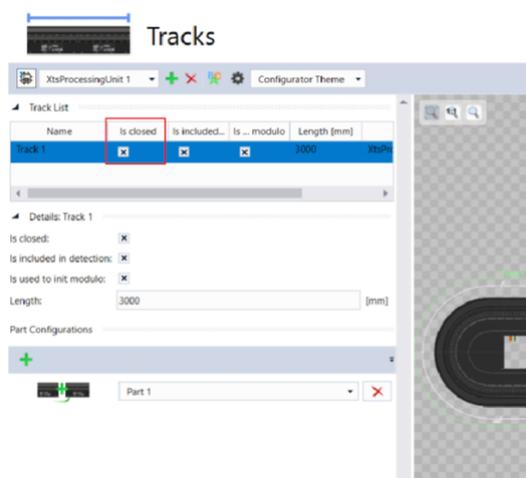


Figura 79. Configuración de Tracks de XTS

Fuente: TwinCAT 3

- Movers: el sistema cuenta con ocho movers, identificados de manera ascendente (desde el mover 1 hasta el mover 8) y controlados a través de un eje virtual.

La sección de Info Server incluye las diferentes estaciones, en las cuales se debe especificar la posición de parada de los movers así como la posición inicial y final que abarca la estación.

Se debe tener en cuenta que cada estación posee un identificador y que todas ellas se encuentran incluidas en la parte (Part 1) comentada previamente.

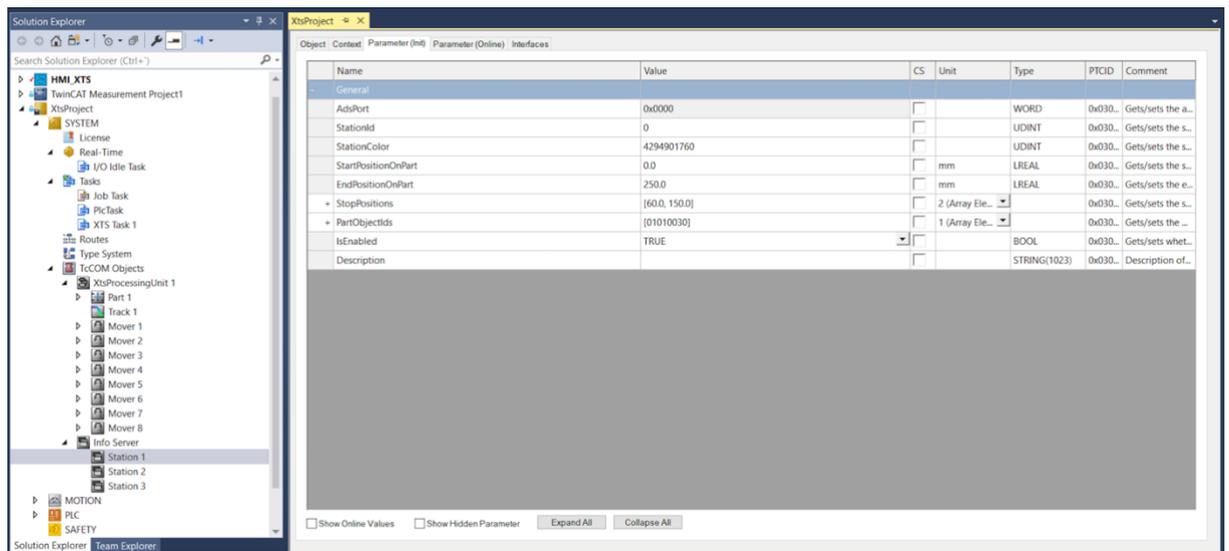


Figura 80. Configuración de estaciones de XTS

Fuente: TwinCAT 3

3.3 Controlador lógico programable (PLC)

3.3.1 Programación de sección PLC

La creación del proyecto de PLC se realiza seleccionando en el Solution Explorer la opción Add – New Project – TwinCAT PLC Project. En este momento se debe seleccionar la opción Standard PLC Project, de manera que se incluya una estructura predefinida de la siguiente manera:

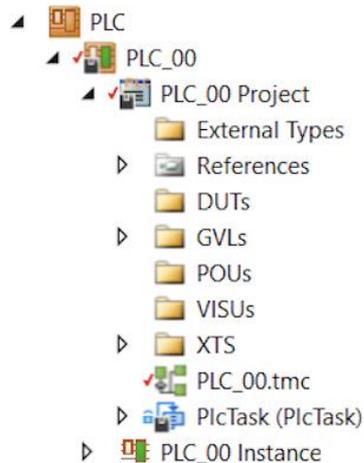


Figura 81. Estructura básica de proyecto de PLC

Fuente: TwinCAT 3

La funcionalidad de cada una de las secciones se describe a continuación:

- References: en esta sección se incluyen las librerías necesarias para la programación del proyecto de PLC. Para este proyecto ha sido necesario incluir librerías de motion así como de funcionalidades específicas del XTS, las cuales se muestran a continuación.

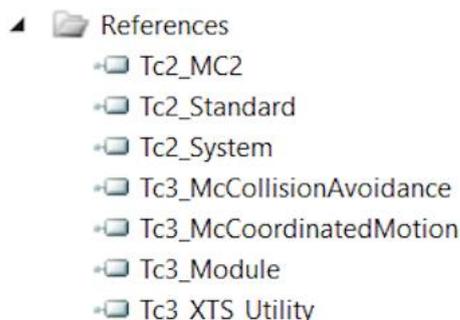


Figura 82. Inclusión de librerías en proyecto de PLC

Fuente: TwinCAT 3

- DUTs: carpeta destinada a almacenar los tipos de datos de usuario como enumeraciones, estructuras, alias y uniones. En este proyecto no ha sido necesario el empleo de esta sección.
- GVL: Lista de variables globales o Variable Global List. Se trata de una sección que recoge las variables globales del programa, lo cual implica su accesibilidad

desde cualquier punto del programa. Debe definirse el nombre de la variable, así como el tipo de dato.

Las variables globales han sido definidas con el atributo “qualified_only”, lo que implica que solo son accesibles cuando se indica el identificador GVL.nombre_variable.

```
{attribute 'qualified_only'}
VAR_GLOBAL
  ax:                ARRAY [0..GVL.Nummovers] OF AXIS_REF;
  axGroup:           AXES_GROUP_REF;

  //Mover Position
  axPos:             ARRAY [0..GVL.Nummovers] OF LREAL;

  //Check function call
  bMoveBusy1:        BOOL;
  bMoveBusy2:        BOOL;
  bMoveBusy3:        BOOL;
  bMoveBusy4:        BOOL;

END_VAR

VAR_GLOBAL CONSTANT
  Nummovers:         UINT:= 7;           //1 less mover to start arrays at 0

  //Home
  HomePos:           LREAL:= 3500;
  HomeVel:           LREAL:= 400;
  HomeRange:         LREAL:= 2750;

  //Station 1
  Pos1_0:            LREAL:= 10;
  Pos1_1:            LREAL:= 250;
  StopPos1_0:        LREAL:= 70;
  StopPos1_1:        LREAL:= 150;
  Vel1:              LREAL:= 1000;
  StopPos2_0:        LREAL:= 720;
  StopPos2_1:        LREAL:= 800;
  Vel2:              LREAL:= 1000;
  StopPos3_0:        LREAL:= 1320;
  StopPos3_1:        LREAL:= 1400;
  Vel3:              LREAL:= 1000;

END_VAR
```

Figura 83. Lista de variables globales de proyecto PLC

Fuente: TwinCAT 3

Como se puede observar, las variables globales han sido divididas en dos grupos: variables globales no constantes y variables globales constantes.

Dentro de las variables globales no constantes se encuentran:

- ax: define un vector de ocho posiciones relativo a los movers. Se debe tener en cuenta que el vector comienza en 0 y finaliza en 7, lo que afectará a las secuencias de programación comentadas posteriormente.
- axGroup: relativo al grupo de collision avoidance.
- axPos: vector de ocho posiciones de tipo LREAL (64 bits) que almacena la posición de cada uno de los movers.
- bMoveBusy1, bMoveBusy2, bMoveBusy3 y bMoveBusy4: variables binarias que han sido definidas para que los movimientos de los movers hacia las estaciones se realicen correctamente.

Dentro de las variables globales constantes encontramos:

- Nummovers: relativo al número de movers. Ha sido definido como 7 debido a que el vector que define los ejes (ax) comienza en 0.
- Variables de posición y velocidad de las diferentes estaciones, así como Home.

Una de las principales ventajas del empleo de variables globales es la facilidad de programación y realización de cambios, ya que si se desea modificar el valor de alguna variable basta con que ésta sea modificada en la sección GVL.

- POUs: carpeta que permite almacenar programas, bloques de función y funciones. Se debe tener en cuenta la compatibilidad de programación en diversos lenguajes como Diagrama de Bloques de Funciones (FBD – Function Block Diagram), Ladder (LD – Ladder Logic Diagram), Gráfico de Funciones Secuencial (SFC – Sequential Function Chart) o Texto Estructurado (ST – Structured Text), entre otros.

Se ha optado por la programación en texto estructurado debido al empleo de funcionalidades del XTS como el XTS Environment y una mayor complejidad de programación que el resto de los lenguajes, lo que permite mejorar las capacidades de programación e incrementar la agilidad.

- VISUs: carpeta destinada al almacenamiento de pantallas del PLC HMI. Esta sección no ha sido empleada en el proyecto.
- PlcTask: tarea del proyecto de PLC, la cual ha sido configurada con una prioridad de 20, un tiempo base y un tiempo de ciclo de 1 ms.
- PLC_00 Instance: en esa sección se realiza el mapeo de las variables del PLC con el proyecto de Motion y viceversa. Se debe tener en cuenta que las variables de salida de proyecto NC constituyen una entrada al proyecto de PLC y las variables de salida de PLC constituyen una entrada al proyecto NC.

Para realizar la vinculación entre variables, basta con activar configuración y seleccionar la opción Change Link, lo cual se muestra a continuación:

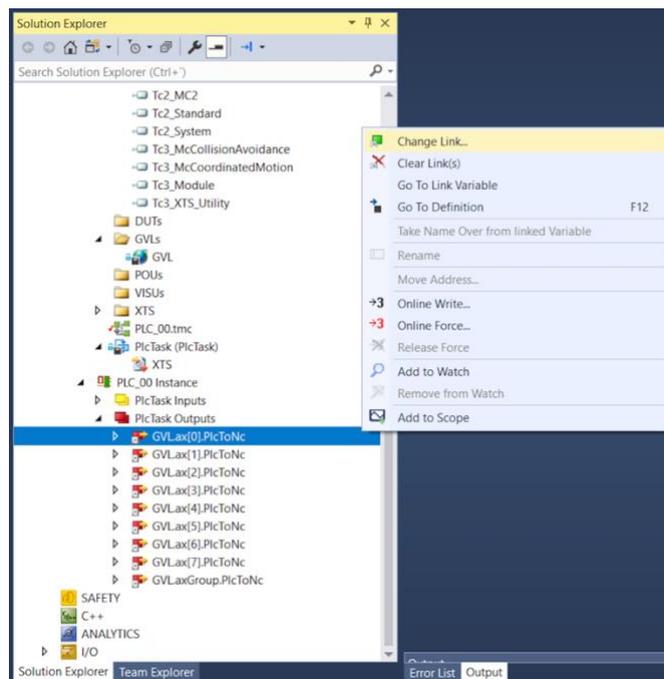


Figura 84. Mapeo de variables de entrada y salida del proyecto de PLC

Fuente: TwinCAT 3

Una vez comentada cada una de las secciones que forman la estructura básica de un proyecto de PLC, se procede a explicar la estructura del programa de control del XTS.

Para ello, se ha creado una carpeta denominada XTS que recoge todos los programas del proyecto, lo cual es observable a continuación:

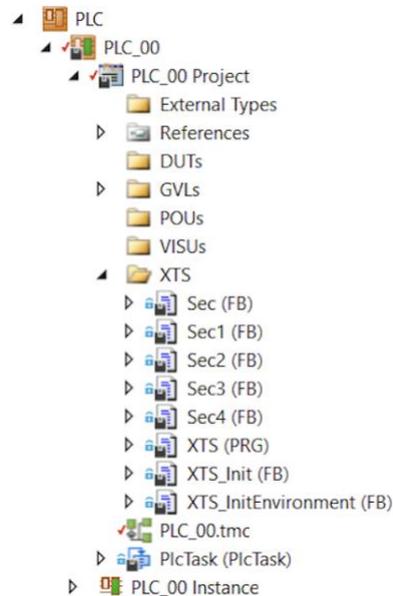


Figura 85. Estructura de programa de control XTS

Fuente: TwinCAT 3

La programación se ha realizado a partir del método conocido como OOP (Object Oriented Programming), lo que corresponde con la programación orientada a objetos.

De manera resumida, existe un programa principal (XTS (PRG)) donde se encuentra la secuencia del sistema y una clase abstracta padre (Sec (FB)) que implementa como métodos todas las posibles funciones de los movers y devuelve como propiedades el estado de las mismas. Además, existe una clase hija (Sec1, Sec2, Sec3, Sec4) por cada tramo de la secuencia descrita en el programa principal, encargándose cada una de ellas del movimiento y monitorización de los movers en un tramo concreto dentro del sistema XTS.

Para comprender el funcionamiento se debe tener en cuenta que una clase abstracta es aquella que no puede ser instanciada y cuyos miembros no pertenecen a otros subtipos declarados. En este caso se ha declarado una clase abstracta padre (Sec)

que contiene métodos y propiedades, los cuales podrán ser heredados y empleados por las clases hijas.

Los métodos incluidos permiten la verificación de la posición de los movers en las diversas estaciones, el acoplamiento y desacoplamiento de estos y una secuencia de movimiento absoluto.

Las propiedades definidas hacen referencia a la presencia de los movers en las estaciones, la ocurrencia de errores durante las secuencias de movimiento, el resultado del proceso de acoplamiento y el resultado del proceso de desacople de los movers.

Las variables definidas en la clase abstracta padre se encuentran en la siguiente figura:

```
FUNCTION_BLOCK ABSTRACT Sec
VAR_INPUT
END_VAR
VAR_OUTPUT
END_VAR
VAR
    //Check mover
    AxesOnStation:          INT;
    AxesOnStation2:        INT;
    AxesOnStation3:        INT;
    axPos1_1:               UINT;
    axPos1_0:               UINT;
    axPos2_1:               UINT;
    axPos2_0:               UINT;
    axPos3_1:               UINT;
    axPos3_0:               UINT;

    //Check Home
    axHome:                 UINT;

    //GearIn
    fbGearIn:                ARRAY [0..3] OF MC_GearInPosCA;

    //GearOut
    fbGearOut:               MC_GearOut;
    Ready3:                  BOOL;

    //Move1
    fbMoveAbs:               MC_MoveAbsoluteCA;

    Res:                    LREAL;

    i:                      UINT;
END_VAR
```

Figura 86. Variables internas definidas en clase padre Sec

Fuente: TwinCAT 3

En primer lugar, encontramos variables de tipo entero que indican el número de movers en cada estación (`AxesOnStation`, `AxesOnStation2`, `AxesOnStation3`). En segundo lugar, las variables de tipo UINT son relativas al número de mover que se encuentra en cada posición de parada de cada una de las estaciones. En tercer lugar, la variable de tipo UINT nombrada `axHome` indica el número de mover que se encuentra en la posición declarada como Home.

Después, se ha definido un vector de cuatro posiciones (de 0 a 3) para realizar el acoplamiento de pares de movers. Debido a que el sistema cuenta con ocho movers, el acoplamiento deberá realizarse cuatro veces. Es importante tener en cuenta que, debido a que los movers se encuentran dentro del grupo de collision avoidance, el tipo de acoplamiento debe ser el definido a partir de `MC_GearInPosCA`. De manera opuesta, el desacople de los movers no requiere la definición de un vector ya que en el instante en que un mover esclavo posee una posición de consigna distinta al mover al que se encuentra acoplado, éste se desacopla inmediatamente.

Finalmente, se encuentra el bloque de función `fbMoveAbs` del tipo `MC_MoveAbsoluteCA`, el cual será empleado por las clases hijas para el movimiento de los movers hacia las estaciones.

A continuación, se procede a explicar cada uno de los métodos y propiedades incluidas en la clase padre `Sec`:

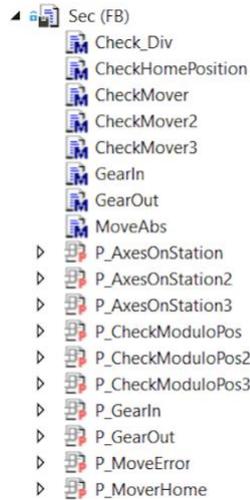


Figura 87. Métodos y propiedades de clase padre Sec

Fuente: TwinCAT 3

- Check_Div: método que permite verificar si el mover que se encuentra en la posición inicial Home tiene un número par o impar. Esto es relevante debido a que una condición para el acoplamiento entre movers es que el maestro tenga un número impar en el programa del PLC.

```
1 METHOD Check_Div : BOOL
2 VAR_INPUT
3 END_VAR
4
5 FOR i:= 0 TO 7 DO
6   Res:= axHome MOD 2;
7 END_FOR
8
9 IF Res = 0 THEN
10  Check_Div:= FALSE; //Par
11 ELSE
12  Check_Div:= TRUE; //Impar
13 END_IF
```

Figura 88. Método Check_Div de clase padre Sec

Fuente: TwinCAT 3

- CheckHomePosition: método que permite verificar, a partir de un bucle FOR, el número de mover que se encuentra en la posición Home, declarada en la lista de variables globales. La verificación de la posición se realiza teniendo en cuenta un ± 5 mm de error de posición.

```
1 METHOD CheckHomePosition : BOOL
2 VAR_INPUT
3 END_VAR
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
```

Figura 89. Método CheckHomePosition de clase padre Sec

Fuente: TwinCAT 3

- CheckMover: método que verifica el número de mover que se encuentra en las posiciones de parada de la estación 1 definidas en la lista de variables globales. Se ha considerado un error de posición de ± 5 mm en la detección.

```
1 METHOD CheckMover : BOOL
2 VAR_INPUT
3     PosSt0:          LREAL;
4     PostSt1:        LREAL;
5     StopPos0:       LREAL;
6     StopPos1:       LREAL;
7 END_VAR
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
```

Figura 90. Método CheckMover de clase padre Sec

Fuente: TwinCAT 3

- CheckMover2: método que verifica el número de mover que se encuentra en las posiciones de parada de la estación 2 definidas en la lista de variables globales. Se ha considerado un error de posición de ± 5 mm en la detección.

```
1 METHOD CheckMover2 : BOOL
2 VAR_INPUT
3     PosSt0:          LREAL;
4     PostSt1:        LREAL;
5     StopPos0:       LREAL;
6     StopPos1:       LREAL;
7 END_VAR
8
9 //Detección de número de movers en Estacion 1
10 AxesOnStation2:= 0;
11 FOR i:= 0 TO GVL.Nummovers DO
12     IF GVL.ax[i].NcToPlc.ModuloActPos > PosSt0 AND GVL.ax[i].NcToPlc.ModuloActPos < PostSt1 THEN
13         AxesOnStation2:= AxesOnStation2 + 1;
14     END_IF
15 //Detección de número de mover primero en Estacion 1
16 IF GVL.ax[i].NcToPlc.ModuloActPos > StopPos1 - 5 AND GVL.ax[i].NcToPlc.ModuloActPos < StopPos1 + 5 THEN
17     axPos2_1:= i;
18 END_IF
19 //Detección de número de mover segundo en Estacion 1
20 IF GVL.ax[i].NcToPlc.ModuloActPos > StopPos0 - 5 AND GVL.ax[i].NcToPlc.ModuloActPos < StopPos0 + 5 THEN
21     axPos2_0:= i;
22 END_IF
23 END_FOR
```

Figura 91. Método CheckMover2 de clase padre Sec

Fuente: TwinCAT 3

- CheckMover3: método que verifica el número de mover que se encuentra en las posiciones de parada de la estación 3 definidas en la lista de variables globales. Se ha considerado un error de posición de ± 5 mm en la detección.

```
1 METHOD CheckMover3 : BOOL
2 VAR_INPUT
3     PosSt0:          LREAL;
4     PostSt1:        LREAL;
5     StopPos0:       LREAL;
6     StopPos1:       LREAL;
7 END_VAR
8
9 //Detección de número de movers en Estacion 1
10 AxesOnStation3:= 0;
11 FOR i:= 0 TO GVL.Nummovers DO
12     IF GVL.ax[i].NcToPlc.ModuloActPos > PosSt0 AND GVL.ax[i].NcToPlc.ModuloActPos < PostSt1 THEN
13         AxesOnStation3:= AxesOnStation3 + 1;
14     END_IF
15 //Detección de número de mover primero en Estacion 1
16 IF GVL.ax[i].NcToPlc.ModuloActPos > StopPos1 - 5 AND GVL.ax[i].NcToPlc.ModuloActPos < StopPos1 + 5 THEN
17     axPos3_1:= i;
18 END_IF
19 //Detección de número de mover segundo en Estacion 1
20 IF GVL.ax[i].NcToPlc.ModuloActPos > StopPos0 - 5 AND GVL.ax[i].NcToPlc.ModuloActPos < StopPos0 + 5 THEN
21     axPos3_0:= i;
22 END_IF
23 END_FOR
```

Figura 92. Método CheckMover3 de clase padre Sec

Fuente: TwinCAT 3

- GearIn: método destinado al acoplamiento de los movers. Debido a que la función se activa mediante un flanco de subida en su variable de entrada “Execute”, éste debe ponerse a False previamente para poder detectar el flanco ascendente cuando ejecutemos la función poniendo la variable “Execute” a True. El acoplamiento se realiza entre el maestro (ax) y el esclavo (axSlave),

los cuales serán pasados como entradas a la función en la secuencia de acoplamiento.

```
1 METHOD GearIn : BOOL
2 VAR_INPUT
3   ax:          INT;
4   axSlave:     INT;
5   j:           UINT;
6
7 fbGearIn[j](Master:= GVL.ax[ax], Slave:= GVL.ax[axSlave], Execute:= FALSE);
8
9 IF ax <> axSlave THEN
10  fbGearIn[j](
11    Master:= GVL.ax[ax],
12    Slave:= GVL.ax[axSlave],
13    Execute:= TRUE,
14    RatioNumerator:= 1,
15    RatioDenominator:= 1,
16    MasterSyncPosition:= 149,
17    SlaveSyncPosition:= 59,
18    SyncStrategy:= MC_SYNC_STRATEGY.mcSyncStrategyEarly,
19    SyncMode:= 1,
20    MasterStartDistance:= 0,
21    Velocity:= 2000,
22    Gap:= 80);
23 END_IF
```

Figura 93. Método GearIn de clase padre Sec

Fuente: TwinCAT 3

- GearOut: método que permite llevar a cabo el desacople de los movers a partir de la función fbGearOut. Se debe tener en cuenta que el esclavo que se encuentra acoplado será pasado como una entrada a la función debido a que el acople y desacople se lleva a cabo simultáneamente para diferentes movers, por lo que el número de mover acoplado varía en función de la estación y secuencia de movimiento.

```
1 METHOD GearOut : BOOL
2 VAR_INPUT
3   axSlave:     INT;
4 END_VAR
5
6 fbGearOut(Slave:= GVL.ax[axSlave], Execute:= FALSE);
7 fbGearOut(Slave:= GVL.ax[axSlave], Execute:= TRUE);
```

Figura 94. Método GearOut de clase padre Sec

Fuente: TwinCAT 3

- MoveAbs: método que permite ejecutar el movimiento absoluto de los movers. Recibe como entrada el mover que ejecutará el movimiento, así como la

posición y velocidad, variables según la secuencia en que se encuentren los movers.

```
1 METHOD MoveAbs : BOOL
2 VAR_INPUT
3   ax:          INT;
4   Pos:         LREAL;
5   Vel:         LREAL;
6 END_VAR
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
```

Figura 95. Método MoveAbs de clase padre Sec

Fuente: TwinCAT 3

Las propiedades han sido definidas con el objetivo de que todos los movimientos se realicen adecuadamente, entre otros aspectos verifican: la ocurrencia de errores en la secuencia de movimiento, acoplamiento y desacoplamiento así como la presencia de movers en alguna de las estaciones, de manera que hasta que dicha estación no quede libre, no se otorgará la consigna de posición de dicha estación a ningún mover del XTS.

La primera secuencia de movimiento (Sec1) es una clase hija que hereda los métodos y propiedades de la clase padre (Sec), empleándolos de manera secuencial para ejecutar correctamente la primera secuencia de movimiento de los movers acoplados hacia la primera estación.

```
CASE State OF

0: //Check movers home
CheckHomePosition();
IF axHome = 7 THEN
    j:= 0;
ELSI axHome = 5 THEN
    j:= 1;
ELSI axHome = 3 THEN
    j:= 2;
ELSI axHome = 1 THEN
    j:= 3;
END_IF

//CheckMover(0, 250, GVL.StopPos1_0, GVL.StopPos1_1);
fbGearOut(Slave:= GVL.ax[axHome-1], Execute:= TRUE);
IF NOT fbGearIn[j].Busy THEN
    State:= 10;
ELSE
    State:=20;
END_IF
//State:= 10;

10://GearIn
//CheckMover(0, 250, GVL.StopPos1_0, GVL.StopPos1_1);
fbGearOut(Slave:= GVL.ax[axHome-1], Execute:= FALSE);
IF Check_Div() THEN
    GearIn(P_MoverHome, P_MoverHome - 1, j);
END_IF
IF P_MoverHome > 0 THEN
    IF P_GearIn THEN
        State:=20;
    ELSE
        State:= 0;
    END_IF
END_IF

20://Check mover sti
CheckMover(0, 250, GVL.StopPos1_0, GVL.StopPos1_1);
IF NOT P_AxesOnStation AND NOT P_CheckModulePos THEN
    State:= 30;
    ELSI P_AxesOnStation THEN
        GVL.bMoveBusy1:= FALSE;
    END_IF

30://Mov1
CheckMover(0, 250, GVL.StopPos1_0, GVL.StopPos1_1);
IF NOT GVL.bMoveBusy1 AND NOT P_AxesOnStation AND P_MoverHome <> 6 AND P_MoverHome <> 4 AND P_MoverHome <> 2 AND P_MoverHome <> 0 THEN
    MoveAbs(P_MoverHome, GVL.StopPos1_1, GVL.Vel1);
END_IF
IF NOT P_MoveError THEN
    State:= 0;
END_IF

END_CASE
```

Figura 96. Programación secuencia hija Sec1

Fuente: TwinCAT 3

La secuencia se basa en lo siguiente:

- Verificación de qué número de mover se encuentra en la posición de Home, lo cual es necesario para realizar correctamente la secuencia de acoplamiento posterior.
- Si los movers no se encuentran acoplados, pasa al estado 10 donde se acoplan mediante la llamada al método fbGearIn, que recibe tres parámetros de entrada; maestro, esclavo (correspondiente al mover maestro - 1) y j (relativo a orden de acoplamiento).
- Si los movers ya se encuentran acoplados, pasa al estado 20 donde se verifica el número de movers que se encuentran en la estación 1. Si no existen movers

- en la estación 1, se ejecuta la orden de movimiento hacia la estación. De manera contraria, si ya existen movers en la primera estación, los movers en Home permanecen en esa posición hasta que la primera estación quede libre.
- El proceso se repite para cada par de movers posicionados en Home siempre y cuando no se produzca ningún error.

La segunda secuencia de movimiento (Sec2) es una clase hija que hereda los métodos y propiedades de la clase padre (Sec), empleándolos de manera secuencial para ejecutar la secuencia de movimiento de la primera estación hacia la segunda estación.

```
FUNCTION_BLOCK Sec2 EXTENDS Sec
VAR_INPUT
    bReady1:      BOOL;
    bReady2:      BOOL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    bReadyOut1:   BOOL;
    bReadyOut2:   BOOL;
END_VAR

bReadyOut1:= bReady1;
bReadyOut2:= bReady2;

CASE State OF

    0: //Check Movers st1
    CheckMover(0, 250, GVL.StopPos1_0, GVL.StopPos1_1);
    IF P_AxesOnStation THEN
        axSt1:= axPos1_1;
    END_IF
    State:=10;

    10: //Check Movers st2
    CheckMover2(650, 900, GVL.StopPos2_0, GVL.StopPos2_1);
    IF NOT P_AxesOnStation2 THEN
        axSt2:= axPos2_1;
        State:=20;
    END_IF
    IF NOT P_AxesOnStation2 AND NOT P_CheckModuloPos2 THEN
        gvl.bMoveBusy2:= FALSE;
    END_IF

    20: //Mov2
    IF bReady1 AND bReady2 AND P_AxesOnStation AND NOT P_AxesOnStation2 AND NOT P_CheckModuloPos2 AND NOT gvl.bMoveBusy2 THEN
        MoveAbs(axSt1, GVL.StopPos2_1, GVL.Vel2);
    END_IF
    CheckMover2(650, 900, GVL.StopPos2_0, GVL.StopPos2_1);
    IF NOT P_MoveError AND P_AxesOnStation2 THEN
        bReadyOut1:= FALSE;
        bReadyOut2:= FALSE;
        State:= 0;
    END_IF

END_CASE
```

Figura 97. Programación de secuencia hija Sec2

Fuente: TwinCAT 3

La secuencia se basa en lo siguiente:

- El primer estado verifica el número de movers en la estación 1, concretamente en las estaciones de parada StopPos1_0 y StopPos1_1.
- El segundo estado verifica el número de movers de la estación 2, concretamente en las estaciones de parada StopPos2_0 y StopPos2_1.
- El tercer estado ejecuta la orden de movimiento de la estación 1 hacia la estación 2 siempre y cuando se hayan recibido las señales de deposición de pieza (a través de dos pulsadores en el panel HMI), existan movers en la estación 1 y la estación 2 se encuentre libre.
- El proceso vuelve a repetirse siempre y cuando no exista ningún error y los movers hayan alcanzado la estación 2.

La tercera secuencia de movimiento (Sec3) es una clase hija que hereda los métodos y propiedades de la clase padre (Sec), empleándolos de manera secuencial para ejecutar la secuencia de movimiento de la segunda estación hacia la tercera estación.

```
VAR
State:          INT;

axSt2:         UINT;
axSt3:         UINT;

timer:         TON;
bTimer:        BOOL;

```

```
CASE State OF

0: //Check Movers st2
CheckMover2(650, 900, GVL.StopPos2_0, GVL.StopPos2_1);
IF P_AxesOnStation2 THEN
    axSt2:= axPos2_1;
END_IF
bTimer:= TRUE;
State:=1;

1: //Timer
timer(IN:= bTimer, PT:= T#3S);
IF timer.Q THEN
    bTimer:= FALSE;
    timer(IN:= bTimer, PT:= T#3S);
    State:= 10;
END_IF

10: //Check Movers st3
CheckMover3(1250, 1500, GVL.StopPos3_0, GVL.StopPos3_1);
IF NOT P_AxesOnStation3 THEN
    axSt3:= axPos3_1;
    State:=20;
END_IF
IF NOT P_AxesOnStation3 AND P_AxesOnStation2 THEN
    gvl.bMoveBusy3:= FALSE;
END_IF

```

```
20://MovAbs3
IF P_AxesOnStation2 AND NOT P_AxesOnStation3 AND AxesOnStation3 = 0 AND NOT gvl.bMoveBusy3 THEN
  MoveAbs(axSt2, GVL.StopPos3_1, GVL.Vel3);
END_IF
IF NOT P_MoveError AND P_AxesOnStation3 THEN
  State:= 30;
ELSE
  State:= 0;
END_IF

30: //Desacople
IF P_AxesOnStation3 THEN
  GearOut(axPos3_0);
  IF P_GearOut THEN
    State:= 0;
  END_IF
END_IF
END_CASE
```

Figura 98. Programación de secuencia hija Sec3

Fuente: TwinCAT 3

La secuencia se basa en lo siguiente:

- Verificación de presencia de movers en la estación 2 a partir de la llamada al método CheckMover2 ().
- Una vez los movers alcanzan la segunda estación, permanecen en ésta durante un tiempo de 3 segundos durante el cual se realizaría el perfil de las lentes. Para ello ha sido necesaria la implementación de un temporizador TON, lo que implica que comienza a contar cuando se activa el trigger.
- Verificación de presencia de movers en la estación 3 a partir de la llamada al método CheckMover3 ().
- Ejecución de la secuencia de movimiento de la estación 2 hacia la estación 3 siempre y cuando haya finalizado el temporizador y no existan movers en la estación 3.
- Verificación de la correcta llegada de los movers hacia la tercera estación y búsqueda de errores durante la secuencia de movimiento.
- Desacople de los movers en la tercera estación a partir de la llamada al método GearOut ().
- El proceso vuelve a repetirse siempre y cuando no existan errores en el desacople.

La cuarta secuencia de movimiento (Sec4) es una clase hija que hereda los métodos y propiedades de la clase padre (Sec), empleándolos de manera secuencial para ejecutar la secuencia de movimiento de la tercera estación hacia Home.

```
FUNCTION_BLOCK Sec4 EXTENDS Sec
VAR_INPUT
    bReady3:      BOOL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    bReadyOut3:   BOOL;
END_VAR
VAR
    axSt4:        UINT;
END_VAR

bReadyOut3:= bReady3;

CASE State OF

    0: //Check movers St3
    CheckMover3(1250, 1500, GVL.StopPos3_0, GVL.StopPos3_1);
    IF P_AxesOnStation3 THEN
        axSt4:= axPos3_1;
        State:=10;
    ELSEIF NOT P_AxesOnStation3 AND AxesOnStation3 > 0 THEN
        axSt4:= axPos3_1;
        State:= 20;
    END_IF
    IF NOT P_AxesOnStation3 AND NOT P_CheckModuloPos3 THEN
        gvl.bMoveBusy4:= FALSE;
    END_IF

    10: //GearOut
    fbGearOut(Slave:= GVL.ax[axSt4-1], Execute:= TRUE);
    MoveAbs(axPos3_0, gvl.StopPos3_1, gvl.Vel3);
    gvl.bMoveBusy4:= FALSE;
    IF P_GearOut THEN
        fbGearOut(Slave:= GVL.ax[axSt4-1],Execute:= FALSE);
        State:= 20;
    END_IF

    20: //Mov4
    IF bReady3 AND NOT gvl.bMoveBusy4 THEN
        MoveAbs(axSt4, gvl.HomePos, gvl.HomeVel);
    END_IF
    IF NOT P_MoveError THEN
        bReadyOut3:= FALSE;
        State:= 0;
    END_IF

END_CASE
```

Figura 99. Programación de secuencia hija Sec4

Fuente: TwinCAT 3

La secuencia se basa en lo siguiente:

- Verificación de la presencia de movers en estación 3, concretamente en el rango de posición 1.250 mm y 1.500 mm.

- Si existen dos movers en dicha estación, pasa al estado 10 para ejecutar la función de desacople de los mismos. De manera contraria, la existencia de un solo mover en dicha estación implica que el mover que se encontraba en la posición axPos3_1 está ejecutando la orden de movimiento hacia Home, lo que implica que la secuencia pase al estado 20 para que el mover restante se dirija también hacia Home, dejando libre la 3 estación.
- En cualquiera de los casos, para que cualquiera de los movers abandone la tercera estación es necesaria la activación de la variable bReady3, la cual sería entregada una vez realizado el pulido y retiradas las piezas de los movers.
- El proceso se repite siempre y cuando no existan errores en la secuencia de movimiento.

El bloque de función definido como XTS_Init incluye una serie de métodos necesarios para la puesta en marcha del XTS. Su estructura se muestra a continuación:



Figura 100. Estructura de XTS_Init en árbol de programa

Fuente: TwinCAT 3

Para que funcione correctamente ha sido necesaria la definición de una serie de variables mostradas en la siguiente figura:

```
FUNCTION_BLOCK XTS_Init
VAR_INPUT
END_VAR
VAR_OUTPUT
END_VAR
VAR
//POWER
fbPower:          ARRAY [0..7] OF MC_POWER;
CheckPower:       BOOL;

//Add Axis To Group
fbAddAxisToGroup: ARRAY [0..GVL.Nummovers] OF MC_AddAxisToGroup;
CheckAddAxis:     BOOL;

//Enable CA Group
fbEnableGroup:    MC_GroupEnable;
CheckEnGroup:    BOOL;

//Reset (Movers & CA Group)
fbReset:          MC_RESET;
fbResetGroup:    MC_GroupReset;
CheckReset:       BOOL;

//Home
fbMoveAbs:        MC_MoveAbsoluteCA;
CheckHome:        BOOL;

//Aux Variables
i:                UINT;
END_VAR
```

Figura 101. Variables internas y bloques de función de XTS_Init

Fuente: TwinCAT 3

La habilitación de los ejes se lleva a cabo a partir de un vector de ocho posiciones del tipo MC_Power mientras que la habilitación del grupo CA se realiza a partir del comando MC_GroupEnable.

Para la inclusión de los movers en el grupo CA es necesaria la definición de un vector de ocho posiciones del tipo MC_AddAxisToGroup, de manera que los ejes se van añadiendo al grupo secuencialmente.

Finalmente, se han definido funciones para el reseteo de los ejes (a partir del comando MC_Reset), el reseteo del grupo CA (a partir del comando MC_GroupReset) y la ejecución del movimiento hacia Home (MC_MoveAbsoluteCA).

La programación de cada uno de los métodos se incluye a continuación:

- MoverEnable: método encargado de habilitar cada uno de los movers del XTS.

```
FOR i:= 0 TO GVL.Nummovers DO  
  
    fbPower[i](Axis:= GVL.ax[i], Enable:= TRUE, Enable_Positive:= TRUE, Enable_Negative:= TRUE);  
  
END_FOR
```

Figura 102. Programación de método MoverEnable de XTS_Init

Fuente: TwinCAT 3

- EnableGroup: método encargado de habilitar el grupo CA definido en la lista de variables globales (GVL).

```
fbEnableGroup(AxesGroup:= GVL.axGroup, Execute:= TRUE);
```

Figura 103. Programación de método EnableGroup de XTS_Init

Fuente: TwinCAT 3

- AddAxisToGroup: método destinado a añadir cada uno de los movers al grupo CA, de manera que éstos no colisionen.

```
FOR i:= 0 TO GVL.Nummovers DO  
  
    fbAddAxisToGroup[i](AxesGroup:= GVL.axGroup, Axis:= GVL.ax[i], Execute:= FALSE, IdentInGroup:= UDINT_TO_IDENTINGROUP(i));  
    fbAddAxisToGroup[i](AxesGroup:= GVL.axGroup, Axis:= GVL.ax[i], Execute:= TRUE, IdentInGroup:= UDINT_TO_IDENTINGROUP(i));  
  
    IF fbAddAxisToGroup[i].Error AND CheckAddAxis THEN  
        CheckAddAxis:= FALSE;  
        ELIF NOT fbPower[i].Error AND NOT CheckAddAxis THEN  
            CheckAddAxis:= TRUE;  
    END_IF  
  
END_FOR
```

Figura 104. Programación de método AddAxisToGroup de XTS_Init

Fuente: TwinCAT 3

- Home: método definido para que los movers se dirijan hacia la posición de Home en el momento de arranque del XTS.

```
FOR i:= 0 TO GVL.Nummovers DO  
  
    fbMoveAbs(Axis:= GVL.ax[i],Execute:= TRUE, Position:= GVL.HomePos, Velocity:= GVL.HomeVel, Gap:= 90, Direction:= 1);  
    fbMoveAbs(Axis:= GVL.ax[i],Execute:= FALSE, Position:= GVL.HomePos, Velocity:= GVL.HomeVel, Gap:= 90, Direction:= 1);  
  
END_FOR
```

Figura 105. Programación de método Home de XTS_Init

Fuente: TwinCAT 3

- Reset: método destinado a resetear tanto los ejes como el grupo CA en caso de fallo del programa principal XTS.

```
FOR i:= 0 TO GVL.Nummovers DO

  //Reset Movers
  fbReset(axis:= GVL.ax[i], Execute:= TRUE);
  fbReset(axis:= GVL.ax[i], Execute:= FALSE);

  //Reset Group
  fbResetGroup(AxesGroup:= GVL.axGroup, Execute:= TRUE);
  fbResetGroup(AxesGroup:= GVL.axGroup, Execute:= FALSE);

  IF fbReset.Error AND fbResetGroup.Error AND CheckReset THEN
  CheckReset:= FALSE;
  ELSIF NOT fbReset.Error AND NOT fbResetGroup.Error AND NOT CheckReset THEN
    CheckReset:= TRUE;
  END_IF

END_FOR
```

Figura 106. Programación de método Reset de XTS_Init

Fuente: TwinCAT 3

El bloque de función definido como XTS_InitEnvironment tiene el objetivo de proporcionar acceso a la información del XTS. Su estructura en el árbol de programa se muestra a continuación:



Figura 107. Estructura de XTS_InitEnvironment en árbol de programa

Fuente: TwinCAT 3

Para el correcto funcionamiento de este bloque, ha sido necesaria la definición de una serie de variables, las cuales se observan en la siguiente figura:

```
FUNCTION_BLOCK XTS_InitEnvironment
VAR_INPUT
END_VAR
VAR_OUTPUT
    //Check Home Position
    axHome:          UINT;
    //Check Init Environment
    bDone:           BOOL;
END_VAR
VAR
    fbXtsEnvironment:    FB_TcIoXtsEnvironment;
    stXtsEnvironmentConfig: ST_XtsEnvironmentConfiguration;

    NumMovers:          UINT;

    //Check Home Position

    i:                  UINT;
    State:              INT;
END_VAR
```

Figura 108. Declaración de variables para XTS_InitEnvironment

Fuente: TwinCAT 3

La secuencia de este bloque de función se centra en la inicialización del denominado Info Server, lo cual posibilita la transmisión de información sobre la configuración y el estado del XTS y la verificación del correcto proceso de inicialización.

```
CASE State OF

0: //Init XTS Environment

    bDone:= FALSE;

    //Enable Init info server
    stXtsEnvironmentConfig.bEnableInitInfoServer:= TRUE;
    //Enable Init CA group
    stXtsEnvironmentConfig.bEnableInitCaGroup:= TRUE;
    //Set configuration of XtsUtility
    fbXtsEnvironment.P_XtsEnvironmentConfiguration:= stXtsEnvironmentConfig;

    State:= 1;

1: //Start Init
IF fbXtsEnvironment.Init(TRUE) THEN
    fbXtsEnvironment.Init(FALSE);

    State:= 2;
END_IF

2: //Check Init
IF fbXtsEnvironment.P_IsInitialized THEN
    State:= 10;
END_IF

10: //Write Check Variables
    State:= 20;

20: //Init Environment Done
    bDone:= TRUE;

END_CASE
```

Figura 109. Programación de XTS_InitEnvironment

Fuente: TwinCAT 3

Una vez comentada la funcionalidad de cada uno de los bloques de función, se procede a explicar el programa principal, denotado como XTS (PRG). Su estructura en el árbol de programa se muestra a continuación:

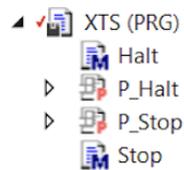


Figura 110. Estructura de programa principal XTS en árbol de programa

Fuente: TwinCAT 3

Se puede observar la presencia de dos métodos, relativos a la detención y parada manual del sistema. La principal diferencia entre Halt y Stop es que la ejecución del comando Stop bloquea el movimiento de los ejes, siendo necesario el reseteo manual de los mismos para la ejecución de otra secuencia de movimiento, mientras que el comando Halt detiene el movimiento de los ejes sin bloquearlos.

Para que el sistema funcione correctamente ha sido necesario definir una serie de variables, las cuales se muestran a continuación:

```
PROGRAM XTS
VAR
  //XTS Environment
  fbXtsInitEnv:      XTS_InitEnvironment;
  bexecuteEnv:      BOOL;
  bDoneEnv:         BOOL;

  //XTS Init (Power, AddMoversToGroup, EnableGroup)
  fbXtsInit:        XTS_Init;

  //Start
  PulStart AT %I+:   BOOL; //Vincular
  bStart:          BOOL;
  trigger_Start:    R_TRIG;

  //Stop
  PulStop AT %I+:   BOOL; //Vincular
  CheckStop:       BOOL;
  trigger_Stop:     R_TRIG;
  fbStop:          MC_Stop;

  //Halt
  PulHalt AT %I+:   BOOL; //Vincular
  CheckHalt:       BOOL;
  fbHalt:          MC_Halt;
  trigger_Halt:    R_TRIG;

  //Reset
  PulReset AT %I+:  BOOL;
  trigger_Reset:   R_TRIG;

  //Sec1
  fbSec1:          Sec1;

  //Sec2
  fbSec2:          Sec2;
  bReady1:        BOOL;
  bReady2:        BOOL;
```

```
//Sec3
fbSec3:          Sec3;

//Sec4
fbSec4:          Sec4;
bReady3:        BOOL;

State:          INT;
i:              UINT;

END_VAR
```

Figura 111. Declaración de variables de programa principal XTS

Fuente: TwinCAT 3

Se ha definido una variable para cada clase hija (Sec1, Sec2, Sec3 y Sec4) además de una variable del tipo XTS_Init y XTS_InitEnvironment, las cuales serán instanciadas en el programa principal. Adicionalmente, se han declarado bloques de función del tipo MC_Halt y MC_Stop, las cuales instanciarán a los métodos de detención comentados previamente.

Además, se han definido las siguientes variables binarias:

- bReady1, bReady2 y bReady3: relativas a las señales de deposición y retirada de las lentes sobre los soportes de los movers, las cuales serán transferidas como entradas a las instancias de Sec1 y Sec3 respectivamente.
- PulStart, PulStop, PulHalt y PulReset: relativas a los pulsadores físicos cuya activación iniciará, detendrá o reiniciará el sistema según la variable que se active. Se debe tener en cuenta que estas variables deberán ser vinculadas con los pulsadores del HMI.
- bExecuteEnvironment y bDoneEnv: cuya utilidad es la inicialización del Environment del XTS y la verificación de que el proceso de inicialización ha sido realizado correctamente.

La programación del sistema de control principal del sistema XTS que engloba todos los métodos y propiedades incluidos en el proyecto se describe a continuación:

Se ha implementado una sentencia CASE donde cada uno de los estados corresponde con una fase del funcionamiento del XTS.

Fuera del case se han definido las siguientes secuencias con el objetivo de otorgarles una mayor prioridad con respecto a las secuencias incluidas en el CASE, éstas se describen a continuación:

- Start: inicia la ejecución de la secuencia Sec1 cuando se activa el pulsador PulStart. Para ello, los movers deben encontrarse en la posición de Home.

```
//Start
trigger_Start(CLK:= PulStart);
IF trigger_Start.Q THEN
    bStart:= TRUE;
END_IF
```

Figura 112. Programación de secuencia Start en programa XTS

Fuente: TwinCAT 3

- Stop: detiene el funcionamiento del sistema cuando se activa el pulsador PulStop. Debido a que la ejecución del comando MC_Stop bloquea los ejes, es necesario un reseteo manual de los mismos a partir de la activación del pulsador PulReset. En consecuencia, el sistema queda detenido en un estado de espera (estado 100) hasta que se active PulReset y PulStart de nuevo.

```
//Stop
trigger_Stop(CLK:= PulStop);
trigger_Reset (CLK:= PulReset);
IF trigger_Stop.Q THEN
    Stop();
    State:= 100;
    IF P_Stop AND trigger_Reset.Q AND bStart THEN
        State:= -10;
    END_IF
END_IF
```

Figura 113. Programación de secuencia Stop en programa XTS

Fuente: TwinCAT 3

Se debe tener en cuenta que la ejecución del comando MC_Stop detiene individualmente cada uno de los movers a partir de un bucle FOR e informa sobre el resultado del proceso de detención.

```
FOR i:= 0 TO GVL.Nummovers DO

    fbStop(axis:= GVL.ax[i], Execute:= TRUE);
    fbStop(axis:= GVL.ax[i], Execute:= FALSE);

    IF fbStop.Error AND XTS.CheckStop THEN
        XTS.CheckStop:= FALSE;
    ELSIF NOT fbStop.Error AND NOT XTS.CheckStop THEN
        XTS.CheckStop:= TRUE;
    END_IF

END_FOR
```

Figura 114. Programación de método Stop

Fuente: TwinCAT 3

- Halt: detiene el funcionamiento del sistema cuando se activa PulHalt. Debido a que la ejecución del comando MC_Halt no produce el bloqueo de los ejes, no es necesario el reinicio de los mismos y basta con que el pulsador PulHalt no se encuentre activo para reiniciar el sistema desde el estado 0.

```
//Halt
trigger_Halt(CLK:= PulHalt);
IF trigger_Halt.Q THEN
    Halt();
    IF P_Halt AND NOT trigger_Halt.Q THEN
        State:= 0;
    END_IF
END_IF
```

Figura 115. Programación de secuencia Halt en programa XTS

Fuente: TwinCAT 3

De igual manera que con MC_Stop, la ejecución del comando MC_Halt detiene individualmente cada uno de los movers a partir de un bucle FOR e informa sobre el resultado del proceso de detención, esto es, si ha sido realizado correctamente o se han producido errores.

```
FOR i:= 0 TO GVL.Nummovers DO

    fbHalt(axis:= GVL.ax[i], Execute:= TRUE);
    fbHalt(axis:= GVL.ax[i], Execute:= FALSE);

    IF fbHalt.Error AND XTS.CheckHalt THEN
        XTS.CheckHalt:= FALSE;
    ELSIF NOT fbHalt.Error AND NOT XTS.CheckHalt THEN
        XTS.CheckHalt:= TRUE;
    END_IF

END_FOR
```

Figura 116. Programación de método Halt

Fuente: TwinCAT 3

- Se ha definido una condición que verifica que los ejes NC no se encuentren en estado de error. Si es el caso, el sistema pasa al estado -10 de la secuencia CASE, donde se ejecuta un reinicio de los mismos.

```
//Verificación de error en eje
FOR i:= 0 TO GVL.Nummmovers DO
  IF AxisStatus[i].Error THEN
    State:= -10;
  END_IF
END_FOR
```

Figura 117. Verificación de errores en los ejes NC

Fuente: TwinCAT 3

La programación de las secuencias incluidas en el case se muestra a continuación:

```
CASE State OF

-10://RESET
fbXtsInit.Reset();
IF fbXtsInit.P_CheckReset THEN
  State:= 10;
END_IF

0: //Init Environment
bexecuteEnv:= TRUE;
fbXtsInitEnv(bDone=> bDoneEnv);
bexecuteEnv:= FALSE;
IF bDoneEnv THEN
  State:= 10;
END_IF

10: //POWER
fbXtsInit.MoverEnable();
IF fbXtsInit.P_CheckMoverEnable THEN
  State:= 20;
ELSE
  State:= -10;
END_IF

20: //Add Axis To Group
fbXtsInit.AddAxisToGroup();
IF fbXtsInit.P_CheckAddAxis THEN
  State:= 30;
ELSE
  State:= -10;
END_IF
```

```
30: //Enable Group
fbXtsInit.EnableGroup();
IF fbXtsInit.P_EnGroup THEN
    State:= 40;
ELSE
    State:= -10;
END_IF

40: //Home
fbXtsInit.Home();
IF fbXtsInit.P_CheckHome AND bStart THEN
    bStart:= FALSE;
    State:= 50;
END_IF

50: //Sec1
fbSec1();
IF fbSec1.P_AxesOnStation THEN
    State:= 60;
END_IF

60: //Sec2
IF bReady1 AND bReady2 THEN
    fbSec2(bReady1:= bReady1, bReady2:= bReady2);
    bReady1:= fbSec2.bReadyOut1;
    bReady2:= fbSec2.bReadyOut2;
END_IF
IF fbSec2.P_AxesOnStation2 AND fbSec1.P_AxesOnStation THEN
    State:= 70;
ELSE
    State:= 50;
END_IF

70: //Sec3
fbSec3();
IF fbSec3.P_AxesOnStation3 OR fbSec3.AxesOnStation3 > 0 THEN
    State:=80;
END_IF

80://Sec4
IF bReady3 THEN
    fbSec4(bReady3:= bReady3);
    bReady3:= fbSec4.bReadyOut3;
END_IF
State:= 50;

100: //Espera

END_CASE
```

Figura 118. Programa principal XTS

Fuente: TwinCAT 3

El proceso se basa en lo siguiente:

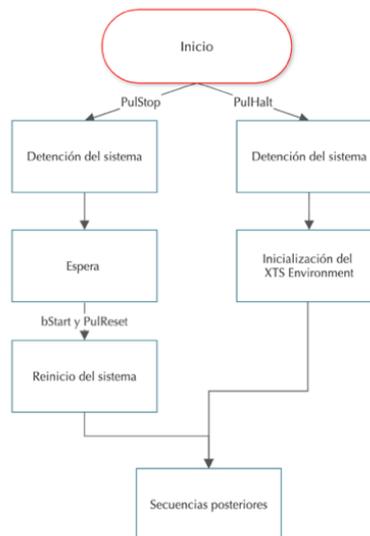
- Reinicio del sistema en caso de fallo. Si este proceso se realiza correctamente, se pasa al siguiente estado (estado 0).
- Inicialización del Environment del XTS para posibilitar la transferencia de información. Esta fase (estado 0) es la fase inicial por defecto del sistema. Si este proceso se realiza correctamente, pasa al siguiente estado (estado 10).

- Habilitación de los movers del XTS a partir de la llamada al método `fbXtsInit.MoverEnable ()`. Si el resultado del proceso de habilitación es correcto, pasa al siguiente estado (estado 20).
- Inclusión de los ejes en el grupo de collision avoidance a partir de la llamada al método `fbXtsInit.AddAxisToGroup ()`. Si el resultado de este proceso es correcto, pasa al estado 30. En caso de fallo en la inclusión de los ejes en el grupo CA, se retorna al estado inicial -10, donde se resetean los ejes.
- Habilitación del grupo CA a partir de la llamada al método `fbXtsInit.EnableGroup ()`. Si el resultado de este proceso es correcto se pasa al estado 40. En caso de existir un fallo en el proceso de habilitación del grupo, se retorna al estado inicial -10.
- Ejecución de la secuencia Home a partir de la llamada al método `fbXtsInit.Home`, a partir del cual los movers se dirigen desde la posición en la que se encuentren en ese momento hacia la posición de Home.
- Ejecución de la primera secuencia de movimiento de los movers (Sec1) desde la posición de Home hacia las posiciones de parada en la estación 1. Para ello, los movers deben haberse acoplado correctamente y se debe encontrar activa la señal de inicio `bStart` (a partir de la activación del pulsador `PulStart`).
- Una vez alcanzada dicha estación, si se activan las señales `bReady 1` y `bReady2` los movers ejecutarán el movimiento hacia las posiciones de parada de la estación 2 encontrándose acoplados. En ese momento, dos nuevos movers ocuparán la estación 1.
- Los movers permanecerán en la estación 2 un tiempo de tres segundos desde el momento de llegada a la estación, donde se generará el perfil de la cara posterior de las lentes. Una vez transcurrido dicho tiempo, éstos se dirigirán hacia la estación 3 a partir de la llamada al método `Sec3 ()` y los movers que se encuentren en la primera estación avanzarán acoplados hacia la segunda estación.
- Los movers permanecerán en la estación 3 hasta que se active la señal `bReady3` dos veces, lo que supone la finalización del proceso de pulido y la retirada de las piezas. Se debe tener en cuenta que hasta que la tercera estación no quede libre, no se producirá el movimiento de los movers de la

estación 2, a pesar de que haya transcurrido el tiempo de espera en dicha estación.

- Una vez activa la señal bReady3, los movers se dirigen desacoplados hacia la posición de Home y el proceso vuelve a repetirse.

Con el objetivo de facilitar el entendimiento de las secuencias que componen el programa, se ha desarrollado un diagrama de flujo, el cual es observable a continuación:



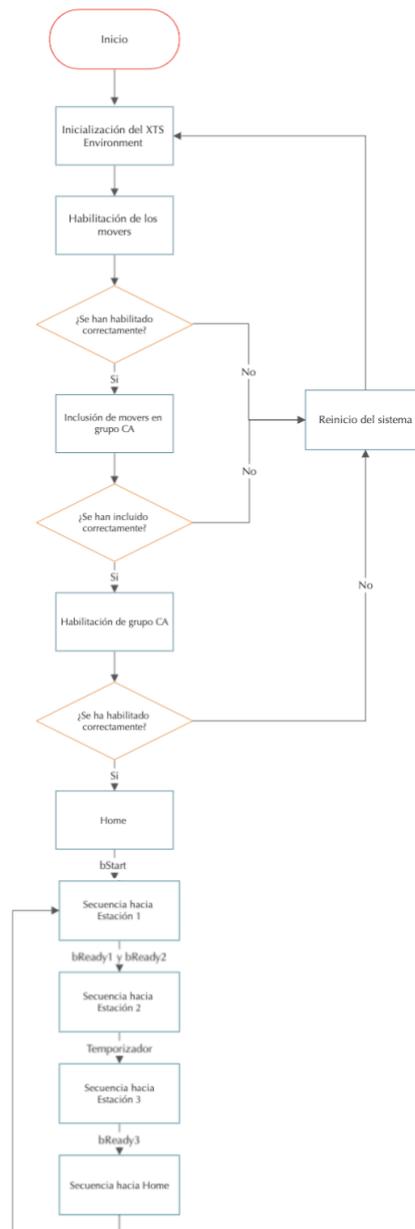


Figura 119. Diagrama de flujo completo del XTS

Fuente: Beckhoff Automation

Como se puede observar, la metodología de programación empleada otorga una gran simplicidad al código principal del XTS, sin necesidad de incluir los métodos y propiedades internos de cada una de las secuencias en el código principal.

3.4 Motion

3.4.1 Programación de sección Motion

La creación del proyecto de Motion se realiza automáticamente en el instante de escaneo de los dispositivos, para lo cual es necesario que TwinCAT se encuentre en modo Configuración. Esto implica la creación de las tareas SBV y SAF del proyecto de Motion y la inclusión de los diferentes ejes lógicos, uno por cada mover del XTS.

Para comprender el funcionamiento de esta sección se deben tener en cuenta una serie de aspectos.

En primer lugar, se basa en el control de ejes PTP (Point to Point), esto es, punto a punto, de manera que los ejes son representados como objetos y proporcionan una interfaz con el proyecto de PLC, posibilitando la lectura de todos los parámetros de los ejes. Admite el control de hasta 255 ejes por CPU, así como funciones como acoplamiento lineales, no lineales o al vuelo (también conocido como flying saw). Sigue el formato PLCOpen y la programación se realiza según el estándar IEC 61131-3.



Figura 120. PLC/NC PTP Motion

Fuente: Beckhoff Automation

En segundo lugar, un proyecto de motion debe ser interpretado como una capa lógica que actúa como intermediario entre el hardware y la secuencia de control del eje en el proyecto del PLC. De manera que el PLC entrega instrucciones al eje lógico y éste es el encargado de transmitir las al eje físico (hardware). Esta estructura proporciona una comunicación cíclica bidireccional y mayor flexibilidad ante cambios, posibilitando la realización de modificaciones en el hardware sin necesidad de modificar el proyecto del PLC.

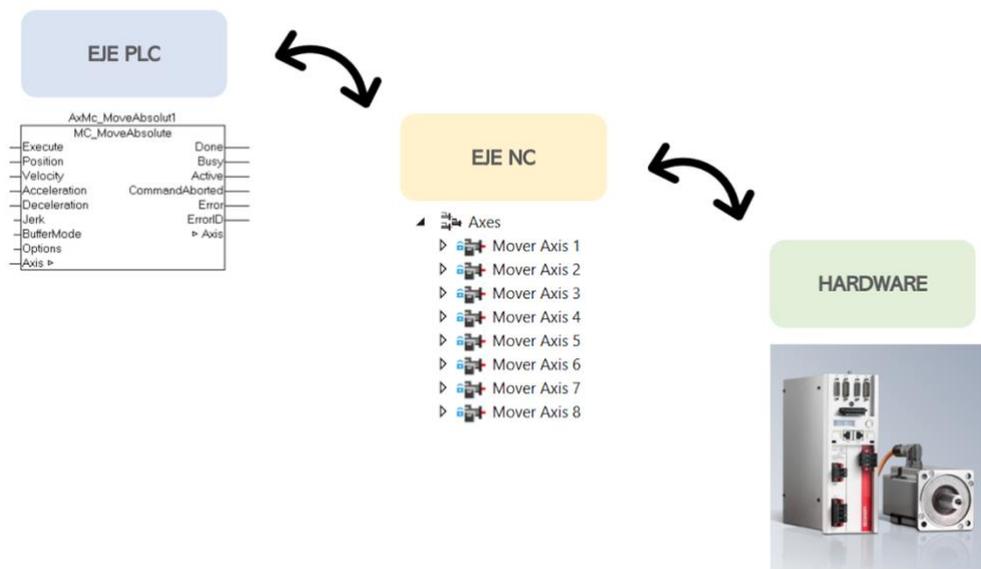


Figura 121. Estructura proyecto Motion

Fuente: Elaboración propia

En tercer lugar, se deben diferenciar entre las tareas SVB y SAF. La tarea SVB es la encargada de generar los perfiles de posición y velocidad de cada eje según las órdenes del PLC mientras que la tarea SAF es la encargada de entregar la consigna de velocidad y posición al servodrive.

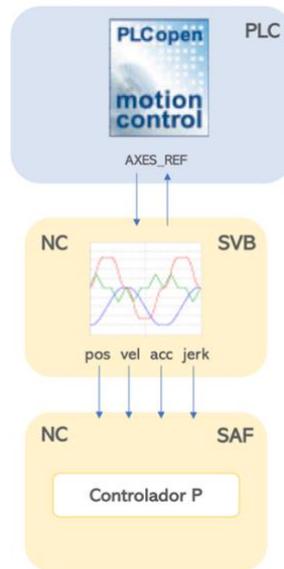


Figura 122. Tareas proyecto Motion

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se ha incluido un objeto relativo al grupo de Collision Avoidance, el cual evita la colisión entre los movers. Este aparece en el Solution Explorer con el nombre Group 1 (CA Group), lo cual es observable en la siguiente figura:

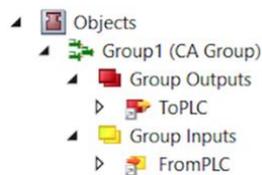


Figura 123. Grupo de Collision Avoidance

Fuente: TwinCAT 3

Para que el grupo de collision avoidance funcione correctamente es necesario realizar la vinculación de los parámetros de salida y los parámetros de entrada. Las salidas del grupo CA son aquellas que van desde la capa lógica NC al PLC mientras que las entradas del grupo van desde el PLC a NC. Esto se realiza pulsando el botón derecho y seleccionando la opción Change Link.

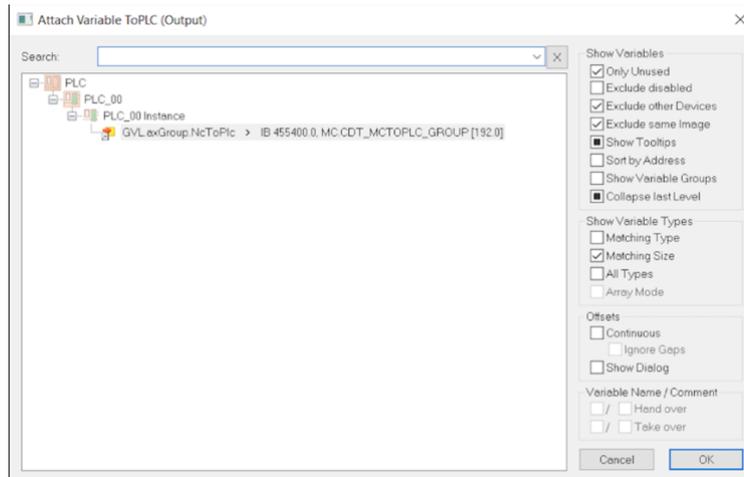
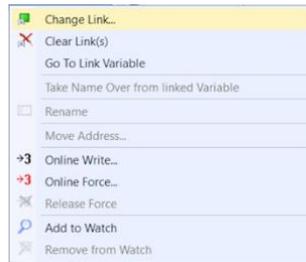


Figura 124. Vinculación variables grupo CA

Fuente: TwinCAT 3

Con respecto a los ejes NC, encontramos diferentes secciones:

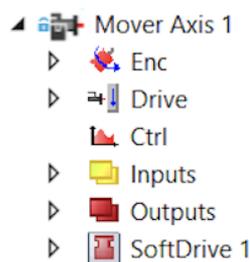


Figura 125. Configuración parámetros de eje NC

Fuente: TwinCAT 3

En primer lugar, la sección denotada como Enc hace referencia a la configuración del encoder del eje NC, la cual no ha sido necesario modificar. En segundo lugar, la sección Drive es relativa a la configuración del drive del eje NC, que realiza el control (sección Ctrl) a partir de un regulador P (Proporcional), admitiendo la posibilidad de llevar a cabo un control PI o PID. Finalmente, se observan las secciones denotadas

como Inputs y Outputs, las cuales hacen referencia a la imagen del proceso de comunicación con la tarea del PLC y requieren ser vinculadas para cada uno de los ejes respectivamente.

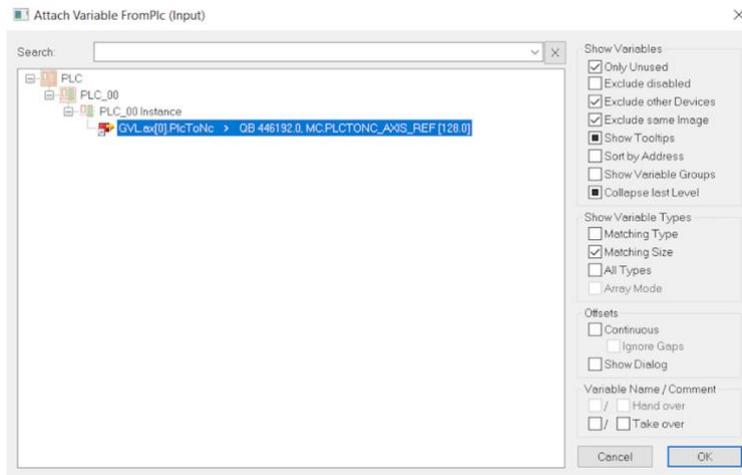


Figura 126. Vinculación de ejes entre proyecto PLC y NC

Fuente: TwinCAT 3

Finalmente, en la sección SoftDrive se debe especificar la tarea XTS a ejecutar, lo cual se realiza en la pestaña Context.

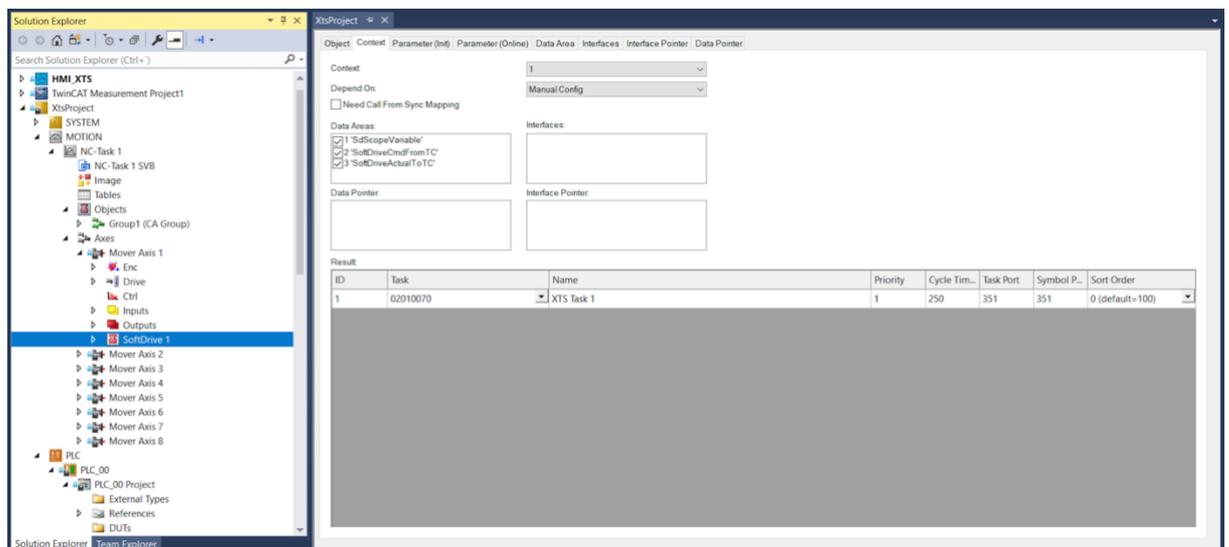


Figura 127. Configuración SoftDrive Axis 1

Fuente: TwinCAT 3

Una de las principales ventajas que ofrece esta disposición es la posibilidad de observar en tiempo real el estado y los parámetros de cada uno de los ejes NC, lo cual se realiza en la pestaña Online del eje NC.

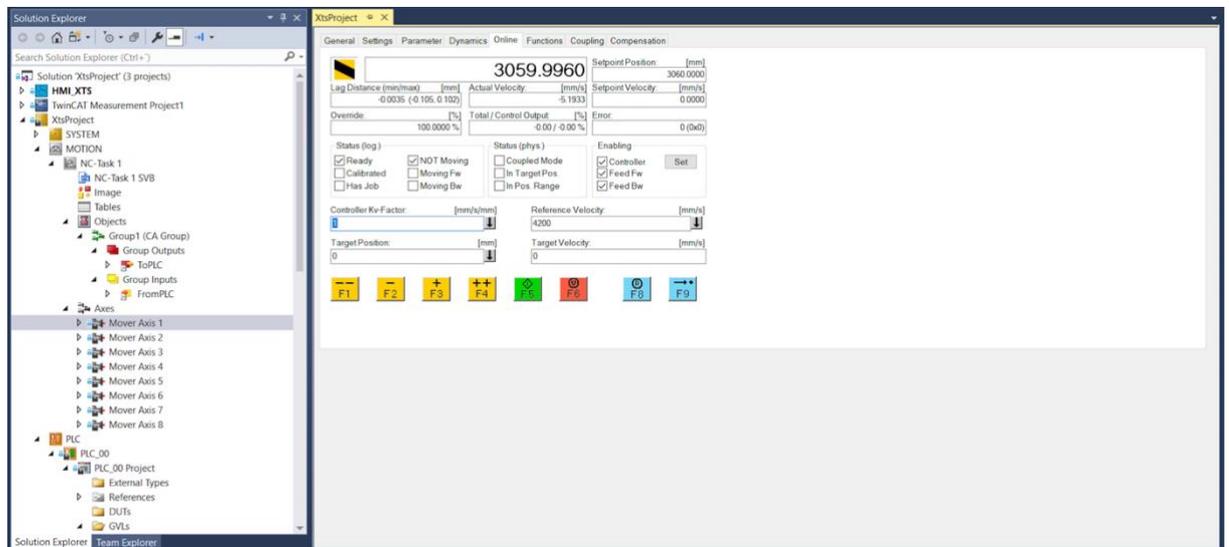


Figura 128. Online Axis 1

Fuente: TwinCAT 3

Aquí se puede observar el estado del eje (habilitado, en movimiento, acoplado etc) así como los parámetros de consigna de posición (Setpoint Position), consigna de velocidad (Setpoint Velocity), posición y velocidad actual, error de posición (Lag Distance) o identificador del error, en caso de fallo.

Una vez detallada la estructura de la capa lógica, se procede a comentar la secuencia típica que posibilita el funcionamiento del sistema y el movimiento de los movers.

- Definición de los ejes en el proyecto de PLC a partir del identificador AXIS_REF incluido en la librería Tc2_Mc2.
- Vinculación de los ejes del proyecto de PLC con los ejes lógicos de la capa NC.
- Habilidad de ejes a través de una función incluida en la librería Tc2_MC2, cuyo nombre es MC_Power.
- Programación y ejecución de las secuencias de movimiento a partir de funciones predefinidas como MC_MoveAbsolute, MC_MoveRelative, MC_MoveVelocity etc.

En este proyecto, al tratarse de un sistema XTS con la funcionalidad de collision avoidance, la secuencia varía ligeramente de la siguiente manera:

- Definición de los ejes en el proyecto de PLC a partir del identificador `AXIS_REF` incluido en la librería `Tc2_Mc2`.
- Definición del grupo CA a partir del identificador `AXES_REF` incluido en la librería `Tc3_McCoordinatedMotion`.
- Vinculación de los ejes del proyecto de PLC con los ejes lógicos de la capa NC.
- Inicialización del Environment del XTS.
- Habilitación de ejes a través de una función incluida en la librería `Tc2_MC2`, cuyo nombre es `MC_Power`.
- Inclusión de los ejes en el grupo CA a partir de un vector de ocho posiciones (0 a 7) de tipo `MC_AddAxisToGroup`, incluida en la librería `Tc3_McCoordinatedMotion`.
- Habilitación del grupo CA a partir de función predefinida y denotada como `MC_GroupEnable` incluida en la librería `Tc3_McCoordinatedMotion`.
- Programación de la secuencia de movimiento a partir de funciones como `MC_MoveAbsoluteCA`, incluida en la librería `Tc3_McCoordinatedMotion`.

En caso de que se desee el movimiento acoplado de los movers, este debe realizarse a partir de un comando definido en la librería `Tc3_McCoordinatedMotion`, cuyo nombre es `MC_GearInPosCA`. El desacople de los mismos se realiza a partir de `MC_GearOut`.

3.5 Interfaz HMI

3.5.1 Programación de sección TwinCAT HMI

La creación del proyecto de HMI se realiza añadiendo en la parte superior del Solution Explorer un nuevo proyecto, lo cual es posible pulsando el botón derecho y seleccionando `Add – New Project – TwinCAT HMI Project`. Esto es observable a continuación:

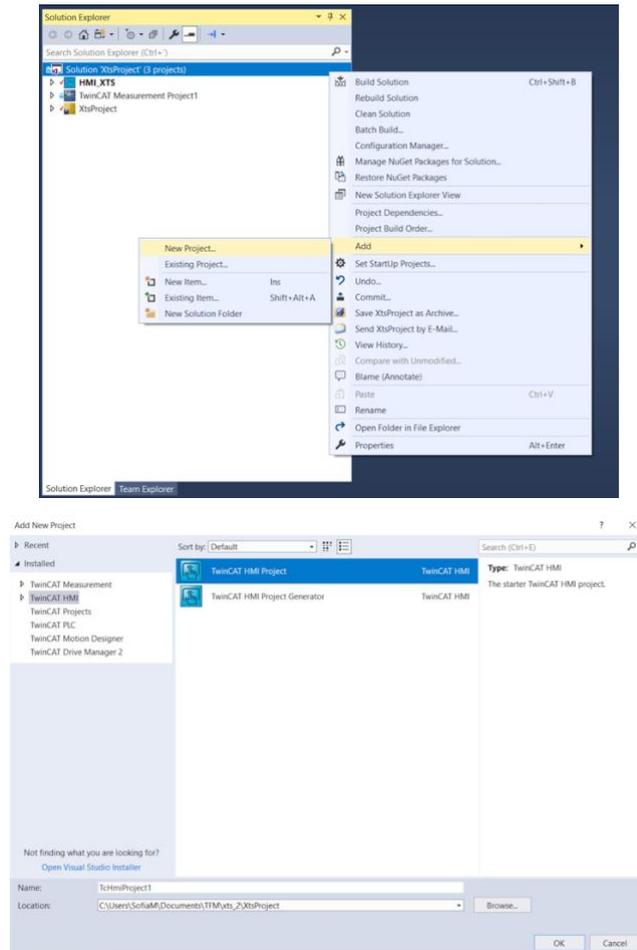


Figura 129. Creación de proyecto TwinCAT HMI

Fuente: TwinCAT 3

Un proyecto de TwinCAT HMI permite desarrollar una interfaz hombre – máquina para la visualización de un proyecto desarrollado en TwinCAT 3, TwinCAT 2 o en un software de terceros siempre y cuando la comunicación se realice a través de OPC/UA (Open Process Control / Unified Architecture).

Se trata de una herramienta de desarrollo que se encuentra integrada dentro de Visual Studio y basada en tecnologías WEB estándar como CSS, JS o HTML.

Algunas de las ventajas de esta herramienta son el uso de un editor gráfico en el que no es necesaria la programación de código, pudiendo realizarse tanto en la parte de cliente (en JavaScript) como en la parte de servidor (a partir de una extensión del

servidor en C). Además, al tratarse de un producto multiprotocolo, multiciente, multiservidor y multiruntime permite el uso de diversas arquitecturas, así como ofrece la posibilidad de generar un diseño “responsive”, esto es, que se adapte a la resolución y orientación del cliente que lo ejecute, que en nuestro caso es una pantalla.

Para comprender el funcionamiento de esta sección se deben tener en cuenta una serie de aspectos.

En primer lugar, la resolución de la pantalla es 768 x 1.366 píxeles y la orientación es vertical, lo cual debe tenerse en cuenta para la creación y el diseño del contenido a mostrar. Para dotar de una mayor flexibilidad al proyecto HMI, el contenido a mostrar se ha realizado siguiendo un diseño “responsive”, lo cual permite su adaptación automática sobre la pantalla en la que se desee mostrar, sin necesidad de realizar ajustes o cambios. Esto se realiza ajustando la posición y el tamaño de los diferentes componentes (pulsadores, gráficos etc) de manera proporcional a la resolución total de la pantalla, lo cual será explicado posteriormente.

En segundo lugar, la comunicación entre el cliente (panel HMI) y el servidor (PC industrial) se realiza a través de ADS por el puerto 851 (PLC) por tratarse ambos equipos de Beckhoff Automation, lo cual facilita considerablemente el establecimiento de la comunicación y la transferencia de información.

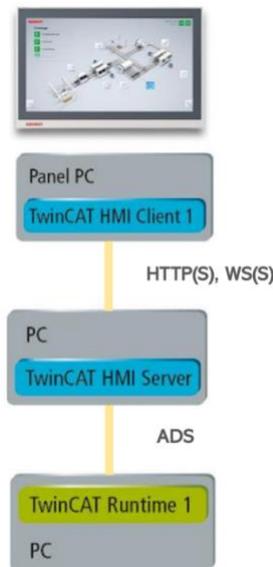


Figura 130. Arquitectura cliente - servidor HMI

Fuente: Elaboración Propia

En tercer lugar, para llevar a cabo el diseño del proyecto es necesario instalar el paquete de ingeniería TE2000 en la página web de Beckhoff Automation, así como la inclusión de las licencias correspondientes según el número de clientes. Los requisitos para la instalación de la última versión v1.12 se encuentran recogidos en la siguiente tabla:

Tabla 2. Requisitos para instalación de TE2000

Fuente: Beckhoff Automation

Datos técnicos	Versión 1.12
Versión mínima de TwinCAT	3.1.4024.0
Nivel mínimo de TwinCAT	TC1000 TC3 ADS
Versiones soportadas de VS*	2017 Version >= 15.9 (Community, Professional) with ASP.NET
	2019 Version >= 16.4 (Community, Professional)
	TwinCAT XAE Shell (TcXaeShell)
Sistema operativo soportado	Windows 10 (32-/64-bit)
Versión mínima de .NET Framework SDK	>= 4.8
Versión mínima de .NET Core SDK	>= 3.1

Este paquete constituye una extensión dentro del IDE de Visual Studio y hace referencia al entorno de desarrollo en que se llevará a cabo la edición gráfica del

proyecto. Ofrece funcionalidades como la gestión avanzada de usuarios, múltiples controles (gestión de recetas, restricciones de acceso con contraseña, visualización de la fecha y hora actual, funciones de audio, visualización de eventos etc) o la integración de gráficos. Además, el editor gráfico permite probar la visualización de manera online a través del “Live View”, sin necesidad de publicarla en el servidor. De esta manera, se puede corroborar que el funcionamiento del HMI coincida con el deseado y en caso de no ser así, realizar las modificaciones pertinentes.

Se debe tener en cuenta que existirán tantos servidores de desarrollo corriendo en segundo plano en el equipo de ingeniería como proyectos HMI abiertos debido a que en el momento en que se está desarrollando en Visual Studio un proyecto HMI, se ejecuta automáticamente un servidor de desarrollo en que probar el funcionamiento previamente a la publicación en el servidor TF2000. Los servidores de desarrollo se ejecutarán en los puertos 30xx del equipo de ingeniería, en este caso es el puerto 3000.

Una vez finalizado el desarrollo del proyecto HMI en el TE2000, éste debe publicarse en un servidor TF2000 que se encuentre instalado en el equipo. La instalación del TF2000 puede realizarse a través del archivo ejecutable descargado de la página web de Beckhoff Automation y deben incluirse las licencias correspondientes.

El TF2000 puede servir la página web en el puerto 1010 o 1020, en función de si se desea incluir seguridad SSL/TLS (HTTPS). En este proyecto, el servidor TF2000 se ejecuta a través del puerto 1010 (sin seguridad).

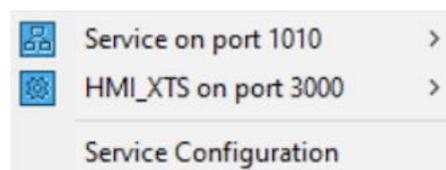


Figura 131. Puertos para TE2000 y TF2000

Fuente: TwinCAT 3

Se debe tener en cuenta que, a partir de la versión 1.12 del TF2000, el servidor arranca en el momento de inicio del sistema operativo, de manera que la interfaz se encuentre disponible en todo momento.

Con respecto a las licencias correspondientes, la instalación del TE2000 es gratuito y no requiere la inclusión de licencias mientras que la licencia mínima para el servidor TF2000 es la denominada TF2000 TC3 HMI Server, la cual incluye un cliente, un servidor HMI y una conexión a un target (runtime), lo cual es suficiente para la aplicación desarrollada.

Una vez comentado el entorno de desarrollo y el servidor, se procede a comentar la estructura predeterminada que se genera en el momento de creación de un proyecto HMI.

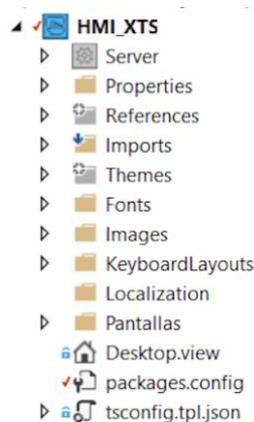


Figura 132. Estructura de proyecto HMI

Fuente: TwinCAT 3

La funcionalidad de cada una de las secciones se describe a continuación:

- Server: permite realizar la configuración del servidor de desarrollo TF2000.
- Properties: permite realizar la configuración del proyecto en formato JavaScript.

- References: relativo a la inclusión de los paquetes Nuget correspondientes. Los paquetes Nuget son unidades de código reutilizables que pueden ser integradas en Visual Studio y TwinCAT.

Para este proyecto ha sido necesario incluir paquetes relativos al XTS, a la visualización de gráficas (Scope) y a la visualización de archivos en PDF.

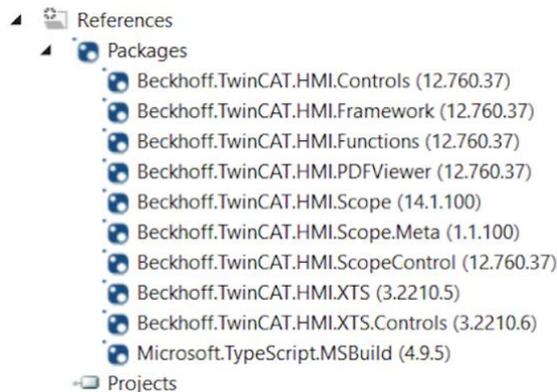


Figura 133. Inclusión de paquetes Nuget

Fuente: TwinCAT 3

- Imports: aquí se deben incluir las imágenes y vídeos que se deseen mostrar en el HMI. Es importante tener en cuenta que éstas deben encontrarse en el directorio del proyecto de manera que sea posible acceder a las mismas. Además, se han incluido los archivos de documentación en formato PDF que mostrará cada una de las pantallas secundarias, así como un vídeo que aparecerá en la pantalla inicial.

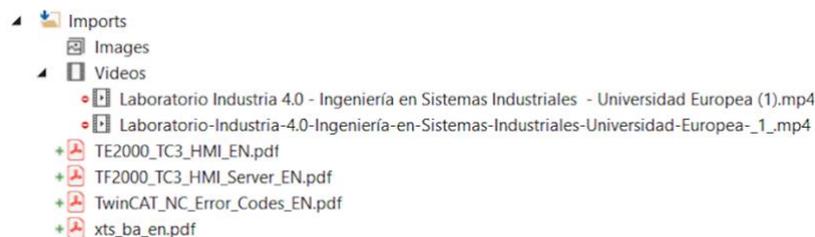


Figura 134. Sección Imports de proyecto HMI

Fuente: TwinCAT 3

- Themes: relativo a la gestión de temas y plantillas CSS.

- Fonts: relativo a la fuente.
- Images: similar a la sección *Imports* con la diferencia de que en esta sección se almacenan las imágenes.

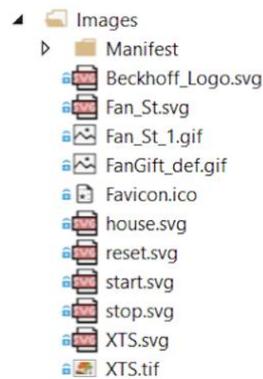


Figura 135. Sección Images de proyecto HMI

Fuente: TwinCAT 3

- KeyboardLayouts: destinado a la gestión en diversos idiomas.
- Localization: configuración de los diferentes idiomas del HMI y sus literales.
- Pantallas: carpeta destinada a almacenar cada una de las pantallas secundarias, las cuales se muestran a continuación.

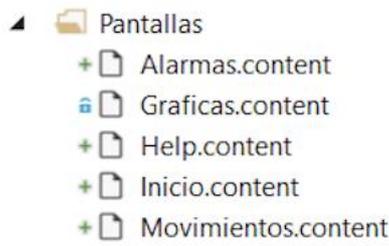


Figura 136. Sección Pantallas de proyecto HMI

Fuente: TwinCAT 3

- Desktop.view: pantalla inicial del HMI por defecto.

Dentro de la pantalla principal (Desktop.view) encontramos las siguientes funciones:



Figura 137. Funciones incluidas en pantalla principal

Fuente: TwinCAT 3

El primer icono muestra la ventana “Document Outline” relativa al listado de todos los controles de la vista y su jerarquía.

El icono con una letra C hace referencia a la ventana “TwinCAT HMI Configuration”, la cual permite gestionar el mapeo al servidor ADS.

El tercer icono (letra G) hace referencia a la galería de imágenes incluida en el software TE2000 y finalmente, el icono denotado con la letra L permite ejecutar la vista online del proyecto a través de un cliente Web embebido en el TE2000.

Con respecto al proyecto HMI desarrollado, encontramos la pantalla principal (Desktop View) y una serie de pantallas secundarias (contenidos) a las cuales se accede a través de los pulsadores incluidos en la pantalla inicial.

La pantalla principal tiene la siguiente estructura:



Figura 138. Pantalla principal proyecto HMI

Fuente: TwinCAT 3

La funcionalidad de cada uno de los componentes incluidos en esta pantalla se describe a continuación:

- Pulsador Start: se trata de un pulsador que ha sido vinculado a la variable PulStart del proyecto de PLC, previamente mapeada y la cual arranca el funcionamiento del sistema XTS. La vinculación con dicha variable se realiza en la ventana Properties – StateSymbol, lo cual es igual para todos los pulsadores.



Figura 139. Símbolo pulsador Start

Fuente: TwinCAT 3

- Pulsador Stop: se trata de un pulsador que ha sido vinculado a la variable mapeada PulStop del proyecto de PLC y a la seta de emergencia, de manera que detiene el funcionamiento del sistema cuando ésta se active.



Figura 140. Símbolo pulsador Stop

Fuente: TwinCAT 3

- Pulsador Restart: se trata de un pulsador que permite llevar a cabo un reseteo manual del sistema en caso de detención por la activación de la seta de emergencia. Ha sido vinculado con la variable mapeada del PLC denotada como PulReset y con un pulsador físico integrado en la pantalla HMI.



Figura 141. Símbolo pulsador Restart

Fuente: TwinCAT 3

- Pulsador Home: permite volver a la pantalla de inicio desde el resto de las pantallas secundarias.



Figura 142. Símbolo pulsador Home

Fuente: TwinCAT 3

- Pulsador Movimientos: permite acceder a la pantalla secundaria en la que se mostrará el funcionamiento en tiempo real del XTS, lo cual se realiza a partir de la implementación del XTS Viewer. Se debe tener en cuenta que para que esto sea posible se debe haber realizado previamente la inclusión e instalación de los paquetes Nuget correspondientes; Beckhoff.TwinCAT.HMI.XTS así como Beckhoff.TwinCAT.HMI.XTS.Controls.
- Pulsador Gráficos: permite acceder a la pantalla secundaria en la que se muestran los gráficos de velocidad, posición, aceleración y error de posición de cada uno de los movers en tiempo real. Para que esto sea posible se deben haber incluido e instalado previamente los paquetes Nuget correspondientes; Beckhoff.TwinCAT.Scope, Beckhoff.TwinCAT.Scope.Meta y finalmente, Beckhoff.TwinCAT.ScopeControl.
- Pulsador Alarmas: permite acceder a la pantalla secundaria en la que se muestran las alarmas, avisos e incidencias del sistema en tiempo real.

Es importante tener en cuenta que para que los pulsadores funcionen adecuadamente, se deben definir eventos de la siguiente manera:





Figura 143. Eventos para alternancia entre pantallas

Fuente: TwinCAT 3

Éstos permiten la visualización de las diferentes pantallas en función del pulsador seleccionado.

Adicionalmente, se ha incluido un vídeo relativo a la Universidad Europea que aparecerá en la pantalla principal. Para ello, ha sido necesario incluir el vídeo en la sección Imports en formato .mp4 de la siguiente manera:

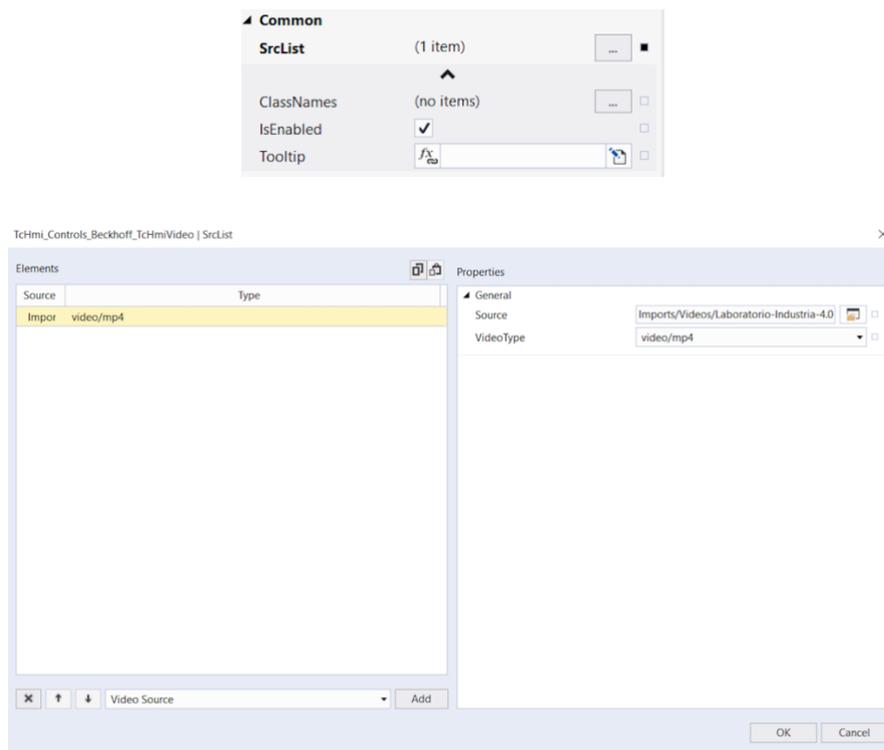


Figura 144. Inclusión y vinculación con vídeo mp4

Fuente: TwinCAT 3

Con respecto a las pantallas secundarias, la estructura de cada una de ellas se muestra a continuación:

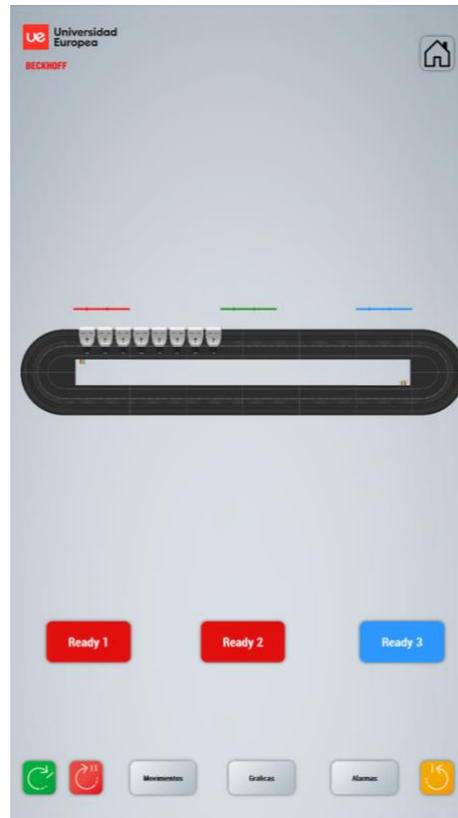


Figura 145. Pantalla de Movimientos de proyecto HMI

Fuente: TwinCAT 3

Se puede observar el XTS Viewer, el cual mostrará una simulación del funcionamiento del sistema una vez arrancado el proyecto de PLC.

Adicionalmente, se observan tres pulsadores, relativos a las señales que implican la deposición y retirada de las lentes sobre los movers.

- Ready 1: pulsador vinculado a la variable mapeada bReady1 del proyecto de PLC, la cual indica que se ha depositado la lente sobre el primer mover de la estación 1, cuya posición en módulo es 150 mm.
- Ready 2: pulsador vinculado a la variable mapeada bReady2 del proyecto de PLC, la cual indica que se ha depositado la lente sobre el segundo mover de la estación 1, cuya posición en módulo es 60 mm.

Una vez depositadas ambas piezas, los movers se dirigen hacia la siguiente estación, donde se llevaría a cabo la generación del perfil de la cara posterior de las lentes.

- Ready 3: pulsador vinculado a la variable mapeada bReady3 del proyecto de PLC, la cual indica que se ha producido la retirada de la lente de cada uno de los movers de la estación 3. Una vez retirada la pieza del primer mover de la tercera estación (posicionado en 1.400 mm), éste se dirige hacia Home, proceso que se repite con el mover posicionado en 1.310 mm.

La presencia de estos tres pulsadores se ha considerado acertada con el objetivo de probar el funcionamiento del sistema, pudiendo realizarse en un futuro a través de brazos robóticos que se comunicasen con el sistema a través de protocolos como Modbus TCP.

La pantalla secundaria denotada como Gráficos muestra en tiempo real los parámetros de los movers del XTS, concretamente la posición real y de consigna, velocidad real y de consigna, aceleración real y de consigna y error de posición. La implementación de dichos gráficos ha sido posible a partir de la creación de un proyecto de medición (TwinCAT Measurement Project), el cual será comentado posteriormente.

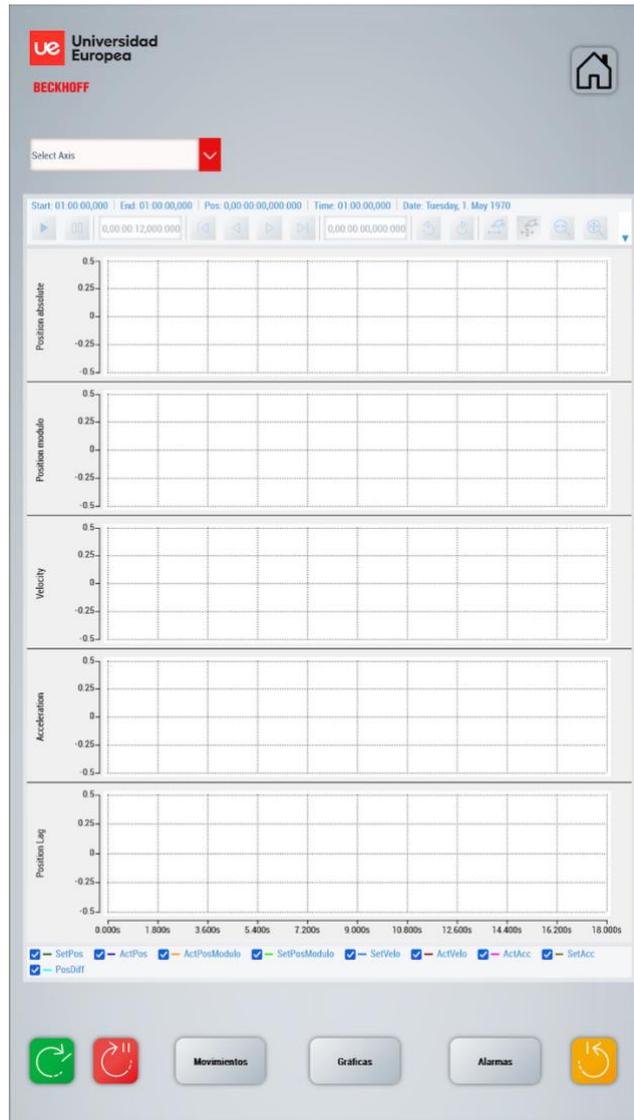


Figura 146. Pantalla de Gráficos de proyecto HMI

Fuente: TwinCAT 3

Para importar el proyecto de medición sobre el objeto ScopeControl, se debe especificar el proyecto de medición en la sección Common – ScopeConfig en la ventana de Propiedades del propio componente.



Figura 147. Importación de proyecto Scope sobre HMI

Fuente: TwinCAT 3

Adicionalmente, se ha añadido un componente denotado como “ComboBox”, el cual permite seleccionar sobre qué mover se desea observar la información. Para que este componente funcione adecuadamente ha sido necesario definir un evento, de manera que, en función de la opción escogida en el selector, se muestre un gráfico u otro. Esto se ha realizado a partir de una función switch con diferentes casos en función del eje sobre el cual se deseen visualizar los parámetros.



Figura 148. Evento para alternancia de visualización de gráficos

Fuente: TwinCAT 3

Finalmente, la pantalla denotada como Alarmas se puede acceder a través de la activación de pulsador Alarmas en la pantalla principal y muestra los posibles avisos y errores de funcionamiento.

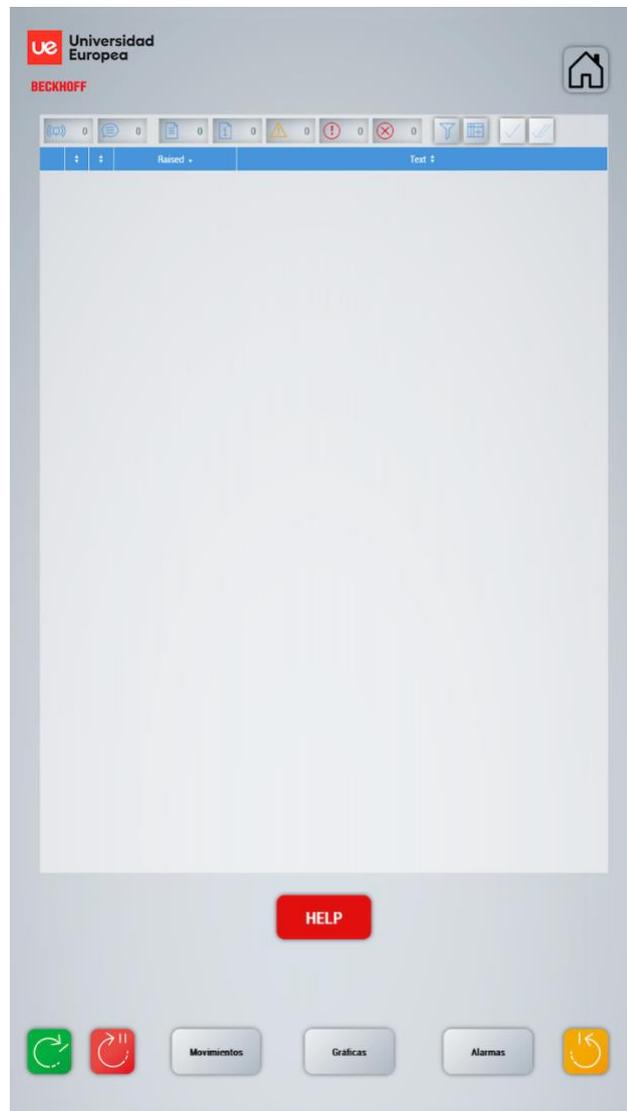


Figura 149. Pantalla de Alarmas de proyecto HMI

Fuente: TwinCAT 3

Adicionalmente, se ha añadido un pulsador denotado como HELP, cuya activación dirige hacia otra pantalla en la que se muestran en formato .pdf la documentación relativa a errores NC, TE2000, TF2000 y el manual del XTS.

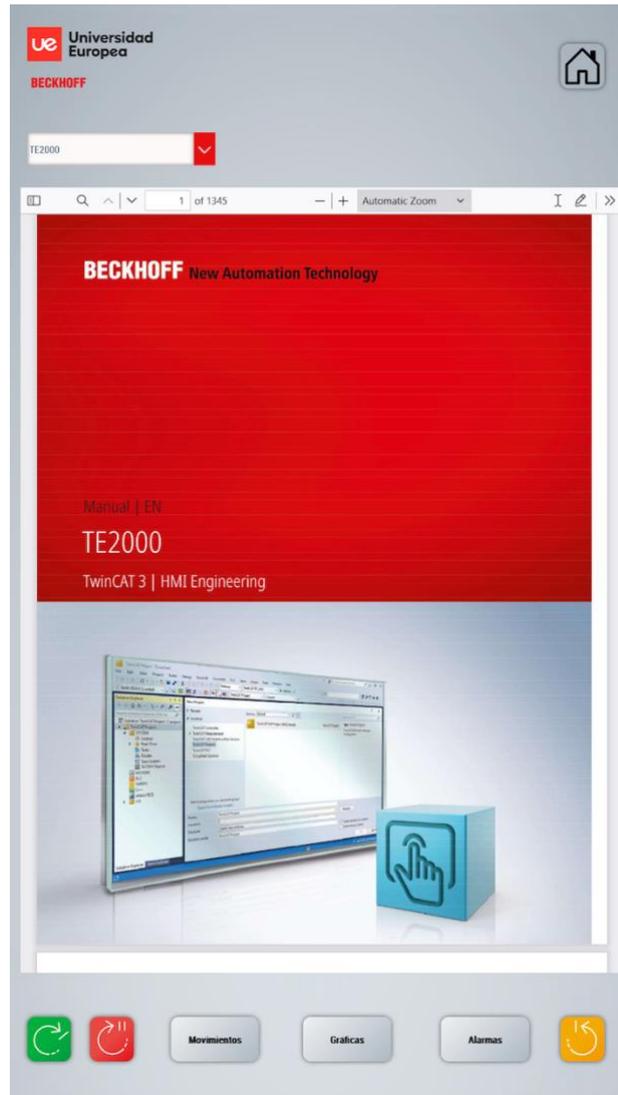


Figura 150. Pantalla de Ayuda de proyecto HMI

Fuente: TwinCAT 3

Para seleccionar la documentación que se desee visualizar se ha incluido un “ComboBox” y se ha definido un evento de manera que, según la opción seleccionada, se muestre un documento u otro. Esto ha sido posible a partir de la definición de un evento basado en un switch, donde cada uno de los casos corresponde con un archivo de documentación.

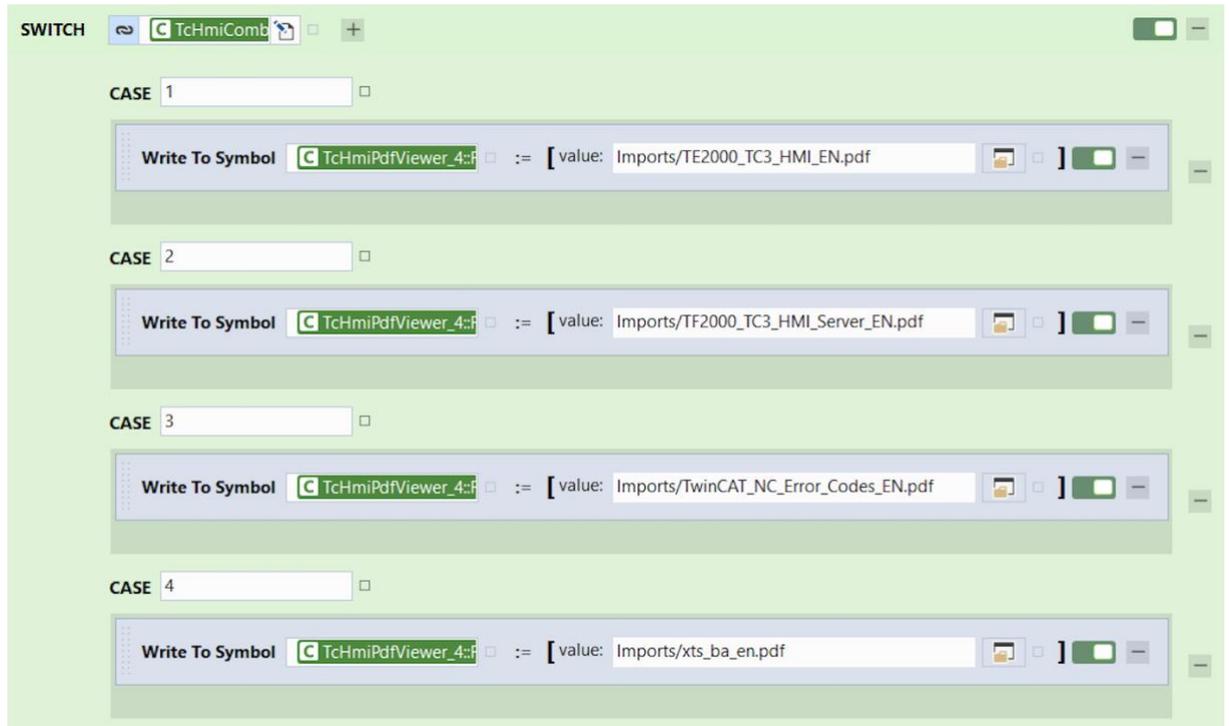


Figura 151. Evento para alternancia de visualización de documentos PDF

Fuente: TwinCAT 3

Se debe tener en cuenta que para posibilitar la visualización de la documentación, ha sido necesario incluir los paquetes Nuget correspondientes, concretamente Beckhoff.TwinCAT.PDFViewer. Además, ha sido necesario incluir la documentación en el directorio correspondiente y vincularlo con cada una de las opciones a escoger en el ComboBox.

3.6 TwinCAT Measurement Project

La creación del proyecto de medición se realiza añadiendo en la parte superior del Solution Explorer un nuevo proyecto, lo cual es posible pulsando el botón derecho y seleccionando Add – New Project – TwinCAT Measurement Project. Esto es observable a continuación:

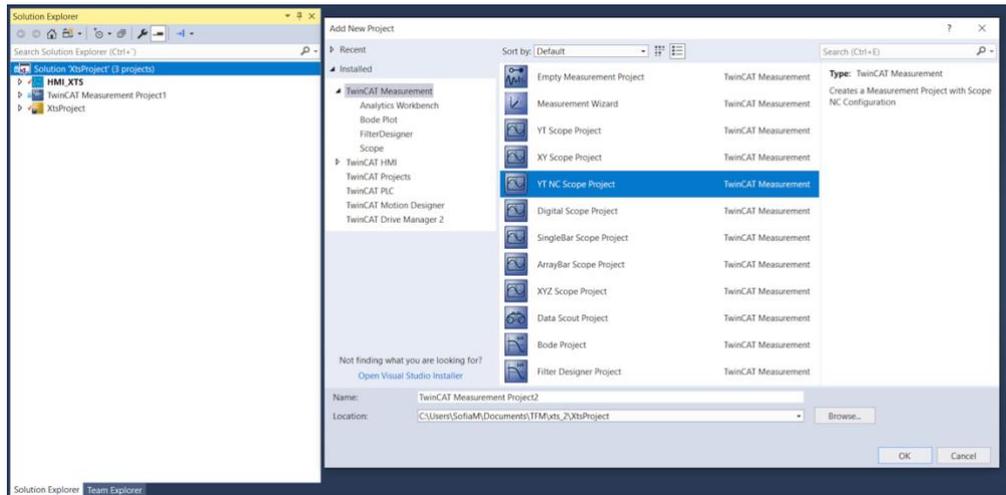


Figura 152. Creación de proyecto TwinCAT Measurement

Fuente: TwinCAT 3

Un proyecto de medición de TwinCAT permite desarrollar gráficos de diferente tipo como diagramas de Bode, gráficos en el tiempo o gráficas con dependencia entre variables. En este caso, ha sido necesario incluir un Scope YT Project, en el que se muestran la evolución de los parámetros (en el eje y) con respecto al tiempo (en el eje x).

Una vez agregado el proyecto YT en el Solution Explorer, se puede observar el apartado “DataPool”, en el cual se deberán añadir las variables a graficar.

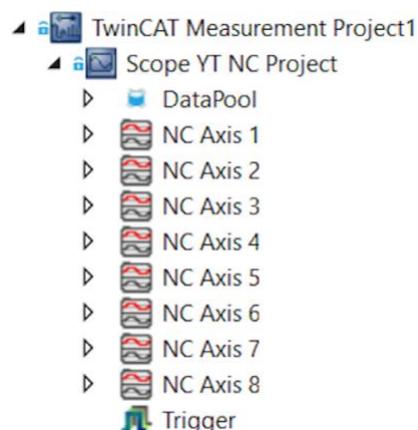


Figura 153. Arquitectura proyecto TwinCAT Measurement

Fuente: TwinCAT 3

Debido a que las variables que se desean graficar proceden de los movers del XTS, se debe habilitar la comunicación ADS en la sección Image – ADS de cada uno de los maestros EtherCAT. Si no se marcan las casillas correspondientes, no se podrá acceder a dichas variables y en consecuencia, éstas no podrán ser visualizadas en los gráficos.

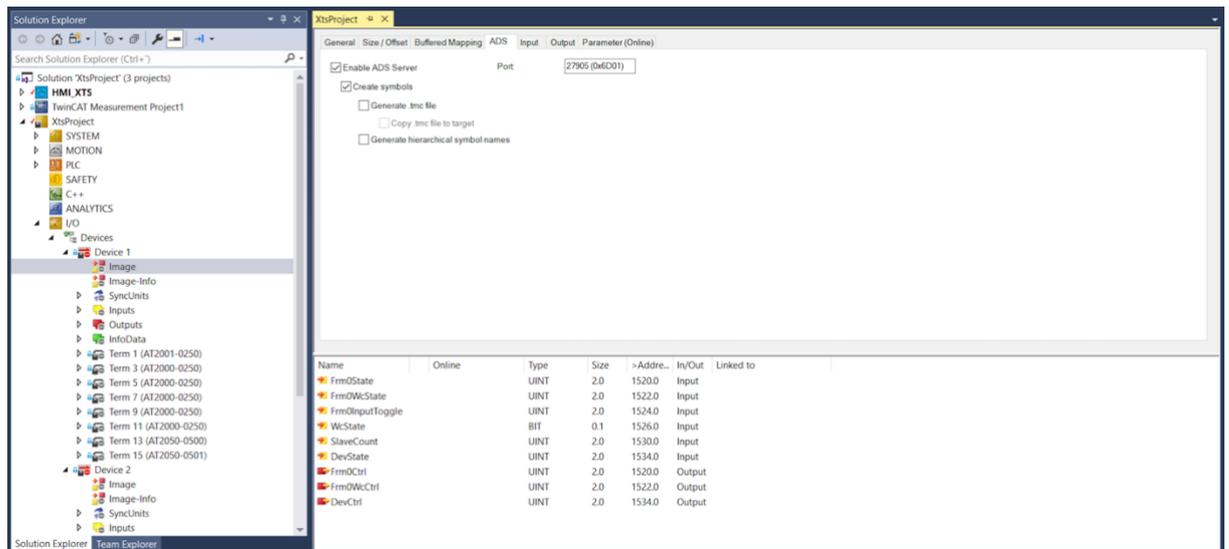


Figura 154. Habilitación de comunicación con ADS Server

Fuente: TwinCAT 3

Una vez habilitada la comunicación ADS, se deben añadir las variables a graficar en la sección “DataPool”, lo cual se realiza haciendo click derecho y seleccionando la opción Target Browser.

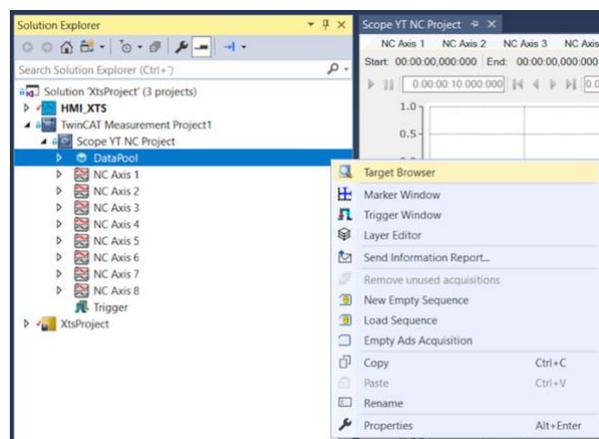


Figura 155. Inclusión de parámetros en DataPool

Fuente: TwinCAT 3

Posteriormente, se ha creado múltiples YT Chart, uno por cada eje NC. Cada uno incluye a su vez cuatro ejes, relativos a la posición, velocidad, aceleración y error de posición. Con el objetivo de facilitar la visualización de los parámetros para cada eje, se ha seleccionado la opción “Stacked Axis” de manera que se encuentren en gráficas independientes y apiladas dentro de una misma ventana.

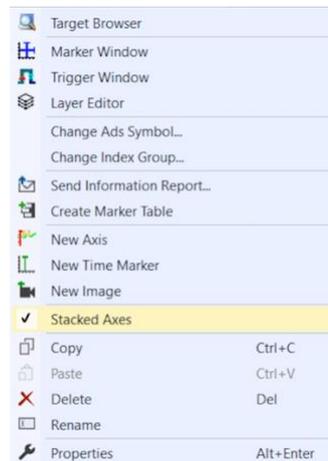


Figura 156. Apilamiento de las gráficas de cada eje

Fuente: TwinCAT 3

Para todos los ejes, la primera gráfica corresponde con la posición real y la posición de consigna, la segunda gráfica con la velocidad real y la velocidad de consigna, la tercera gráfica con la aceleración real y de consigna y la última con el error de posición.



Figura 157. Arquitectura de gráficos para cada eje NC

Fuente: TwinCAT 3

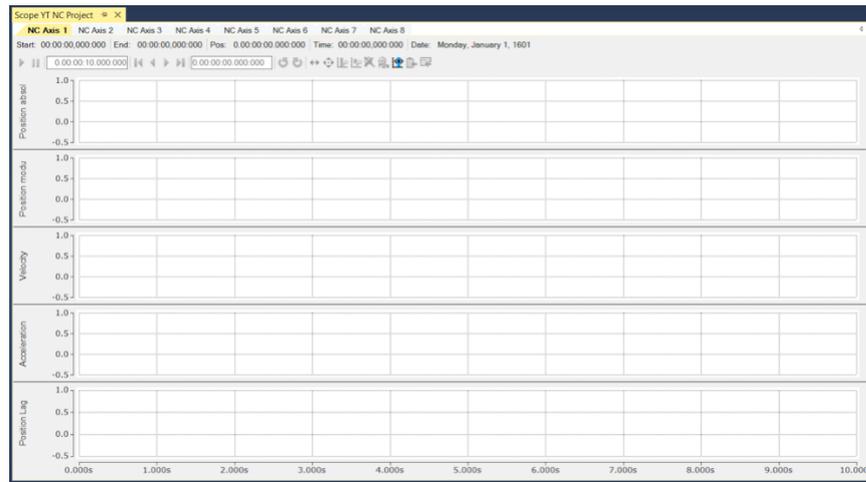


Figura 158. Estructura de los gráficos para cada eje

Fuente: TwinCAT 3

3.7 Diseño de soporte y lentes en SolidWorks

Con el objetivo de integrar transversalmente todos los conocimientos aprendidos a lo largo del Grado en Ingeniería en Sistemas Industriales, se ha decidido diseñar tanto los soportes mecánicos de los movers como las lentes oftálmicas en 3D a partir de la herramienta de diseño SolidWorks, lo que ha sido posible a partir de los conocimientos adquiridos en la asignatura de Expresión Gráfica para la Ingeniería.

En cuanto al diseño de los soportes de los movers, ha sido necesario considerar sus dimensiones y la distancia entre ejes de los mismos una vez se encuentren incluidos en el grupo de collision avoidance, de manera que no exista contacto entre los soportes de los diferentes movers. Además, para diseñarlo correctamente ha sido necesario conocer la posición de los tornillos de sujeción de los movers, de manera que los orificios pasantes de los soportes y los movers coincidan y no exista juego mecánico.

Las consideraciones mecánicas comentadas se observan en la siguiente figura:

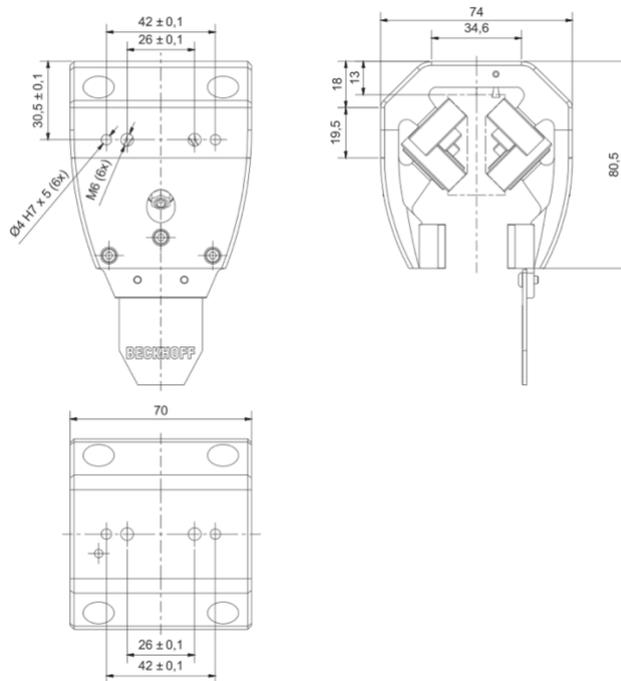


Figura 159. Consideraciones para el diseño mecánico de los soportes de los movers

Fuente: Manual XTS. Beckhoff Automation

El material empleado para los soportes es PLA (ácido poliláctico), el cual es un material termoplástico empleado por su carácter sostenible como consecuencia de su composición a partir de carbono, hidrógeno y oxígeno. Se ha optado por un filamento gris de espesor 1,75mm con el objetivo de que los soportes presenten un aspecto metálico.

En cuanto al diseño de las lentes, ha sido necesario considerar el diámetro, espesor y grado de curvatura de estas, con el objetivo de que encajen perfectamente sobre los soportes de los movers. El material empleado para las lentes es un filamento de polietileno de espesor 1,75 mm y color transparente. Las lentes presentan una forma cóncava con una distancia focal de 3,23 mm.



Figura 160. PETG 1,75mm transparente para creación de lentes

Fuente: 3DJake.es

La impresión de tanto los soportes como las lentes se ha realizado a partir de una impresora 3D, concretamente el modelo Creality Ender 3 S1, la cual es observable en la siguiente imagen:



Figura 161. Impresora Creality Ender 3 S1

Fuente: 3DJake.es

Se trata de una impresora 3D que proporciona una calidad de impresión fina y un funcionamiento fiable gracias a su extrusor directo de doble engranaje y la presencia de una sonda automática de nivelación para la cama de impresión.

Sus principales características son:

- Peso neto de la máquina de 9,1 kilogramos.

- Tecnología FDM (Fused Deposition Modeling), lo que implica la creación de la pieza en 3D a partir de un método de superposición del filamento.
- Presenta una potencia nominal de 350 W.
- Tensión de alimentación variable entre 110 y 240 V AC.
- Volumen de impresión de 220 mm x 220 mm x 270 mm.
- Presenta cinco motores paso a paso con par 0,4 N x m, concretamente el modelo Creality Stepper 42 – 34. De éstos, uno corresponde al eje x, otro al eje y, dos al eje z y uno restante a la extrusora, la cual permite la sujeción, calentamiento y empuje del filamento hacia la boquilla de salida.

Con respecto a la mecánica acoplada a los motores, se debe tener en cuenta que éstos no presentan reductoras, sino que el mecanismo de transmisión está acoplado directamente a los motores.

El eje x y el eje y cuentan con una correa que convierte el movimiento rotativo del eje en un movimiento lineal mientras que los motores del eje z presentan un husillo.

Se debe tener en cuenta que la extrusora lleva una reductora que ayuda al paso del filamento a hacia la boquilla de salida, otorgando un mayor par y una menor velocidad.



Figura 162. Motor paso a paso Creality 42 - 34

Fuente: Novatronic.es

La impresión de los soportes y las lentes ha sido posible a partir de los diseños generados en SolidWorks, los cuales se observan a continuación:



Figura 163. Diseño 3D de soportes mecánicos para movers

Fuente: Elaboración propia



Figura 164. Diseño 3D de lentes

Fuente: Elaboración propia

Las vistas de alzado, plano superior, plano derecho y proyección del soporte y de la lente se muestran a continuación:

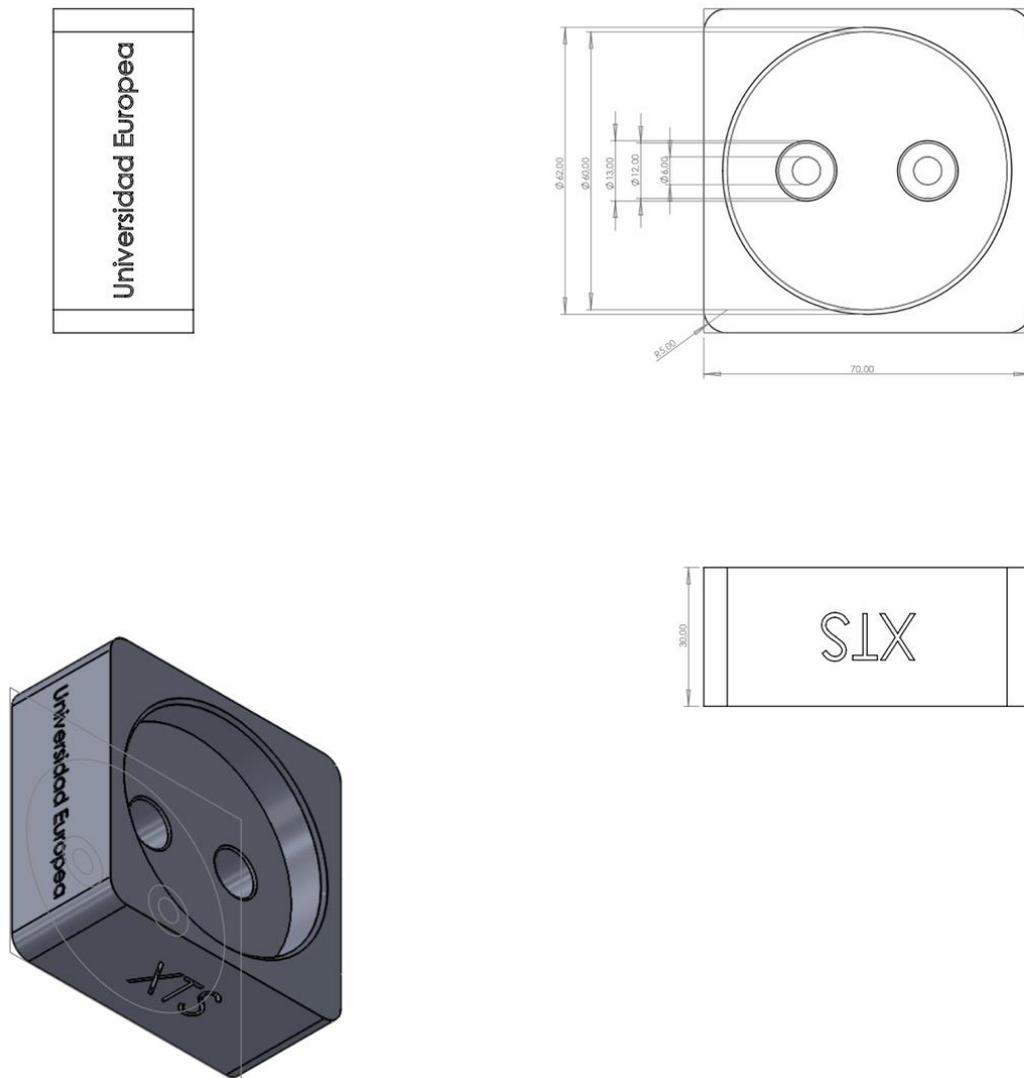


Figura 165. Vistas de soportes

Fuente: Elaboración propia

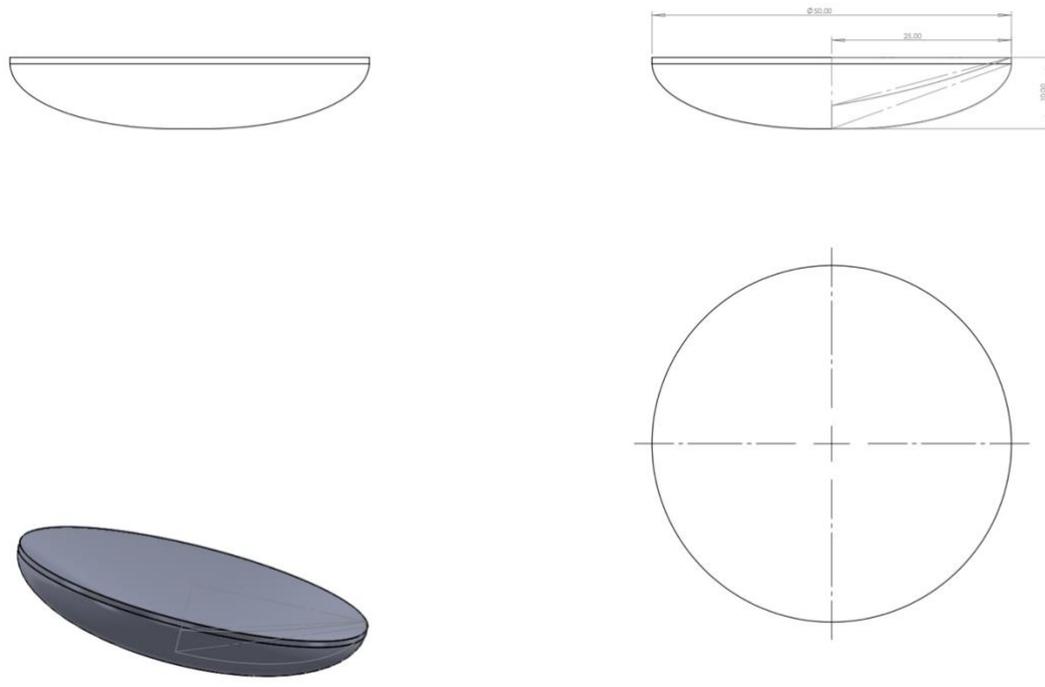


Figura 166. Vistas de lentes

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4. **NORMATIVA Y MARCO LEGAL**

4.1 Estudios aplicados al proyecto

La realización de este proyecto requiere una serie de conocimientos relativos al ámbito de la automatización, la electrónica, la robótica y la informática industrial. Debido a su transversalidad, ha sido necesario llevar a cabo una exhaustiva labor de documentación acerca del sistema de transporte XTS y los fundamentos básicos de la programación orientada a objetos.

Además, el desarrollo de proyecto en su totalidad en TwinCAT 3, lo que incluye la programación de la sección de PLC, Motion y HMI, ha motivado la asistencia a

diversos cursos de formación de manera que se obtuviesen los conocimientos necesarios para la correcta realización y puesta en marcha de la aplicación desarrollada. En consecuencia, se ha realizado la búsqueda de información y posterior toma de datos de pertenecientes a diversos proyectos de fin de grado y la página oficial de infosys de Beckhoff Automation.

4.2 Obtención de licencias

Para poder llevar a cabo el desarrollo del programa de control del XTS así como la creación del proyecto de Motion y el proyecto relativo a la interfaz gráfica HMI ha sido necesario contar con la aceptación de las siguientes licencias por parte de Beckhoff Automation:

TC1200: TC3 PLC

Licencia de programación de PLC con posibilidad de soportar todos aquellos lenguajes de programación descritos en el estándar internacional IEC 61131-3. Se trata de una licencia gratuita que permite llevar a cabo el desarrollo del programa de control del XTS.

Algunas de las características técnicas que describen la licencia en cuestión son las siguientes:

- Comunicación a través de ADS (Automation Device Specification), la cual permite funcionalidades como acceso a la imagen del proceso y a las diferentes tareas de entrada/salida, intercambio de datos, detección de cambios del estado de las entradas, obtención del estado de las salidas del PLC y muestreo de mensajes de manera cíclica o basadas en eventos predefinidos, entre otras.

Se debe tener en cuenta que la comunicación a través de ADS se realiza a partir de la licencia TC1000 (TwinCAT 3 ADS) incluida en la propia TC1200, por lo que no es necesario incluirla adicionalmente. Ésta permite la transmisión y recepción de datos, así como el control de sistemas desarrollados en TwinCAT.

- Incluye licencia TC1100 (TwinCAT IO).
- Estructura de interfaz de programación modular, de manera que facilita el proceso de detección de errores y permite visualizar con mayor claridad el árbol del programa.
- Compatibilidad con Windows 7, Windows 10, Windows CE, entre otros.
- Arquitectura de CPU x86, x64 o ARM (Advanced RISC Machine).
- Tiempos de ciclo mínimos de 50 μ s.
- Tiempo de vinculación de 1 μ s por cada 1.000 líneas del código de control a partir del empleo de procesadores Intel.
- Posibilidad de programación orientada a objetos.
- Posibilidad de realización de cambios tanto en el programa como en las variables descritas.
- Posibilidad de declaración de atributos a las variables como retain, constant y persistent. La diferencia entre ellas es que, las variables persistentes (con atributo persistent) mantienen su valor ante situaciones de reinicio en frío, las variables remanentes (con atributo retain) son aquellas que se gestionan y almacenan en una memoria independiente que se encuentra protegida frente a fallos de alimentación y finalmente, las variables constantes (con atributo constant) son aquellas cuyo valor permanece invariable durante la ejecución de programa.
- Conexión online con el runtime del PLC según TCP/IP o un bus de campo.
- Monitorización online de listas de variables y ventanas de visualización.
- Posibilidad de modificación de variables de manera permanente (en su propia definición) o de forma puntual (forzando éstas a un valor determinado), lo que permite observar la ejecución del código del programa ante diversos cambios y en consecuencia, alcanzar un mayor entendimiento del sistema.

TC1250: TwinCAT 3 PLC/NC PTP 10

Licencia de programación de un proyecto de motion con capacidad de control de hasta 255 ejes con posicionamiento NC PTP unidimensional. Las siglas PTP hacen

referencia a Point To Point (punto a punto) y el término unidimensional se refiere a que la interpolación se realiza en un sistema de coordenadas cartesianas o polares.

Algunas de las características técnicas que describen la licencia en cuestión son las siguientes:

- Los ejes son representados como objetos que se vinculan con los ejes reales (físicos) de los motores, de manera que poseen una configuración idéntica a éstos.
- Compatibilidad con accionamientos eléctricos e hidráulicos, convertidores de frecuencia, motores paso a paso y accionamientos conmutados, entre otros.
- Enrutamiento de protocolos a través de interfaces como CoE (CanOpen Over EtherCAT) y SoE (Sercos Over EtherCAT).
- Funcionalidades como inicialización, detención y reseteo de los ejes, acoplamiento maestro - esclavo, compensación online de distancia etc.
- Monitorización en tiempo real de variables de estado de los ejes como velocidad, aceleración y posición real de los mismos.
- Ajuste de los parámetros del lazo de posición y el lazo de velocidad de los ejes, de manera que se alcance el funcionamiento deseado.
- Multiplicidad de controladores: P (Proporcional), PID (Proporcional – Integral – Derivativo), PID con precontrol de velocidad o PID con precontrol de velocidad y aceleración.
- Posibilidad de acoplamiento en parado y/o acoplamiento al vuelo.
- Acoplamiento entre diversos maestros.
- Compatibilidad con sistema operativo Windows 7, Windows 10 y Windows CE, entre otros.
- Arquitectura de CPU x86, x64 o ARM.
- Considerar que la licencia TC1250 incluye las licencias de PLC TC1200 y licencia de NC PTP TF5000.

TF5850: TC3 XTS Technology

Licencia relativa al software de desarrollo del XTS y su integración en el entorno de desarrollo de TwinCAT 3. Posibilita el acceso y uso de las herramientas incluidas en

el software del XTS como el XTS Configurator, XTS Simulation Builder y XTS Viewer, las cuales facilitan el proceso de creación y monitorización.

Algunos aspectos técnicos a tener en cuenta son:

- Compatibilidad con sistema operativo Windows 7 y Windows 10.
- Arquitectura de CPU x86 o x64.
- Los movers son gestionados como ejes, lo que ofrece un amplio rango de funcionalidades.
- Posibilidad de control de movimiento y gestión de las pistas.
- Ofrece una reducción del trabajo de ingeniería como consecuencia del empleo de bloques de función específicos relativos a la licencia TF5400 (Advanced Motion Pack).

TF2000: TC3 HMI Server

Para el desarrollo de un proyecto HMI, es necesaria la integración, en primer lugar, del paquete de ingeniería TE2000, basada en una extensión de Visual Studio que permite llevar a cabo el diseño y desarrollo de proyecto y, en segundo lugar, el servidor TF2000, sobre el cual se realizará la publicación de proyecto.

Los aspectos técnicos a tener en cuenta son los siguientes:

- Incluye un servidor HMI, un cliente y una conexión con un target. Si se desearan incluir clientes y/o targets adicionales, se deberá abonar la cantidad correspondiente a cada pack de licencia solicitada.
- Compatibilidad con Windows 7 y Windows 10.
- Soporte de arquitectura CPU desde ARM hasta multi-core (esto es, con múltiples núcleos).
- Posibilidad de conexión con los respectivos controladores a partir de protocolos de automatización como ADS o bien, OPC UA.
- Requiere la inclusión de la licencia TC1000, relativa al enrutamiento ADS.
- El número de servidores de desarrollo corriendo en un segundo plano es equivalente al número de proyectos de HMI abiertos.

- Los servidores de desarrollo se ejecutarán en los puertos 30xx mientras que la publicación en el servidor podrá realizarse de manera segura (puerto 1020) o en ausencia de seguridad (puerto 1010).

TF5410: Collision Avoidance

Licencia que permite el uso de la librería necesaria para evitar la colisión entre los movers del XTS. Permite que cada mover del XTS tenga en cuenta la posición del resto de movers del XTS, pudiendo especificar una distancia mínima entre centros de los movers.

Adicionalmente y dentro del proyecto de PLC, ha sido necesario incluir una serie de librerías que permiten tanto la ejecución de los comandos de control relativos al XTS así como funciones adicionales de movimiento de los ejes de los movers o inclusión en el grupo de Collision Avoidance, entre otras:

- Tc2_MC2

Librería que incluye todos los bloques de función relativos a la programación de un proyecto de Motion. Dichos bloques de función pueden segmentarse en:

- Tipos de datos: destinados a la definición de los ejes a partir de la estructura denotada como AXIS_REF, obtención de características del sistema y parametrización de funciones como acoplamientos, corrección de posición o homing.
- Variables globales.
- POUs: empleados para llevar a cabo acciones sobre los ejes como habilitación, inclusión del grupo de Collision Avoidance, acoplamiento y desacoplamiento, reseteo etc. Se denotan con el indicador MC_ y proporcionan información sobre su estado (activo, finalizado y error, entre otros) a partir de variables de salida del bloque de función.

- Tc2_Standard

Librería que incluye todas las unidades de organización de programa (POU) pertenecientes al estándar IEC 61131 – 3, las cuales se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Contadores ascendentes, descendentes y ascendente – descendente.
- Bloques de función biestables.
- Bloques de función de detección de flanco ascendente y flanco descendente.
- Temporizadores de retardo a la conexión (TON), de retardo a la desconexión (TOF) y de pulso (TP).
- Funciones de gestión de cadenas.

- Tc2_System

Librería que incluye funciones y bloques de función necesarias para TwinCAT que no se encuentran incluidas en el estándar IEC 61131 – 3, por lo que son específicas del fabricante.

- Tc3_McCollisionAvoidance

Librería necesaria como consecuencia de la inclusión de los movers en el grupo de Collision Avoidance, el cual evita el impacto entre éstos a partir del mantenimiento de una distancia ajustable entre centros de los movers.

Contiene estructuras y bloques de función relativos a la inclusión y exclusión de los movers en el grupo de Collision Avoidance, movimientos absolutos y relativos de los ejes hacia una posición y parada de los ejes (sin bloquearlos), entre otros.

- Tc3_McCoordinatedMotion

Librería que permite llevar a cabo una correcta interpretación de los ejes, así como su dimensión y la estrategia de enlazamiento de movimientos (pudiendo realizarse de manera geométrica o por superposición).

- Tc3_Module

Librería destinada para posibilitar la comunicación TcCOM entre módulos, pudiendo considerarse módulos un objeto definido en C++, Matlab o aquellos definidos en el propio proyecto de TwinCAT. Es importante tener en cuenta que presenta compatibilidad con versiones de TwinCAT superiores a la versión 3.1.4020.0 y licencias superiores a TC1200 (TC3 PLC).

- Tc3_XTS_Utility

Librería instalada juntamente con el paquete del software TF5850 empleada para realizar la lectura y escritura de los parámetros del XTS. Resulta de elevada utilidad en cuanto al empleo de las funcionalidades incluidas en el XtsEnvironment.

4.3 Listado de Normativa y Legislación

Para determinar la probabilidad de realizar un proyecto con éxito se debe llevar a cabo un estudio de viabilidad. Dicho estudio permitirá realizar un análisis objetivo de los aspectos más influyentes en la puesta en marcha del proyecto, determinando en consecuencia los posibles problemas que puedan surgir durante su desarrollo.

Además, la realización de una investigación tanto cuantitativa como cualitativa permitirá concluir si resulta viable la inversión de recursos en la aplicación propuesta. Para ello, consideraremos tres aspectos principales: aquellos referentes al ámbito social, económico y técnico.

Se debe tener en cuenta que el reglamento expuesto a continuación se encuentra incluido, en su totalidad, en la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria, relativa a la protección de la actividad empresarial, la verificación de seguridad, calidad y responsabilidad industrial, así como la promoción tecnológica, entre otros aspectos.

4.3.1 Marco social y ambiental

Con respecto al marco social, la implantación de un sistema de transporte lineal como el XTS conlleva una serie de modificaciones a nivel social como consecuencia de la generación de nuevos puestos de trabajo en base al avance tecnológico que éste conlleva, la formación de personal especializado y el fomento al progreso y bienestar de las personas.

Con respecto al ámbito ambiental, supone una mayor contribución en cuanto a la reducción de la emisión de gases del efecto invernadero y, en consecuencia, una reducción de la contaminación, así como una mejora en la calidad de los materiales empleados.

Todos estos aspectos deben ser considerados en cuanto a la implantación del sistema de transporte en industrias de diversos sectores como farmacéutico, cosmética, electrónica y automoción, entre otros. Además, deben, en su totalidad, encontrarse incluidas en la normativa vigente y cumplir con los diferentes planes de actuación fijados a nivel nacional y/o europeo.

En primer lugar, cumple con las Directrices Generales de la Nueva Política Industrial Española 2030, la cual se centra en cinco principios básicos:

- Alcanzar una mejora de la productividad y la competitividad internacional, lo que conlleva una significativa aportación al Producto Interior Bruto (también conocido por las siglas PIB) y la generación de puestos de trabajo a nivel autonómico y nacional.
- Promover el progreso de la industria a partir de la implantación de medidas y métodos sostenibles.
- Alinear la política nacional con la política de la Unión Europea, la cual se centra en materias como sostenibilidad, descarbonización y digitalización de todas las fases implicadas en un proceso industrial.

- Favorecer el desarrollo de una política industrial que contribuya positivamente a empresas pequeñas y medianas en el sector.
- Lograr que la digitalización sea concebida como una ventaja competitiva de manera que permita alcanzar los objetivos descritos anteriormente.

A pesar de los intentos de mejorar las condiciones de la actividad industrial en España y fomentar la contribución de ésta al PIB, no se han alcanzado logros significativos. En 2014 el Gobierno Nacional presentó la Agenda para el Fortalecimiento del Sector Industrial en España con el objetivo de relanzar la industria de manera que ésta supusiese un 20% del PIB nacional en 2020, sin embargo, a lo largo de dichos años la industria ha experimentado un proceso de terciarización alcanzando un valor del 16.1% del PIB, datos registrados por el Avance de Contabilidad Nacional de España publicado por el Instituto Nacional de Estadística (también conocido por las siglas INE).

Posteriormente, el cambio de gobierno en 2018 conllevó la implantación de serie de medidas destinadas al impulso de la industria a largo plazo, lo cual supone un horizonte temporal entre 2020 y 2030, entre las que destaca la creación del Ministerio de Industria y la denominada Agenda del Cambio. Los fundamentos y objetivos de ésta se encuentran alineados, a su vez, con las reformas contempladas en la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Igualmente, dicha política contribuye con el Marco Estratégico de Energía y Clima compuesto por tres pilares clave:

- Ley de Cambio Climático y Transición Energética, incluida en la Ley 7/2021, de 20 de mayo y referenciada al Boletín Oficial del Estado según BOE-A-2021-8447.
- Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030, el cual establece los principios de actuación destinados a la reducción de emisiones de gases del efecto invernadero y la penetración en el mercado de políticas de eficiencia energética. Una de las leyes incluidas en este Plan es la Ley 21/2013,

de 9 de diciembre, de Evaluación Ambiental, la cual establece el sometimiento del PNIEC a un proceso evaluación estratégica ambiental para verificar el alcance de los resultados deseados. Tras dicho análisis, se estableció la estructura orgánica del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, según el Real Decreto 500/2020, de 28 de diciembre.

- Estrategia de Transición Justa, la cual se encuentra alineada con las directrices de la Organización Internacional de Trabajo (también conocida por las siglas OIT) y los principios incluidos en el Acuerdo de Paris. Persigue el objetivo de maximizar las oportunidades de empleo y reducir las emisiones de carbono a partir de un marco de actuación enfocado en la transición ecológica y energética.

La contribución de la implantación del XTS en marco ambiental se encuentra sostenida en el estándar declarado por la Comisión Electrotécnica Internacional IEC 60721-3-3:2019, relativa a la clasificación de parámetros ambientales y sus severidades.

Además, cumple con lo establecido en la Norma Europea EN 60204-1:2018, referente a los requisitos generales de seguridad en las máquinas y que a su vez adopta la Norma Internacional IEC 60204-1:2016 (aplicable a los equipos eléctricos y electrónicos de las máquinas). Asimismo, contribuye con lo establecido en el nivel 2 de la Norma Europea EN 50178, relativa al uso de equipos electrónicos en instalaciones de potencia.

Con respecto al ámbito social, la generación de nuevos puestos de trabajo se encuentra regulada según la Ley 9/2017, de Contratos del Sector Público, relativa a la implantación de una nueva política industrial basada en principios como la transparencia, los criterios sociales y la tramitación electrónica con el objetivo de dotar de una mayor agilidad a los procesos administrativos de adquisición de personal en las empresas.

4.3.2 Marco económico

Como se ha comentado previamente, la integración del XTS en el sector industrial fomenta su aportación en el PIB nacional y mejora la competitividad a nivel internacional como consecuencia de la inversión en innovación relacionada con la industria 4.0 y la digitalización de los procesos industriales, lo que conlleva el crecimiento económico del país de manera equilibrada y segura. Además, supone la aparición de nuevos puestos de trabajo e incrementa la riqueza de aquellas zonas en las que sea implantado.

A lo largo de la última década, se ha observado una tendencia decreciente en la participación de la industria en el PIB nacional, alcanzando un valor mínimo de 15.31% en 2021, un resultado considerablemente menor al 20% estimado por la Unión Europea. En consecuencia, existe una creciente concienciación sobre la necesidad de evolucionar hacia un modelo socioeconómico en el que la sostenibilidad resulte el principio de actuación fundamental.

El marco de actuación a nivel económico se encuentra delimitado, entre otras muchas directrices, por la Ley de Transición Justa (pertenece al PNIEC), cuyo objetivo principal es fomentar el crecimiento de las oportunidades de empleo de manera sostenible a partir de una serie de medidas basadas en la transición ecológica y energética.

En esta misma línea, el marco estratégico impulsado por las Agendas Industriales persigue el objetivo de alcanzar un crecimiento integrador y justo que permita aumentar el desarrollo, crecimiento y productividad de empresas industriales, así como favorecer la generación de talento. Esto se encuentra recogido en el Real Decreto - Ley 20/2018, de 7 de diciembre, de medidas urgentes para el impulso de la competitividad económica en el sector de la industria y el comercio en España (referenciado en BOE número 296, 08/12/18).

4.3.3 Marco técnico

La legislación vigente a nivel técnico se encuentra incluida en el Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, de disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo. Asimismo, cumple con lo establecido en el estándar UNE-EN ISO 12100:2012, relativa a los siguientes puntos clave:

- Seguridad de las máquinas.
- Principios generales para el diseño.
- Evaluación y reducción de riesgos.

Se debe tener en cuenta que las limitaciones se encuentran determinadas según el entorno en el que se vaya a implantar el equipo y las características de funcionamiento del mismo, lo cual incluye aspectos como corriente y potencia máximas, componentes implicados, aplicaciones de seguridad, protocolos de comunicación empleados etc.

Algunas de las directrices vigentes a nivel técnico son las expuestas a continuación:

- IEC 61158, el cual especifica el concepto de buses de campo, así como describe genéricamente tipos de datos del bus de campo y las características de la capa de aplicación del modelo OSI.

El estándar internacional IEC 61158-1:2019 relaciona dichos aspectos con el estándar IEC 7498-1, relativo al modelo de referencia de interconexión de sistemas abiertos.

Estos estándares definen la comunicación a través de EtherCAT y han sido empleados como base para la aplicación de desarrollada.

- IEC 61508, relativa al método de diseño, aplicación, implementación y mantenimiento de sistemas de protección automática de manera que cualquier sistema que integre aplicaciones de seguridad debe funcionar adecuadamente o en caso contrario, que el fallo se produzca de manera predecible y controlada.

Este estándar constituye la base del protocolo de comunicación FSoE (FailSafe over EtherCAT), el cual permite garantizar la comunicación en aplicaciones que combinen funciones de control y seguridad. Esto es posible gracias a la diferenciación entre datos regulares y críticos, los cuales contarán con prioridad sobre el resto.

Se debe tener en cuenta que la tecnología FSoE es conveniente en aplicaciones de seguridad que cuenten con certificación hasta un nivel IEC 61508 SIL 3.

- IEC 61131-3, el cual constituye la tercera sección del estándar IEC 61131 para Controladores Lógicos Programables e incluye los diversos lenguajes de programación tanto a nivel gráfico como textual. A nivel gráfico se distingue entre el diagrama de contactos (LD – Ladder Diagram) y el diagrama de bloques de funciones (FBD – Function Block Diagram), mientras que a nivel textual se diferencian entre texto estructurado (ST – Structured Text) y lista de instrucciones (IL – Instruction List).

Este estándar resulta de elevada importancia en cuanto al desarrollo del programa de control, el cual ha sido realizado en texto estructurado. Sin embargo, es importante considerar que el entorno de desarrollo XAE (eXtended Automation Engineering) admite amplia variedad de lenguajes como los descritos previamente.

- UNE-EN 61131-2:2008, relativo a los requisitos y métodos de ensayo de los equipos. Dicho estándar se aplica en la tarjeta de entradas digitales EL1008 y a partir del cual establece el modo de conexión de las entradas a través de una tecnología basada en un solo cable.
- IEEE 802.3 es un estándar desarrollado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos que define el control de acceso al medio de la capa física y la capa de enlace de datos del modelo OSI a través de un cable Ethernet.

- UNE-EN 60068-2-6:2008, referente a los ensayos ambientales y de vibración de los dispositivos.

El equipo de control del XTS (C6930) así como las tarjetas EL9576 y EL5101, entre otras, cumplen con las especificaciones incluidas en dicho estándar.

- UNE-EN 60068-2-27:2011, relativa a las especificaciones de los ensayos ambientales y de resistencia frente a impactos de los dispositivos.

De igual manera que la normativa previa, tanto las tarjetas como el equipo de control cumplen con dicho estándar.

- Con respecto al aislamiento térmico, sigue lo establecido en el estándar IEC 60085 debido a que el factor térmico constituye el principal factor de envejecimiento de la instalación. Éste es referente a los procedimientos de clasificación de los materiales en diferentes clases térmicas según parámetros como resistencia térmica.

De la misma manera, cumple con el estándar UL 1446, concretamente la clase F del mismo, el cual sostiene una serie de requisitos administrativos en cuanto a la creación de sistemas de aislamiento eléctrico y los procedimientos de prueba pertenecientes al programa FTA (Full Termal Aging).

Capítulo 5. ESTUDIO DEL IMPACTO

5.1 Estudio del impacto ambiental

Como se ha comentado previamente en la normativa vigente aplicable al proyecto desarrollado, la implantación de un sistema de transporte como el XTS contribuye con el avance tecnológico impulsado por la industria 4.0 y el crecimiento en el uso de energías renovables y sostenibles. En consecuencia, favorece la

reducción de emisión de gases del efecto invernadero y el deterioro de la capa de ozono, lo que supone una clara mejora en la calidad y bienestar de las personas.

El Protocolo de Montreal, firmado en 1987, es un acuerdo a nivel mundial que persigue la preservación de la capa de ozono a partir de la eliminación de las sustancias como el óxido nitroso, los clorofluorocarbonos y los hidroclorofluorocarbonos, pertenecientes a un grupo categorizado como SAO (sustancias que agotan el ozono). Desde entonces, se ha producido una ligera recuperación de la capa de ozono, lo que supone que ésta sigue protegiendo al planeta frente a los efectos de la radiación ultravioleta. Dicha tendencia creciente debe ser duradera con el objetivo de asegurar una mejora en la calidad de vida de las personas y, sobre todo, la supervivencia de éstas.

Esto contribuye con la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible impulsada por las Naciones Unidas y cuyo objetivo es el alcance de una transformación del modelo económico y social basado en el fomento de las energías sostenibles y la contribución con el medio ambiente.

En este contexto, contribuye con el Marco Estratégico de Energía y Clima, el cual impulsa la generación de seguridad energética a partir de factores como la innovación, la sostenibilidad, las tecnologías renovables y la creación de empleo, entre otros. Dentro de dicho marco, se alinea con el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (conocido por las siglas PNIEC) y la Ley del Cambio Climático. También, cumple con algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), concretamente: Objetivo 7 (Energía asequible y no contaminante), Objetivo 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), Objetivo 13 (Acción por el clima), Objetivo 14 (Vida submarina) y Objetivo 15 (Vida de ecosistemas terrestres).

Adicionalmente, conlleva un mayor aprovechamiento de los recursos materiales como consecuencia de una menor pérdida de material y un menor desgaste de los componentes debido a la ausencia de fricción. Esto no solo incrementa la vida útil de los elementos implicados sino también reduce el tiempo de mantenimiento.

En definitiva, la implantación de un sistema innovador en cualquier industria supone una clara mejora en la calidad de vida de las personas y el cuidado del medio ambiente, reduciendo la exposición a radiación ionizante, la acidificación y la eutrofización, tanto terrestre como marina.

5.2 Estudio del impacto social

A nivel social, el avance tecnológico y la modernización de la industria conlleva la generación de nuevos puestos de trabajo, por lo que es necesaria la inversión en formación de personal especializado en aspectos como la automatización, la electrónica y la robotización.

Según el Instituto Nacional de Estadística (también conocido por las siglas INE), en el cuarto trimestre de 2022, se registró un total de 3.023.899 personas en paro en España, concentrándose especialmente en las comunidades autónomas de Andalucía y Extremadura. Esto supone una tasa de paro para 2022 del 12,87%, valor sobre el cual se estima un decremento como consecuencia del avance tecnológico y la aparición de nuevos puestos de trabajo, lo que conlleva un incremento de la población activa del país.

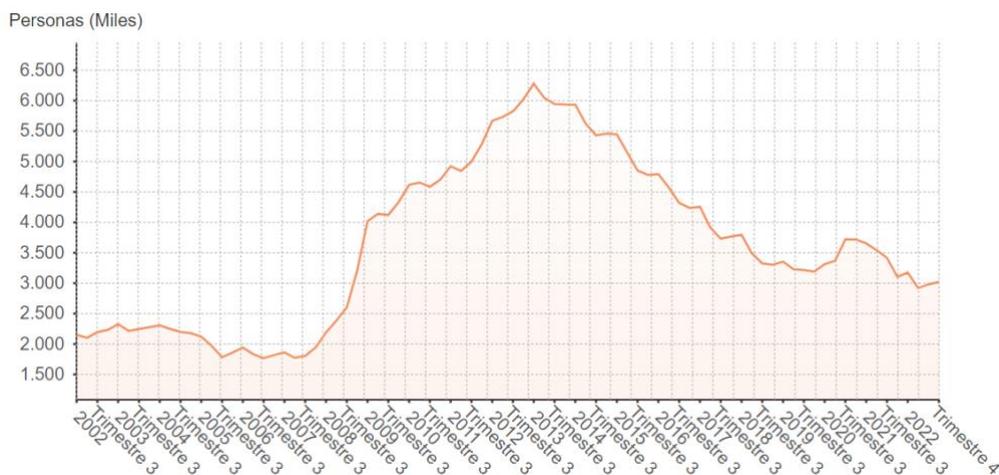


Figura 167. Población en paro en España 2002 – 2022

Fuente: Instituto Nacional de Estadística

Además, con el objetivo de que el sector industrial adquiriera un papel principal en cuanto a la generación de valor a nivel nacional, es necesaria la implantación en la sociedad de una mentalidad de progreso y bienestar basada en el uso de energías sostenibles, así como el alcance de una concienciación común. Esto supone una mentalidad común en aspectos de sostenibilidad, optimización de recursos y cuidado del medio ambiente.

Se encuentra alineado con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible: Objetivo 4 (Educación de Calidad), Objetivo 5 (Igualdad de género) y Objetivo 10 (Reducción de las desigualdades).

Los dos últimos (ODS 5 y ODS 10) son considerablemente importantes ya que el porcentaje de población masculina en el sector industrial es considerablemente superior a la población femenina. Concretamente un 18.3% del sector industrial son hombres y un 8.4% son mujeres, lo cual es verificable en la siguiente gráfica:

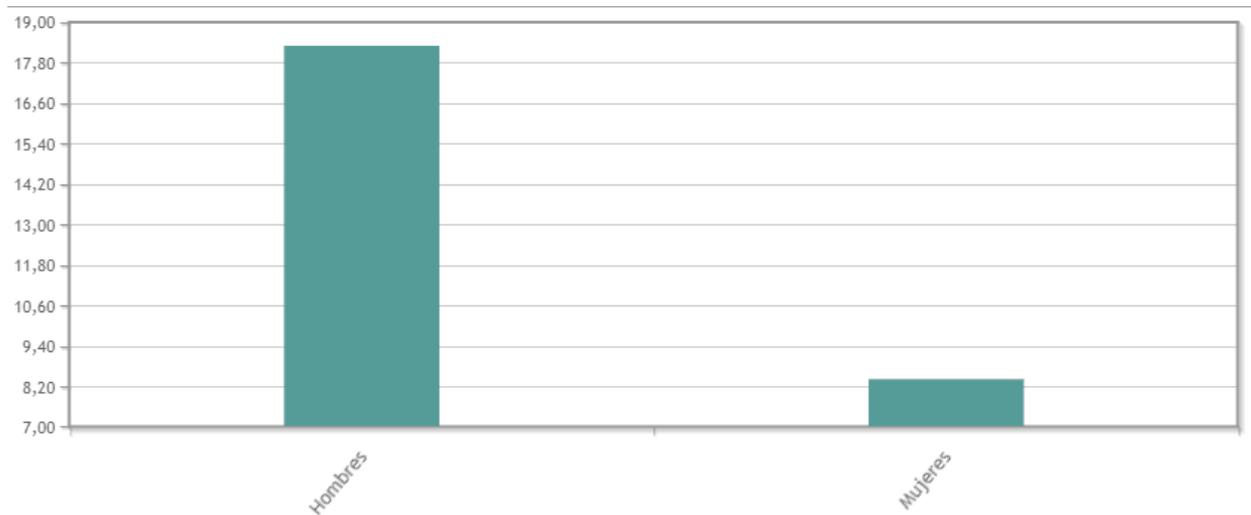


Figura 168. Ocupación de hombres y mujeres en Sector Industrial 2022

Fuente: Instituto Nacional de Estadística

Esto tiene su causa en que, anteriormente, los trabajos en el ámbito industrial requerían de mayores capacidades a nivel físico. Sin embargo, la aparición de la industria 4.0 y la automatización de los procesos ha provocado que la capacidad

intelectual resulte más significativa frente a las capacidades físicas, lo que incrementa aún más la importancia de la formación del personal.

5.3 Estudio del impacto económico

En el aspecto económico, la implantación de un sistema de transporte XTS se alinea con las Directrices Generales de la Nueva Política Industrial Española 2030. Ésta, como se ha comentado previamente, se centra en alcanzar una mejora de la competitividad a nivel internacional y la productividad de los procesos, lo que afecta a la implicación de la industria sobre el Producto Interior Bruto (también conocido con las siglas PIB).

El peso del sector industrial en el PIB nacional era del 18,7% en 2000, experimentado ligeras variaciones a lo largo de los años hasta alcanzar un valor del 15,31% en 2022 (según el Informe *Una perspectiva económica de la situación de la industria en España*), lo cual resulta considerablemente inferior al valor esperado por la Unión Europea.

A lo largo del último año, las variaciones en el sector industrial han sido escasas, constituyendo una mayor aportación al PIB nacional aquellas actividades desarrolladas en regiones altamente industrializadas como Navarra, el País Vasco o Cataluña, la cual concentra una mayor proporción de la industria española y con una aportación del PIB español del 22,1%. Tras esta, se posiciona la Comunidad de Madrid con una aportación del 11,1% y posteriormente Andalucía con un 11%. Estos datos han sido publicados por el Instituto Nacional de Estadística en 2020, lo cual se verifica en la siguiente figura:

Tabla 3. Cifra de negocios y población ocupada por Comunidad Autónoma España 2020

Fuente: Instituto Nacional de Estadística

**Cifra de negocios en el Sector Industrial por comunidades y ciudades autónomas.
Año 2020**

Comunidad Autónoma	Cifra de negocios			Personal ocupado		
	Millones de euros	% sobre el total	Variación anual (%)	Media anual	% sobre el total	Variación anual (%)
Andalucía	65.381	11,0	-17,5	237.982	10,5	-0,5
Aragón	30.676	5,2	-3,4	103.610	4,6	1,4
Asturias, Principado de	11.946	2,0	-14,7	48.574	2,2	-4,4
Baleares, Illes	4.306	0,7	-12,1	25.759	1,1	-4,2
Canarias	6.442	1,1	-13,3	37.929	1,7	-4,0
Cantabria	8.055	1,4	-12,1	31.583	1,4	-4,7
Castilla y León	35.919	6,1	-9,9	132.179	5,9	-0,2
Castilla-La Mancha	25.880	4,4	-10,6	101.548	4,5	-0,5
Cataluña	130.917	22,1	-12,0	483.470	21,4	-1,9
Comunitat Valenciana	64.322	10,8	-9,4	278.224	12,3	-1,0
Extremadura	7.793	1,3	-3,9	29.391	1,3	-0,5
Galicia	39.405	6,6	-8,3	144.969	6,4	0,8
Madrid, Comunidad de	65.848	11,1	-8,3	231.214	10,2	-0,4
Murcia, Región de	20.727	3,5	-10,7	80.239	3,6	0,6
Navarra, Comunidad Foral de	20.408	3,4	-6,8	74.081	3,3	0,2
País Vasco	49.609	8,4	-15,7	188.576	8,4	-2,3
Rioja, La	5.482	0,9	-9,3	25.169	1,1	-2,3
Ceuta	150	0,0	-1,5	982	0,0	1,6
Melilla	97	0,0	-25,1	494	0,0	-4,2
TOTAL	593.363	100,0	-11,2	2.255.975	100,0	-1,0

En definitiva, se percibe una contribución del sector industrial al PIB nacional del 16,1%, lo que a nivel cuantitativo corresponde con 593.363 millones de euros.

Con respecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, se alinea con los siguientes: Objetivo 8 (Trabajo Decente y Crecimiento Económico), Objetivo 16 (Paz, Justicia e Instituciones Sólidas) y el Objetivo 17 (Alianzas para lograr los objetivos).

Capítulo 6. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA

6.1 Concepción

La determinación de la viabilidad económica del proyecto se ha realizado en base a los resultados del estudio de mercado realizado, el cual examina el mercado

actual y determina el método de empleo de las herramientas y avances que conlleva la implantación integral de la industria 4.0 en el proceso productivo. En primer lugar, se analizará el mercado actual a nivel nacional y el impacto de la puesta en marcha del proyecto a nivel económico y social, principalmente. En segundo lugar, se considerarán todos los costes implicados en el proyecto, incluyendo todos aquellos incurridos en las fases de preparación, puesta en marcha y mantenimiento. Finalmente, se realizará un análisis cuantitativo de los indicadores como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación (Payback), lo que permitirá determinar el grado de viabilidad económica de proyecto y la seguridad de la inversión económica. Esto influirá en la obtención de los recursos materiales, económicos y humanos que permitirán la realización íntegra del proyecto.

Las instalaciones que integran recursos y herramientas relativas a la industria 4.0, la automatización de los procesos y la robotización suponen numerosas ventajas debido a una mayor contribución en la reducción de emisión de gases del efecto invernadero, una mejora en el aprovechamiento de los recursos, así como un incremento en la productividad y eficiencia de la planta. Sin embargo, conllevan un coste adicional como consecuencia de una mayor inversión en capital intelectual y una mayor complejidad de instalación y mantenimiento.

La configuración modular propia del sistema XTS dota a la instalación de una amplia flexibilidad, permitiendo la implantación de cambios sin alteraciones significativas en la planta en la que se encuentre. Debido a que se trata de un sistema de transporte eficiente y ambientalmente sostenible, contribuye con los planes de actuación a nivel nacional y europeo, siendo únicamente necesaria la corriente eléctrica para el movimiento de los movers a lo largo de carril.

El proyecto consiste en la automatización de varias fases del proceso de producción de lentes oftálmicas, las cuales constituyen un aspecto relevante en nuestra vida cotidiana ya que alrededor del 28% de la población mundial sufre problemas de visión. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la propuesta desarrollada admite compatibilidad de ser implantada en ámbitos diversos como farmacéutico, textil, logística etc.

Una vez identificado el problema a resolver, se procede a estimar el tamaño óptimo teniendo en cuenta las capacidades de diseño, la capacidad del sistema y la capacidad real.

La capacidad de diseño hace referencia al volumen de producción en condiciones normales de operación, lo cual se ve afectado por el número de horas totales de funcionamiento de los equipos. La capacidad del sistema es el número máximo de unidades que el equipo es capaz de producir de manera integrada. Por último, la capacidad real es relativa a un nivel medio de producción en condiciones normales de ejecución, teniendo en consideración los problemas reales que surgen durante la puesta en marcha de los equipos.

Los resultados de estas capacidades se muestran en número de unidades producidas anualmente.

Para el desarrollo del proyecto propuesto es necesario, primero, la determinación del procedimiento encaminado a la obtención de las tecnologías necesarias para la instalación de los equipos implicados. Posteriormente, se tendrán en cuenta los costes de adquisición del proyecto, lo que incluye el coste de mano de obra, coste de ingeniería y coste del sistema de transporte XTS (variable según las especificaciones de la planta), entre otros.

El marco de actuación de todo el proyecto se encuentra bajo la normativa legal vigente, cumpliendo con los reglamentos pertinentes.

6.1.1 Estudio de mercado

A lo largo de la historia, el desarrollo económico y los avances tecnológicos han provocado modificaciones en la oferta y la demanda de productos, priorizando el alcance de una mayor calidad y productividad, así como una reducción en los costes de producción. Esto se conoce como filosofía de calidad.

Dicha filosofía hace frente a un reto de identificación de posibles fuentes de incidencia y prevención, de manera que se eviten las incidencias, los excedentes y, en consecuencia, se reduzcan los costes de no calidad. Se debe tener en cuenta que esta filosofía se alinea con los sistemas de fabricación flexibles, también conocidos por las siglas FMS (Flexible Manufacturing System) relativos a aquellos en los que los cambios o modificaciones en la secuencia o programación no suponen un elevado impacto en los costes. Es el caso del sistema de transporte lineal XTS.

Estos sistemas se basan en tecnologías de la información de manera exhaustiva, centrándose en tres pilares básicos: mejorar la productividad y la calidad a través de la integración de la automatización a lo largo de toda la cadena de valor, el empleo de máquinas polivalentes y finalmente, la coordinación globalizada de todas las operaciones a partir de un sistema integrado. En consecuencia, la implantación de sistemas de producción flexibles supone una ventaja competitiva frente al resto de compañías, siendo un aspecto claramente diferenciador en términos de eficiencia, productividad, costes incurridos y beneficios.

Según los datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística (también conocido por las siglas INE), la cifra de negocios del Sector Industrial en España disminuyó un 11.3% en 2020, lo que supone un valor de 604.088 millones de euros. Dicho valor visibiliza la necesidad de implementar cambios y mejoras que permitan poner fin a la tendencia decreciente y gracias a los avances tecnológicos, el internet de las cosas y la automatización industrial, alcanzar una tendencia creciente que permita incrementar la prosperidad económica a nivel nacional e incrementar su contribución al PIB.

Además, en ese mismo año, la industria manufacturera concentró el 82.3% de la facturación total del sector, el cual puede ser incrementado de manera significativa a partir de la implantación de sistemas de producción flexibles como el XTS que permitan la producción bajo demanda, la implementación de cambios en el proceso productivo, un flujo de trabajo continuo o irregular, según las especificaciones y características del producto etc.

Una de las principales ventajas que ofrece el empleo de un sistema de transporte lineal como el XTS es la posibilidad de definir diferentes perfiles de movimiento para cada mover, a diferencia de las cintas de transporte convencionales, en las cuales todos los productos siguen un mismo perfil de movimiento.

El sistema de transporte lineal de Beckhoff proporciona una mayor flexibilidad en la cadena de producción gracias a la posibilidad de asignar un perfil de movimiento individual para cada mover (con parámetros ajustables de posición, velocidad, aceleración y jerk, entre otros), lo cual resulta de elevada utilidad en cadenas de producción constituidas por procesos de diferente duración y características.

6.1.2 Tamaño óptimo

Para poder contemplar el tamaño óptimo del proyecto es necesario calcular y analizar la capacidad de diseño, la capacidad del sistema y la capacidad real.

Se debe tener en consideración que los valores de capacidad de diseño, capacidad del sistema y capacidad real variarán según los perfiles de movimiento definidos para cada uno de los movers, o en este caso, para cada fase del proceso productivo. De esta manera y siempre y cuando los parámetros relativos a los perfiles de movimiento de cada mover se encuentren por debajo del límite máximo, cuanto mayor sea la velocidad de movimiento de estos, mayor será la productividad y la tasa de producción.

El sistema cuenta con un total de 14 módulos de 250 milímetros, de los cuales 10 son rectos y cuatro de ellos poseen una curvatura de $\pm 90^\circ$, lo que permite que todo el sistema de transporte constituya un circuito cerrado por el que circulen los movers. Además, la aplicación ha sido diseñada para operar con ocho movers, siendo posible aumentar o disminuir este valor a partir de escasas modificaciones en el código de control realizado en TwinCAT 3.

En la aplicación desarrollada, el sistema de transporte XTS abarca tres fases del proceso de producción de lentes oftálmicas, concretamente las fases de sujeción, generación del perfil de la lente y pulido de las mismas para que éstas se dirijan a la siguiente fase del proceso productivo.

Estas fases se diferencian en aspectos como la posición de parada de los diferentes movers para cada estación, los perfiles de movimiento que adoptarán los movers hasta alcanzar dicha estación y finalmente, la señal de inicio de movimiento hacia la siguiente estación (pudiendo ser la activación de la salida de un temporizador o una entrada digital).

Para el cálculo del tamaño óptimo de la instalación se debe considerar la duración de cada una de las etapas del proceso productivo de lentes oftálmicas, lo cual se muestra a continuación:

- Posicionamiento y sujeción de la lente: 20 segundos por lente, lo que supone un tiempo individual de 10 segundos.
- Generación del perfil posterior de las lentes a partir del método CNC: 90 segundos por par de lentes, lo que supone un tiempo individual de 45 segundos.

Se debe tener en cuenta que, en el programa de control el tiempo de generación del perfil posterior de las lentes es de 3 segundos con el objetivo de agilizar la visualización del funcionamiento del sistema.

- Pulido: 12 segundos por lente.
- Retirada de las lentes: aproximadamente 8 segundos por lente.
- Lavado de lentes en agua caliente a 50 ° C: esta fase se realiza en grupos de cuatro lentes, lo que supone una duración de 30 segundos. En consecuencia, el tiempo por lente es 7.5 segundos.
- Tintado de lentes: este proceso se realiza en grupos de cuatro lentes, lo que supone una duración total de 8 segundos e individual 2 segundos.
- Aplicación de tratamiento superficial: 2 segundos por lente.

- Secado de las lentes: la fase de secado tiene una duración de 2 horas, lo que equivale con 7.200 segundos. Teniendo en cuenta que el secado se realiza simultáneamente en una cámara con capacidad de 40 lentes, el tiempo de secado por lente es 180 segundos.
- Inspección a partir de visión artificial: 5 segundos por lente.
- Empaquetamiento: 7 segundos por lente.

En consecuencia, el cómputo de la duración de todas las fases que integran el proceso productivo es 278,5 segundos por lente producida. Este valor será considerado en el cálculo de la capacidad de diseño, capacidad del sistema y capacidad real.

La capacidad de diseño hace referencia a la tasa de producción de lentes oftálmicas en condiciones normales de operación. Se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Capacidad de diseño} = \frac{\text{Tiempo total en funcionamiento}}{\text{Tiempo de fabricación unitario}}$$

Para el cálculo de la capacidad de diseño consideraremos que el sistema opera de manera ininterrumpida durante todo el año exceptuando días festivos, domingos y el mes de agosto, lo que supone un total de 273 días laborales (teniendo en consideración 14 festivos, 48 domingos y 31 días de agosto).

Considerando que el sistema opera 16 horas al día de manera continua, el tiempo total de funcionamiento a lo largo de un año es de 4.368 horas. Para el cálculo del tamaño óptimo se considera el tiempo de todo el proceso estudiado, lo que supone un valor de 278,5 segundos. En consecuencia, la capacidad de diseño anual del sistema es la siguiente:

$$\text{Capacidad de diseño} = \frac{4.368 * 3.600 \text{ segundos}}{278,5 \text{ segundos}} = 56.462$$

La capacidad del sistema corresponde con el nivel máximo de producción en condiciones ideales de operación, calculándose a través de la siguiente expresión:

$$\text{Capacidad del sistema} = \frac{\text{Tiempo total en funcionamiento} - \text{Tiempo mantenimiento preventivo}}{\text{Tiempo de fabricación unitario}}$$

Para el cálculo de la capacidad del sistema consideraremos que el sistema opera de manera ininterrumpida durante todo el año, a excepción de su parada durante las tareas de mantenimiento y lubricación, por lo que es importante considerar lo siguiente:

- Los módulos y el sistema de sensorización que proporciona la posición de los movers debe ser revisado cada seis meses, lo que supone un total de dos visitas anuales durante toda la jornada laborable, lo que se considera como 16 horas.
- Los rodillos de los movers deben ser revisados cada tres meses, lo que supone un total de cuatro visitas anuales y 32 horas laborables.
- Los platos magnéticos de los movers deben ser revisados cada seis meses con el objetivo de detectar posibles fallos o consecuencias por abrasión. Esto supone dos visitas anuales y un tiempo estimado de 16 horas.
- La máscara del encoder debe ser revisada cada seis meses con el objetivo de verificar su correcto posicionamiento y funcionamiento. Esto supone dos visitas anuales y un total de 16 horas.
- Los raíles rectos y curvos deben ser revisados cada seis meses, lo que supone un total de dos visitas anuales y 16 horas laborables.

En consecuencia, el tiempo mínimo de mantenimiento preventivo al que debe someterse el sistema es de 96 horas.

En consecuencia, la capacidad del sistema es la siguiente:

$$\text{Capacidad del sistema} = \frac{(4.368 - 96) * 3.600 \text{ segundos}}{278,5 \text{ segundos}} = 55.222$$

Finalmente, la capacidad real de un proyecto hace referencia a un nivel promedio de producción en el que se tienen en cuenta las posibles contingencias operativas y reales. Se calcula a partir de la siguiente expresión:

Capacidad real =

$$\frac{\text{Tiempo total en funcionamiento} - \text{Tiempo mantenimiento preventivo} - \text{Tiempo de inactividad}}{\text{Tiempo de fabricación unitario}}$$

El tiempo de mantenimiento preventivo es el comentado previamente mientras que el tiempo de inactividad ha sido estimado como 48 horas, lo que supone un valor de capacidad real de:

$$\text{Capacidad real} = \frac{(4.368 - 96 - 48) * 3.600 \text{ segundos}}{278,5 \text{ segundos}} = 54.601$$

6.1.3 Estudio técnico

Para el estudio técnico, es necesario destacar cuatro aspectos relacionados con la instalación y funcionamiento del sistema: adquisición de maquinaria y equipos, proceso productivo, distribución en planta y finalmente, estructura organizativa.

En cuanto al proceso productivo y la adquisición de los recursos necesarios, la tecnología empleada son los módulos AT2001-0250-0003 / AT2000-0250 / AT2050-0500 y los movers AT9011-0070-0550 de la compañía Beckhoff Automation. Con respecto a los módulos, el sistema cuenta con dos módulos de alimentación (módulos in-feed), módulos rectos y módulos con curvatura de $\pm 90^\circ$, con el objetivo de que el sistema constituya un circuito cerrado en su totalidad. Con respecto a los movers, éstos cuentan con 6 rodillos tipo ZX9011-0070 que facilitan el rodamiento de los mismos sobre el carril.

6.2 Estudio económico y desarrollo de presupuesto

El objetivo que persigue la realización de este estudio es determinar la rentabilidad del proyecto, lo que permitirá evaluar la viabilidad económica del mismo.

Para poder llevar a cabo el estudio, se debe calcular el valor de parámetros como el VAN (Valor Actual Neto), TIR (Tasa Interna de Retorno) y el Payback (Periodo de recuperación).

Los criterios de evaluación de la inversión se encuentran recogidos en la siguiente tabla:

Tabla 4. Criterios de evaluación de la inversión según VAN y TIR

Fuente: Elaboración propia

VAN > 0: Inversión rentable con beneficios.	TIR > k: Proyecto aceptable.
VAN = 0: Inversión no genera beneficios ni sufre pérdidas.	TIR = k: Rentabilidad nula, analizar el resto de los parámetros.
VAN < 0: Inversión no rentable, con pérdidas.	TIR < k: Proyecto no alcanza la rentabilidad mínima.

6.2.1 Costes de ingeniería

Para llevar a cabo el proyecto con éxito, desde la fase de planificación hasta el final del mismo, ha sido necesario considerar los costes de ingeniería, lo cual hace referencia al capital intelectual del equipo de ingeniería implicado. Este ha sido evaluado como un 14% del capital inicial, lo que supone un valor de 6.870,01 €.

Este valor ha sido calculado a partir de una estimación de 90 horas de trabajo y un coste medio de 76.3 € por hora trabajada.

6.2.2 Costes de equipos y maquinaria

Como se ha comentado en apartados previos de este documento, para llevar a cabo el proyecto es necesaria la solicitud y posterior adquisición de los equipos descritos, cuyos precios son expuestos a continuación.

- eXtended Transport System

El sistema de transporte se compone de 16 módulos, de los cuales dos son módulos rectos in-feed, diez son módulos rectos sin alimentación y los cuatro restantes poseen una curvatura de $\pm 90^\circ$, formando un circuito cerrado de longitud 4.000 milímetros.

Los módulos in-feed son aquellos que poseen una toma directa de alimentación a través de la conexión con cables de potencia, el modelo de módulo empleado es AT2001-0250-0003.

Por otra parte, los módulos rectos sin alimentación se caracterizan por obtener la potencia de alimentación de los módulos in-feed a través de tarjetas posicionadas entre módulos, el modelo empleado es AT2000-0250.

El sistema ha sido configurado para un total de ocho movers, sin embargo, existe la posibilidad de modificar el número de movers según las características de la aplicación desarrollada. El modelo de mover es AT9011-0070-0550, el cual se caracteriza por presentar una longitud de 70 mm, dos platos magnéticos de 50 mm con cinco imanes cada uno y la presencia de seis rodillos tipo ZX9011-0070.

El coste unitario de cada uno de los módulos, así como el número de unidades necesarias de los mismos se encuentra recogido en la siguiente tabla:

Tabla 5. Costes de sistema XTS

Fuente: Elaboración propia

Descripción	Modelo	Unidades necesarias	Coste unitario	Coste total
Módulos in-feed	AT2001-0250-0003	2	2.229,00	4.458,00
Módulos rectos	AT2000-0250	10	2.132,00	21.320,00
Módulos 180°	AT2050-0500	2	4.513,00	9.026,00
Rail recto	AT9100-1500	2	438,3	876,6
Rail 180 °	AT9050-0500-0070	2	482,9	965,8
Movers	AT9011-0070-0550	8	395,9	3.167,20
Set rodillos	ZX9011-0070	1	82,65	82,65
TOTAL				39.896,25

Esto supone un coste total de los componentes del XTS de 39.896,25 €.

La proporción de cada uno de los costes individuales que componen el sistema de transporte XTS se muestra en el siguiente gráfico circular.

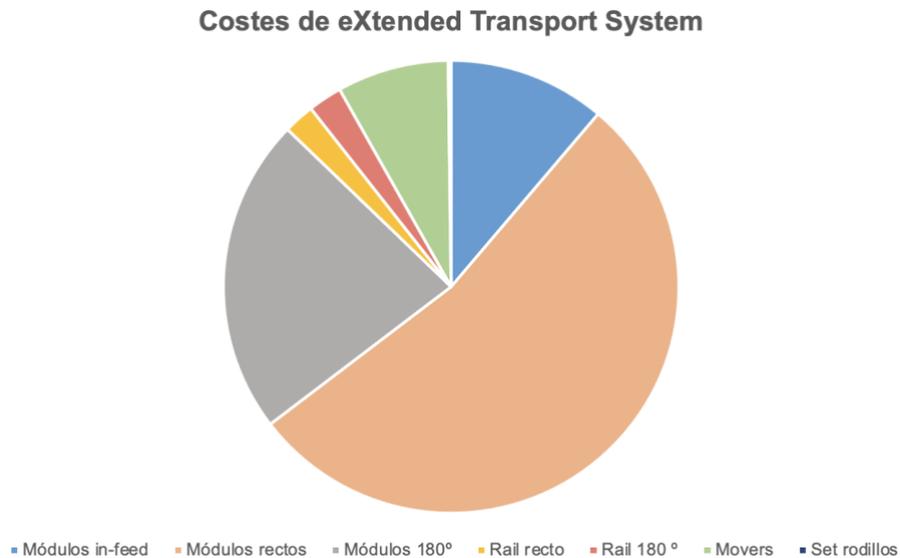


Figura 169. Diagrama circular de costes de XTS

Fuente: Elaboración Propia

Se debe tener en cuenta que, debido a que el coste del set de los rodillos es significativamente inferior al resto de costes, no aparece en el gráfico ya que no alcanza el 1% con respecto al resto de costes.

- Terminales

Como se ha comentado previamente, para lograr el correcto funcionamiento del sistema han de incluirse una serie de terminales que posibiliten la comunicación entre los componentes implicados, estos se describen a continuación:

El terminal EL9576 es empleado para estabilizar la tensión de la fuente de alimentación y proteger al sistema de manera que, en caso de que la energía acumulada supere los límites de capacidad de los condensadores, sea disipada a través de una resistencia de frenado.

El terminal 5101 es una tarjeta de comunicaciones que permite la conexión directa con los encoders incrementales que proporcionan la posición de los movers en tiempo real.

El terminal EL1008 es una tarjeta de ocho entradas digitales que permite obtener información sobre el estado del sistema y actuar en consecuencia según las órdenes de control.

El terminal EL2008 es una tarjeta de ocho salidas digitales que posibilita la modificación del estado de los actuadores según la información obtenida por el terminal EL1008 y las órdenes programa de control.

La cabecera EK1100 actúa como interfaz entre el protocolo EtherCAT a nivel de bus de campo y el resto de terminales EtherCAT.

Los costes unitarios de cada uno de los terminales se exponen a continuación:

Tabla 6. Costes de terminales

Fuente: Elaboración propia

Descripción	Modelo	Unidades necesarias	Coste unitario	Coste total
Cabecera	EK1100	1	111,4	111,4
Resistencia de frenado	EL9576	1	134,1	134,1
Comunicación	EL5101	1	187,5	187,5
Entradas digitales	EL1008	1	39,8	39,8
Salidas digitales	EL2008	1	43,75	43,75
TOTAL				516,55

Esto supone un coste total de los terminales de 516,55 €.

La proporción de cada uno de los costes de los terminales y la resistencia de frenado se encuentra recogido en el siguiente gráfico circular.

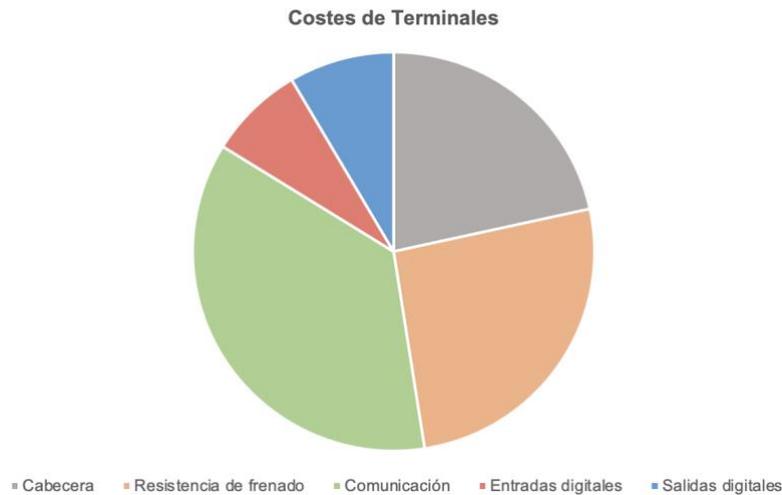


Figura 170. Diagrama circular de costes de terminales

Fuente: Elaboración Propia

- Controlador y elementos adicionales

Para llevar a cabo el control del sistema se ha empleado el PC industrial C6930 -1106 - 0050 debido a su elevada robustez y multiplicidad de puertos (USB, DVI, RJ45), lo que proporciona no solo una unidad de procesamiento compacta sino también un elevado rendimiento.

Adicionalmente, se ha integrado un multiplicador de puertos Ethernet CU2508 con el objetivo de posibilitar el envío de tramas desde el controlador hacia los dispositivos de campo. Cuenta con ocho puertos, cuatro de ellos destinados a la comunicación con el resto de los equipos/ tarjetas y los restantes, destinados para la conexión con los módulos in-feed del sistema.

Además, se ha implementado un extender CU8801-0000 con el objetivo de posibilitar la extensión del cable USB hasta una longitud de cinco metros.

Con el objetivo de incrementar el control y la monitorización del sistema se ha implementado un panel HMI que cuenta con diversos pulsadores y una seta de emergencia, cuya activación detendrá inmediatamente el funcionamiento del XTS. En éste se mostrará el estado actual del sistema y un registro con los posibles errores y/o avisos, entre otros aspectos.

Resulta evidente considerar la necesidad de cables de red para la comunicación e integración de todos los equipos implicados en el sistema.

Los costes unitarios de los equipos que componen el cuadro de control se muestran a continuación:

Tabla 7. Costes de controlador y elementos adicionales

Fuente: Elaboración propia

Descripción	Modelo	Unidades necesarias	Coste unitario	Coste total
PC industrial	C6930-0050	1	1.824	1.824
Multiplicador puertos EtherCAT	CU2508	1	369,3	369,3
Extender	CU8801-0000	1	112	112
Panel HMI	CP3916-0000	1	2297,3	2297,3
Fuente de alimentación para terminales	PS1111-2403-0002	1	65,5	65,5
Fuente de alimentación para control y comunicación	QS20.241	1	348	348
Fuente de alimentación para XTS	QS240.241	1	798,96	798,96
Cables de conexión USB	Estándar	1	4,99	4,99
Cables de conexión RJ45	ZK1090-9191	3	24,86	74,58
TOTAL				5.895

Adicionalmente, se han incluido en otra tabla los costes de los elementos que componen el panel HMI, los cuales se muestran a continuación.

Tabla 8. Costes de componentes de panel HMI

Fuente: Elaboración propia

Descripción	Modelo	Unidades necesarias	Coste unitario	Coste total
Panel de Control	CP3916-0000	1	1.284	1.284
Extensión pulsadores	C9900-G034	1	565,3	565,3
Soporte	C9900-M753	1	222,3	222,3
Kit conexión	C9900-K630	1	225,7	225,7
TOTAL				2297,3

En consecuencia, el cómputo de los costes mostrados previamente es 5.895 €.

La proporción de cada uno de los costes del controlador y los elementos adicionales se encuentra recogido en el siguiente gráfico circular.

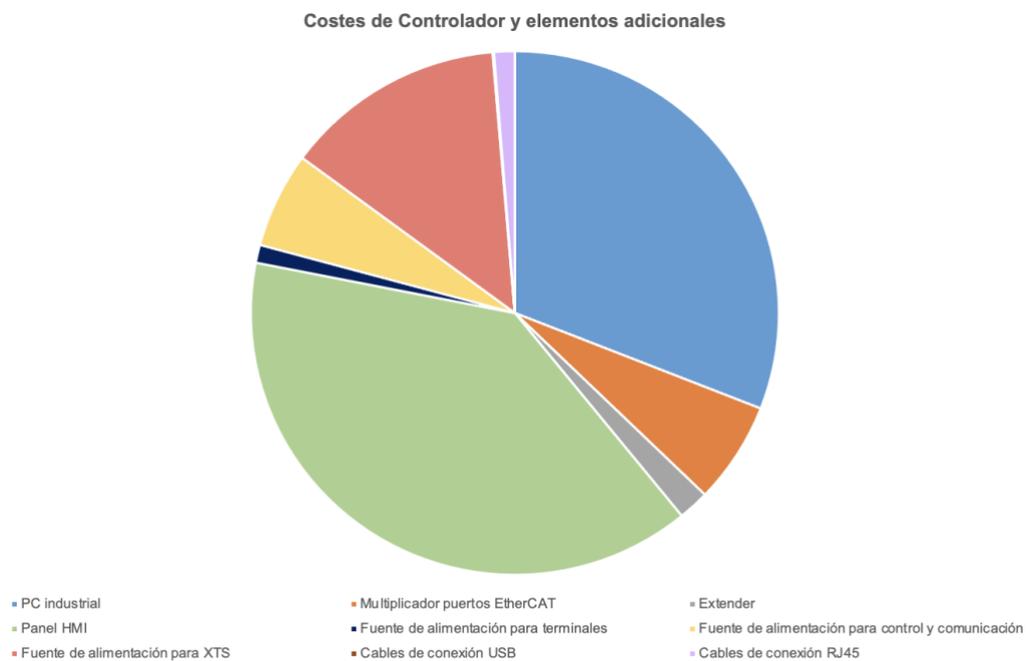


Figura 171. Diagrama circular de costes de controlador y elementos adicionales

Fuente: Elaboración Propia

- Licencias

Se debe tener en cuenta que para lograr el desarrollo del proyecto es necesaria la solicitud y adquisición de las licencias pertinentes (correspondientes a un platform level 50), las cuales se muestran a continuación con sus respectivos costes.

Tabla 9. Costes de licencias

Fuente: Elaboración propia

Descripción	Licencia	Unidades necesarias	Coste unitario
PLC/NC PTP 10	TC1250-0250	1	489,4
Collision Avoidance	TF5410-0250	1	108,8
XTS Extension	TF5850-0250	1	1.305
HMI Server	TF2000-0250	1	391,5
TOTAL			2294,7

En consecuencia, el coste total de las licencias es de 2.294,70 €.

A continuación, se muestra la proporción de cada uno de los costes individuales de las licencias con respecto al coste global de las mismas en un gráfico circular.

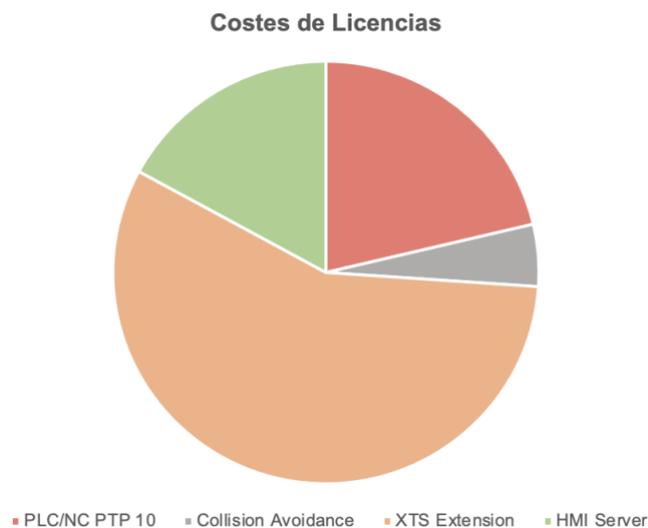


Figura 172. Diagrama circular de costes de licencias

Fuente: Elaboración Propia

- Elementos de seguridad y protección

Para dotar de seguridad al sistema ha sido necesario integrar una serie de elementos como automáticos magnetotérmicos, diferenciales y contactores en el cuadro de control.

Los costes unitarios de estos componentes, así como el cómputo de todos se encuentra recogido en la siguiente tabla:

Tabla 10. Costes de elementos de protección y seguridad

Fuente: Elaboración propia

Descripción	Modelo	Unidades necesarias	Coste unitario	Coste total
Contactador Siemens	3RT2526-2BB40	1	105	105
Diferencial Siemens	15SU1354-6KK10	1	146,14	146,14
Automático Siemens	5SY6516-7	2	57	114
Automático Siemens	5SY4204-7	1	75,99	75,99
Automático DC	5SL3016-7	2	13,83	27,66
TOTAL				469,04

En consecuencia, el coste total de los elementos mostrados previamente es de 469,04 €.

Adicionalmente, se ha desarrollado un gráfico circular que muestra la proporción de los costes de los componentes individualmente con respecto al coste total.

Costes de elementos de protección y seguridad

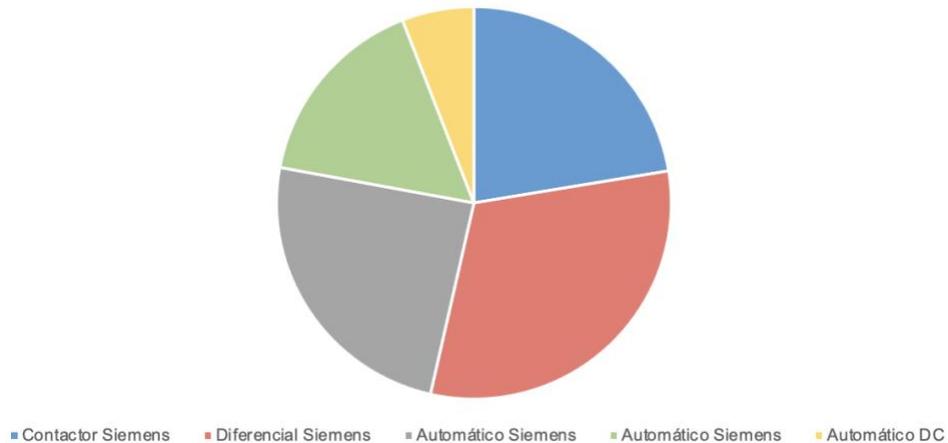


Figura 173. Diagrama circular de costes de elementos de protección y seguridad

Fuente: Elaboración Propia

6.2.3 Coste de mano de obra

Para la planificación y ejecución del proyecto hay que tener en cuenta los recursos humanos necesarios para la instalación, puesta en marcha y tareas de mantenimiento. Debido a la complejidad de los equipos implicados, será necesaria la involucración de personal especializado, por lo que se ha considerado la presencia de dos empleados en la propia industria y un empleado con rol rotativo, de manera que éste sustituya al resto de empleados en caso de necesidad.

Se ha estimado una jornada laboral de 16 horas en dos turnos de 8 horas a lo largo de toda la semana, excluyendo domingos, días festivos y el mes de agosto.

Para el cálculo del coste de mano de obra se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Salario bruto anual: Se ha considerado un salario medio de 16.000 € anuales por empleado contratado.
- Seguridad social: incluye contingencias comunes (23,6% del salario bruto) y contingencias profesionales (3,5%), prestación por desempleo (5,5%),

formación (0,6%) y el fondo de garantía salarial, también conocido como FOGASA (0,2%).

Teniendo en cuenta el salario bruto anual, se obtiene un coste de seguridad social por empleado de:

Seguridad Social = 3.776 € + 800 € + 96 € + 32 € = 5.254 € anual por empleado.

En consecuencia, el coste de mano de obra individual es de 21,254 € al año. Teniendo en cuenta que la instalación cuenta con tres empleados, el coste de mano de obra total asciende hasta 63.762 € al año.

6.2.4 Costes de mantenimiento

Los costes relativos a las tareas de mantenimiento son de elevada importancia debido a que harán frente a posibles contingencias surgidas durante la puesta en marcha y el funcionamiento de los equipos. Con el objetivo de evitar la carencia de fondos económicos, los cuales son necesarios para llevar a cabo las tareas de mantenimiento pertinentes se ha considerado abonar una cuota fija anual, que ha sido evaluada como un 4% de la inversión inicial, lo que corresponde a un valor de 2.237,66 €.

Esto incluye la adquisición del material de engrase (de teflón) que permite el deslizamiento correcto de los movers sobre el carril, así como la compra de rollers adicionales en caso de rotura. Además, se debe contemplar la posibilidad de sustituir las escobillas de carbono presentes en el carril guía mecánico, cuya funcionalidad de referenciación a tierra hace que sea uno de los elementos prioritarios a considerar en el ámbito de seguridad.

Se puede observar que los costes de mantenimiento fijados no poseen un valor muy elevado debido a la alta fiabilidad y baja fricción del XTS.

6.2.5 Costes futuros

Los costes futuros hacen referencia a todos aquellos costes incurridos una vez finalizada la ejecución del proyecto, como es el caso del mantenimiento o posibles averías de los componentes y/o equipos.

Los equipos implicados en el proyecto cuentan con una garantía de un año tras el momento de venta de los mismos, así lo establece la compañía Beckhoff Automation en el contrato de compra - venta de los bienes.

En el caso de disponer de seguros, el periodo de garantía podrá ser extendido según las necesidades del cliente y las condiciones de la aseguradora, la cual fijará los precios según aspectos como características y complejidad de los equipos, entorno de trabajo de los mismos etc. Debido a que Beckhoff Automation ofrece un período de garantía de un año, así como soporte técnico gratuito, no resulta de elevada conveniencia la contratación de un seguro adicional.

En el instante de ejecución de proyecto los costes futuros han sido considerados nulos debido a la garantía ofrecida por Beckhoff Automation.

6.3 Inversión inicial

En la siguiente tabla se observa el coste total de la inversión inicial, obtenida a partir del cómputo de los costes analizados previamente:

Tabla 11. Coste de inversión inicial

Fuente: Elaboración propia

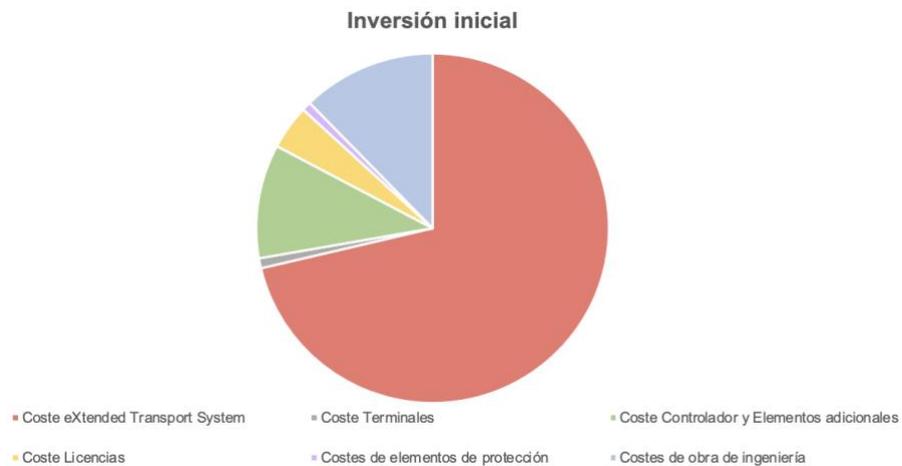
Descripción	Coste unitario
Coste eXtended Transport System	39.896,25
Coste Terminales	516,55
Coste Controlador y Elementos adicionales	5895
Coste Licencias	2294,7
Costes de elementos de protección	469,04
Costes de obra de ingeniería	6870,01
TOTAL	55.941,55

Esto supone un coste de inversión inicial de 55.941,55 €.

A continuación, se observa el peso de cada uno de los costes que componen la inversión inicial sobre el cómputo a partir de un gráfico circular.

Figura 174. Gráfico circular de costes de inversión inicial

Fuente: Elaboración Propia



6.4 Estimación de los costes

La inversión inicial propuesta para la realización del proyecto cuenta con seis elementos, los cuales han sido divididos en tres grados de correlación:

- Grado 1: constituido por los bienes materiales necesarios para el montaje y puesta en marcha, esto incluye el XTS, los terminales, el controlador y los elementos adicionales.
- Grado 2: representa los servicios necesarios para el diseño del proyecto, lo cual incluye los estudios previos y la obra de ingeniería.
- Grado 3: referente a los servicios de mano de obra necesarios para llevar a cabo la parte operativa del proyecto.

Para alcanzar una correcta estimación de los costes, se han llevado a cabo técnicas de Benchmarking como tarifas de costes de recurso y se ha obtenido lo siguiente:

- Para los componentes de Grado 1, los costes han sido fijados por los proveedores, en este caso Beckhoff Automation, por lo que no ha sido posible reducir el coste de los mismos.
- Los costes relativos a los estudios previos (estudio de mercado, estudio técnico y tamaño óptimo) así como los costes de ingeniería han sido estimados en base a publicaciones en ámbito de control y automatización industrial disponibles de forma gratuita en internet y acorde a la normativa vigente en cuanto a términos de contratación de personal.
- Los costes relativos a la mano de obra presentan un mayor margen como consecuencia de la necesidad de personal cualificado que conozca el funcionamiento de los equipos. La estimación del coste de mano de obra se ha realizado en base a la inversión inicial y la duración del proyecto.

Tabla 12. Costes adicionales del proyecto

Fuente: Elaboración propia

Descripción	Coste unitario
Mano de obra	63.762,00
Mantenimiento	2237,96
Costes futuros	0
TOTAL	65.999,96

En conclusión, se ha desarrollado un gráfico de costes individuales con el objetivo de facilitar la identificación del peso de cada uno de los costes sobre el proyecto:

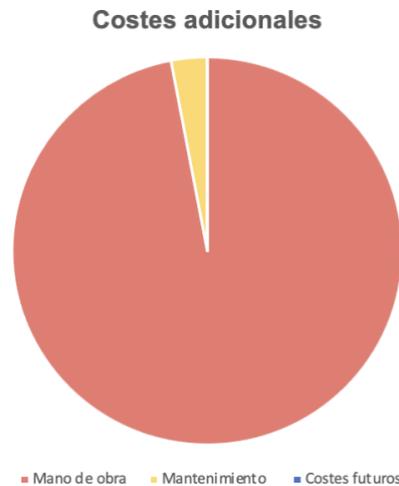


Figura 175. Gráfico circular de costes adicionales

Fuente: Elaboración Propia

6.5 Impuestos y tasas

Las tasas e impuestos que se han considerado para llevar a cabo el proyecto en la Comunidad de Madrid se exponen a continuación:

- IBI: se trata de un impuesto sobre bienes inmuebles, el cual puede oscilar entre 0.65% y 0.862%. Se ha considerado un valor de 0.7% sobre el coste de los bienes inmuebles, correspondientes a la nave industrial de 800 m², cuyo precio de adquisición fue 1.000.000 €. Esto supone un importe anual a abonar de 7.000 €, teniendo en cuenta que el coste de compra-venta de la nave ya se ha abonado en su totalidad.
- IAE: impuesto sobre actividades económicas regulado según la Ley 58/2003. Deberá abonarse si el proyecto es ejecutado por una persona autónoma o una pyme (pequeñas y medianas empresas) transcurridos dos años desde el momento de alta.

Una vez transcurridos los dos primeros años de actividad, deberá abonarse un coeficiente proporcional a los ingresos siempre y cuando éstos superen el millón

de euros para el año previo. El plazo de presentación de documentación y abono del importe es del 1 de enero al 14 de febrero del año en curso.

Para calcular el coste de este impuesto se debe tener en cuenta el consumo del XTS. El consumo nominal por cada módulo de alimentación (in-feed) es 768 W y debido a que existen 2 módulos de alimentación, el consumo total es 1,536 kW. El consumo conjunto del resto de equipos del cuadro de control es de 312 W. En consecuencia, el consumo total del sistema es 1,848 kW.

Según el Real Decreto Legislativo 1175/1990 de 28 de septiembre (Tarifas e Instrucción del impuesto sobre actividades económicas), el coste por kW relativo al Grupo 393 (Fabricación de Instrumentos Ópticos y material fotográfico y cinematográfico) es de 5,415119 €.

Para el cálculo del valor del impuesto IAE se debe llevar a cabo una serie de cálculos relativos a la cuantificación de la superficie. Para ello, se ha considerado que la instalación cuenta con 800 m² y se encuentra en Arroyo Molinos (Madrid). Así, observando las tablas que se encuentran recogidas en el Real Decreto Legislativo 1175/1990, se ha procedido a calcular el importe:

- Cuota fija: 10 €.
- Componente superficie local: $0.150253 \times 800 = 120,2$ €.
- Cuota tarifa: resultante de la suma de la cuota fija y el componente de superficie local, lo que supone un valor de 130,2 €.
- Cuota ponderada: resultante del producto de la cuota tarifa y el coeficiente de ponderación (variable según la cifra de negocio). En este caso, el coeficiente de ponderación tiene un valor de 1,29.
Así, la cuota ponderada es de 167,95 €.
- Cuota IAE: Resultante del producto de la cuota ponderada y el coeficiente de situación (variable según el número de habitantes del emplazamiento) y la suma con el recargo provincial. En este caso, el coeficiente de situación es 2 y el recargo provincial supone el 20% de la cuota ponderada.

En consecuencia, el importe de la cuota IAE es de 369,50 €.

Finalmente, la deuda tributaria anual es la resultante de la diferencia entre la cuota IAE y las bonificaciones. Debido a que el proyecto no cuenta con bonificaciones, la deuda tributaria IAE anual tiene un valor de 369,50 €.

- IS: impuesto de sociedades establecido según la Ley 27/2014. Deberá abonarse una tasa porcentual proporcional a la base imponible del ejercicio. Suele tener un valor entre el 15% y el 25%. Se ha considerado un valor intermedio del 20% sobre los ingresos.

En el caso más favorable, el volumen de ingresos por ventas asciende a 1.092.020 €, lo que corresponde a un valor del Impuesto de Sociedades anual de 273.005 €.

Con el objetivo de garantizar la fiabilidad de la inversión, se ha estimado un volumen de ventas inicial del 30%, incrementándose en un 5% cada año.

- IVA: impuesto sobre el valor añadido regulado por la Ley 37/1992. El tipo general de IVA es el 21%, variable según los bienes y servicios en adquisición. Éste deberá ser abonado en el momento de compra de los bienes y será devuelto posteriormente.

6.6 Amortización

Con el objetivo de llevar a cabo un correcto cálculo de amortización del proyecto se deben tener en cuenta los coeficientes de amortización establecidos según el Impuesto de Sociedades, lo cual se encuentra recogido en el artículo 12 de la Ley 27/2014 (Impuesto de Sociedades).

Los cálculos financieros se realizarán a partir del coeficiente lineal máximo con el objetivo de que el proyecto se desarrolle en un marco financiero conservador, lo que posibilitará una mejor reacción del mismo ante posibles contratiempos que provoquen alteraciones económicas en el proyecto.

En la siguiente tabla, obtenida del Artículo 12 de la Ley 27/2014 del Boletín Oficial del Estado, se observa el coeficiente lineal máximo y el periodo de años máximo para los bienes inmuebles. De esta tabla se ha tomado el valor de coeficiente 20% para equipos electrónicos y 33% para sistemas y programas informáticos.

Tabla 13. Coeficiente lineal y periodo de años máximo según Ley 27/2014

Fuente: Boletín Oficial del Estado

Tipo de elemento	Coeficiente lineal máximo	Periodo de años máximo
Obra civil		
Obra civil general	2%	100
Pavimentos	6%	34
Infraestructuras y obras mineras	7%	30
Centrales		
Centrales hidráulicas	2%	100
Centrales nucleares	3%	60
Centrales de carbón	4%	50
Centrales renovables	7%	30
Otras centrales	5%	40
Edificios		
Edificios industriales	3%	68
Terrenos dedicados exclusivamente a escombreras	4%	50
Almacenes y depósitos (gaseosos, líquidos y sólidos)	7%	30
Edificios comerciales, administrativos, de servicios y viviendas	2%	100
Instalaciones		
Subestaciones. Redes de transporte y distribución de energía	5%	40
Cables	7%	30
Resto instalaciones	10%	20
Maquinaria	12%	18
Equipos médicos y asimilados	15%	14
Elementos de transporte		
Locomotoras, vagones y equipos de tracción	8%	25
Buques, aeronaves	10%	20
Elementos de transporte interno	10%	20
Elementos de transporte externo	16%	14
Autocamiones	20%	10
Mobiliario y enseres		
Mobiliario	10%	20
Lencería	25%	8
Cristalería	50%	4
Útiles y herramientas	25%	8
Moldes, matrices y modelos	33%	6
Otros enseres	15%	14
Equipos electrónicos e informáticos. Sistemas y programas		
Equipos electrónicos	20%	10
Equipos para procesos de información	25%	8
Sistemas y programas informáticos.	33%	6
Producciones cinematográficas, fonográficas, videos y series audiovisuales	33%	6
Otros elementos	10%	20

El cálculo de la amortización de los bienes se ha calculado a partir de la vida útil de los mismos, la cual corresponde con un periodo de 10 años y 6 años dependiendo del equipo. Esto es observable en la siguiente tabla:

Tabla 14. Amortización de bienes

Fuente: Elaboración propia

Inmuebles	Coefficiente lineal máximo	Años (máximo)	Inversión (€)	Año 1 (€)
XTS	0,2	10	39.896,25	7979,25
Terminales	0,2	10	516,55	103,31
Controlador y elementos adicionales	0,2	10	5.895	1179
Protección y seguridad	0,2	10	469,04	93,808
Licencias	0,33	6	2294,7	757,251
Total			49.071,54	10112,619

Valor Residual 1 (€)	Año 2 (€)	Valor Residual 2 (€)	Año 3 (€)	Valor Residual 3 (€)
31.917,00	7979,25	23.937,75	7979,25	15.958,50
413,24	103,31	309,93	103,31	206,62
4.716	1179	3.537	1179	2.358
375,232	93,808	281,424	93,808	187,616
1537,449	757,251	780,198	757,251	22,947
38.958,92	10112,619	28.846,30	10112,619	18.733,68

Año 4 (€)	Valor Residual 4 (€)	Año 5 (€)	Valor Residual 5 (€)
7979,25	7.979,25	7979,25	-
103,31	103,31	103,31	-
1179	1.179	1179	-
93,808	93,808	93,808	-
24,687	-	-	-
9380,055	9.355,37	9355,368	0

Esto implica una amortización íntegra del coste de las licencias transcurridos los cuatro años desde el instante de compra y una amortización de los componentes restantes una vez transcurridos cinco años.

6.7 Coste total anual

El coste total anual se calcula a partir del coste de amortización anual, el coste de los empleados, los costes de mantenimiento y los costes relativos a los impuestos y tasas.

El valor de cada uno de los costes en un plazo de un año se muestra a continuación:

- Coste de amortización de 10.112,619 €.
- Coste de los salario y seguridad social de los empleados de 63.762 €.
- Coste de mantenimiento de 2.237,96 €.
- Impuestos y tasas, lo que incluye el cómputo del IBI, IAE e IS. Considerando el volumen máximo de ventas, donde el Impuesto de Sociedades alcanza el valor máximo, se procede a calcular el cómputo de impuestos y tasas, obteniendo un valor anual de 280.374,5 €.

6.8 Financiación del proyecto

En cuanto a la obtención de fondos, se debe tener en cuenta que el proyecto será ejecutado por una empresa de carácter anónimo (sociedad anónima S.A), por lo que no dispone de todos los recursos económicos necesarios para completar el proyecto.

Por ello, se ha considerado financiar el proyecto a partir de fondos propios y un préstamo proporcionado por una entidad financiera. Los fondos propios harán frente a los costes de personal y los costes de mantenimiento en su totalidad. Por otra parte, se solicitará la concesión de un préstamo a la entidad bancaria relativo a los costes de bienes materiales y costes de obra de ingeniería.

Para el cálculo del préstamo, se debe diferenciar entre dos tipos de interés, los conocidos como TIN y TAE. La tasa de interés nominal (TIN) hace referencia al porcentaje fijo de pago por el dinero prestado mientras que la tasa anual equivalente (TAE) es el rendimiento efectivo de un producto o servicio.

Teniendo en cuenta los costes de los bienes y los costes de la obra de ingeniería, el préstamo solicitado tiene un importe de 55.941,54 €.

Se ha considerado la devolución del préstamo en cuatro años a partir de cuotas mensuales constantes, así como una Tasa de Interés Nominal de 6.5% y una Tasa Anual Equivalente del 0%.

Esto supone una cuota mensual de 1.326,65 € durante 48 meses, lo que corresponde con un total de pérdidas en interés de 7.737,71 € y un coste total del préstamo de 63.679,25 €.

En consecuencia, el coste a abonar anualmente por el préstamo es 15.919,81 €.

Tabla 15. Financiación externa para el proyecto

Fuente: Elaboración propia

Valor de capital prestado (€)	55.942
TIN	6.5%
Número de años	4
Periodos de pago	48
Cuota mensual (€)	1326,65
Interés a pagar (€)	7.737,71
Total a devolver (€)	63.679,25

6.9 Plan de Contingencias

El desarrollo de un plan de contingencias tiene como objetivo considerar los eventos que pueden afectar significativamente al proyecto y debido a que muchos de ellos pueden ser de carácter imprevisible, se deben identificar las consecuencias en términos económicos y temporales, de manera que el impacto de éstos sobre el proyecto resulte el mínimo posible.

En consecuencia, y teniendo en cuenta la naturaleza del proyecto, se deben identificar los recursos imprescindibles, esto es, aquellos cuya alteración cause graves modificaciones en la ejecución del proyecto. Por ello, se han identificado dichos elementos y se han considerado los posibles riesgos a los que pueden verse sometidos, lo cual se encuentra recogido en la siguiente tabla:

Tabla 16. Elementos críticos y posibles fallos

Fuente: Elaboración propia

Elementos	Posibles fallos
XTS módulos y movers	Rotura o desgaste de rodillos de los movers, carencia de lubricante de carril, holgura en la conexión de los movers, rotura de los movers por colisión.
Controlador industrial	Sobrecalentamiento de la CPU, fallo eléctrico por sobretensión.
Terminales	Fallo en la lectura de entradas para EL1008, fallo en la transmisión de salidas para EL2008, fallo en alimentación a través de power contacts, fallo en indicadores luminosos de las tarjetas
Elementos de seguridad	Fallo de conexión con seta de emergencia

Una vez se han identificado los elementos clave para la correcta realización del proyecto y se han considerado los posibles riesgos, se procede a desarrollar un plan de contingencia de acuerdo a los diferentes escenarios.

Los planes de contingencia han sido diseñados a partir de diagramas de flujos, de manera que se exponga claramente el método de actuación ante las diversas situaciones.

El siguiente diagrama de flujo ha sido desarrollado para hacer frente a fallos en el sistema de transporte XTS.

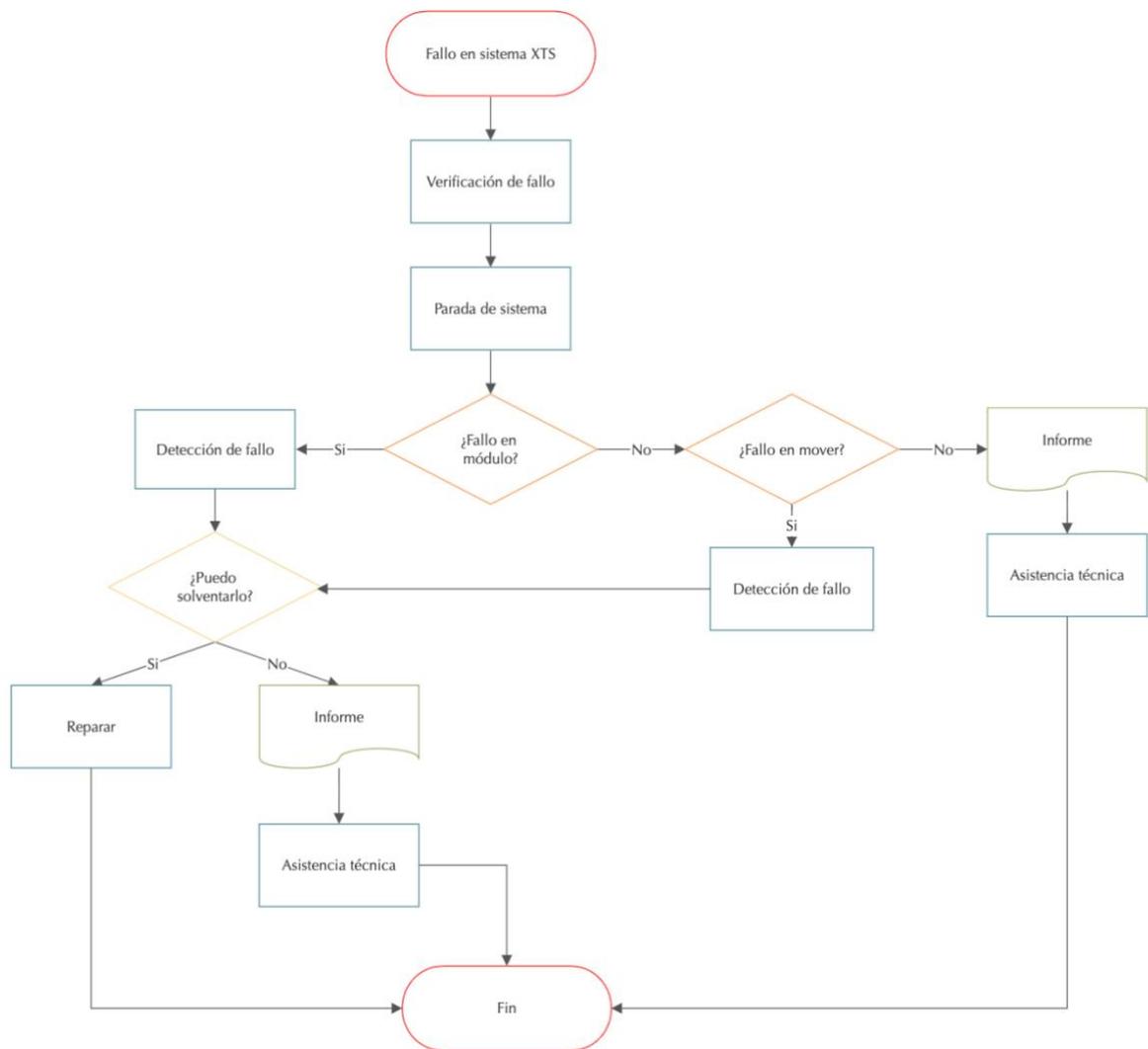


Figura 176. Plan de contingencias I

Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente, se ha creado un diagrama de flujo relativo a los posibles fallos o problemas que puede sufrir el controlador industrial.

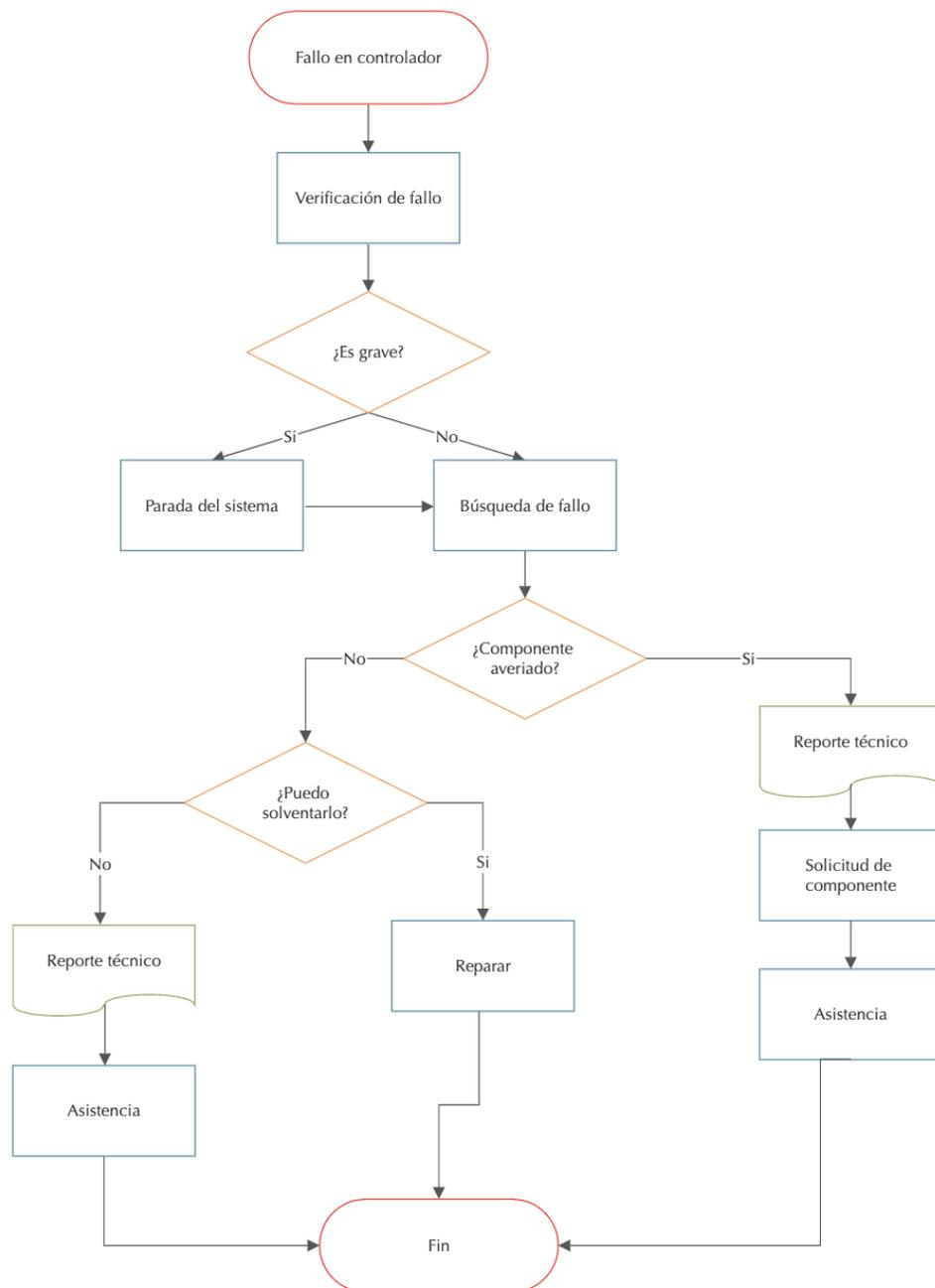


Figura 177. Plan de Contingencias II

Fuente: Elaboración Propia

De igual manera, se ha desarrollado un plan de contingencia para hacer frente a fallos en las tarjetas de comunicación, entradas y salidas etc.

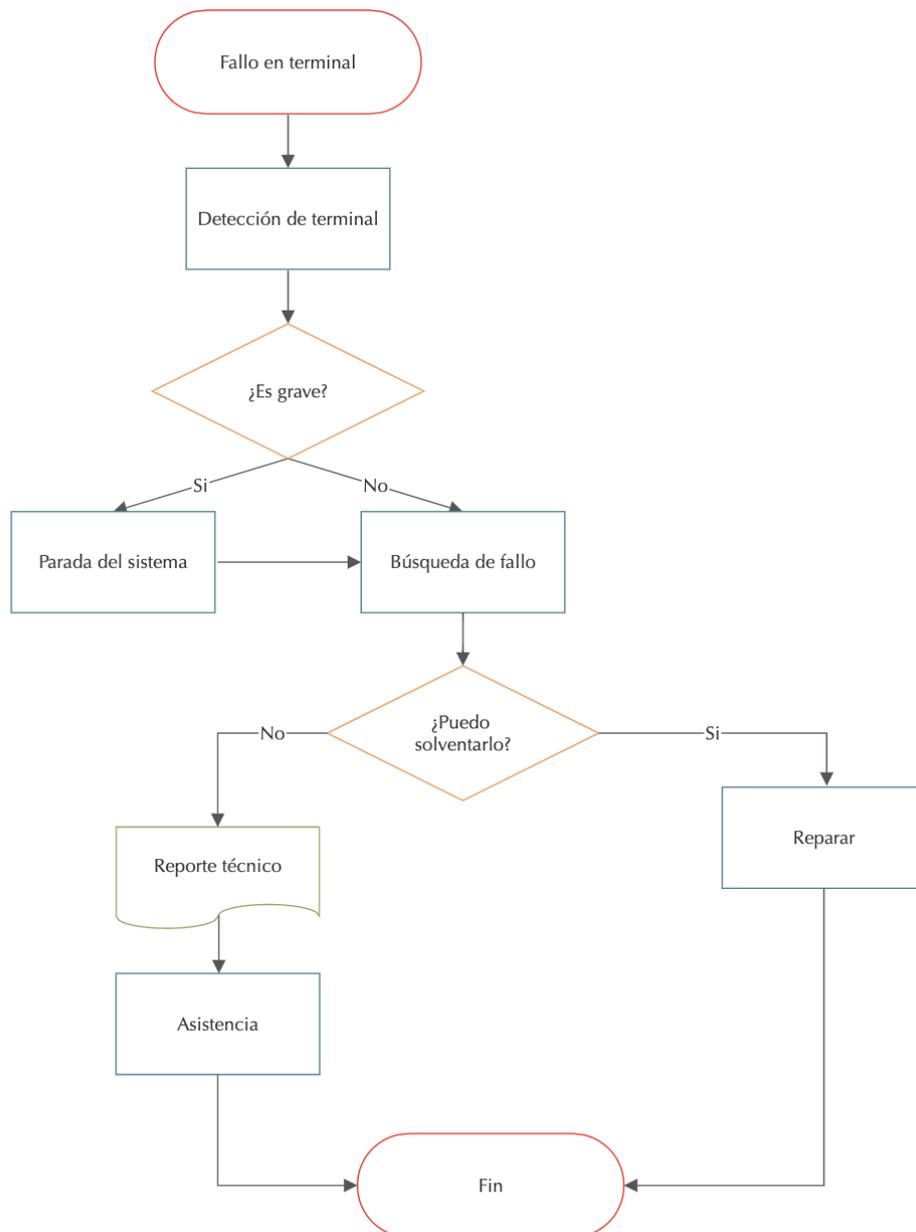


Figura 178. Plan de Contingencias III

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, se ha generado un plan de actuación sencillo para hacer frente a un posible fallo en los elementos de seguridad presentes en el sistema, especialmente la seta de emergencia.

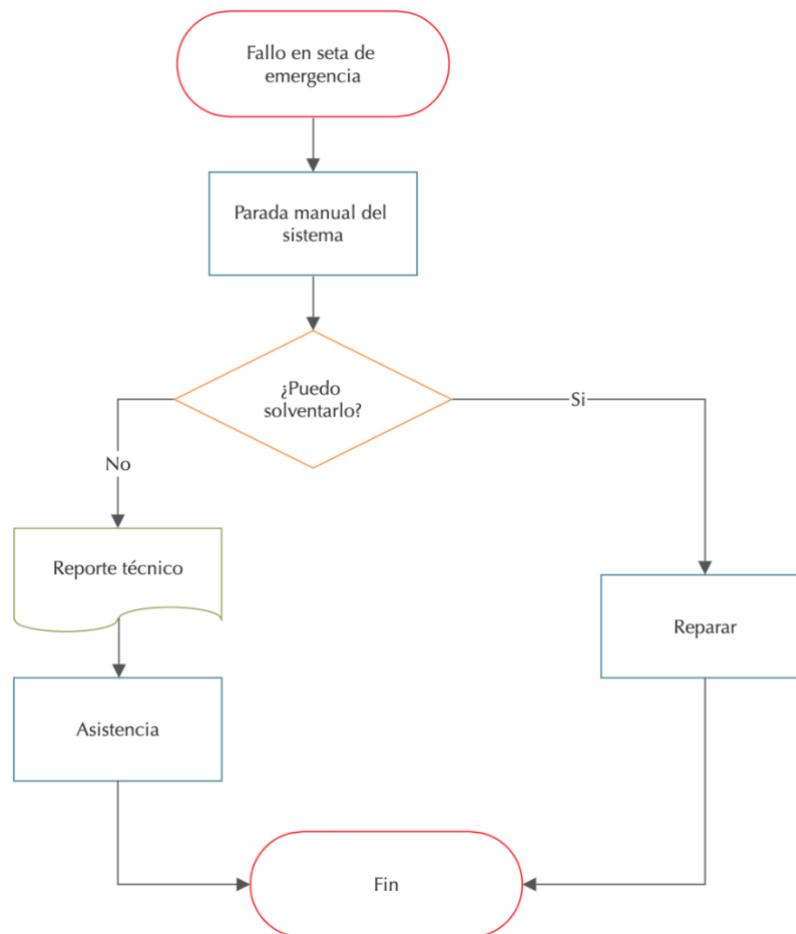


Figura 179. Plan de Contingencias IV

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar, existen eventos de riesgo que se pueden producir de manera recurrente, lo que implica que los equipos deben estar en constante supervisión. Se debe tener en cuenta que ciertas situaciones de fallo pueden ocurrir con mayor frecuencia, como es el caso de roturas o fallos en los movers. A pesar de que se ha creado un grupo de “Collision Avoidance” para evitar el impacto entre movers, éstos pueden colisionar y sufrir cierta holgura por desajuste de los rodillos, lo que resulta fácilmente detectable ya que afecta al deslizamiento de los mismos por el carril y produce un sonido inadecuado.

En este caso, se deberá evaluar la gravedad de los daños y si fuese necesario, ajustar la sujeción de los rodillos sobre el carril o como último recurso, reemplazar los movers o ciertos componentes de los mismos. También, puede producir daños en los productos que estén siendo transportados, lo que supone costes económicos considerables y una posible disminución de la productividad de la instalación.

En caso de fallo en los terminales, se deberá analizar en que terminal se produce el problema y tratar de buscar el origen del mismo. Esta clase de fallos son fácilmente detectables y rápidos de reparar.

Una de las principales ventajas es que, al tratarse de un sistema que se encuentra exento del contacto con personas, los riesgos que éste sufra no afectarán de manera directa a las personas que operen en la instalación.

Sin embargo, la instalación debe contar con los indicadores y elementos de seguridad pertinentes, lo que incluye indicadores luminosos de emergencia, paneles claramente visibles con información de seguridad (hospital más cercano y contacto de urgencia) y la presencia de un botiquín, entre otros.

Habiendo considerado los posibles fallos, se deben tener en cuenta los posibles retrasos en la ejecución del proyecto, siendo necesario diferenciar entre aquellos retardos causados por las empresas proveedoras de material, transporte, mano de obra o situaciones externas como días festivos y eventos especiales. En caso de un retardo en la entrega del material por parte de la empresa proveedora (en este caso, Beckhoff Automation), se negociará acerca de una posible reducción de los costes.

6.10 Previsión de ingresos

Para poder llevar a cabo un íntegro análisis de la viabilidad económica del proyecto, se debe realizar una estimación de los ingresos que genera la implantación del sistema de transporte propuesto.

A partir de los datos obtenidos en el cálculo del tamaño óptimo (capacidad de diseño, capacidad del sistema y capacidad real) y el precio de venta actual en el mercado se procede a realizar una estimación de los ingresos. Se debe tener en cuenta que los ingresos variarán según el tamaño óptimo, seleccionándose la capacidad real del sistema con el objetivo de que los ingresos correspondan con una situación real y a su vez, favorable.

Habiendo realizado un estudio de mercado, se ha determinado que el precio de venta de lentes oftálmicas en España se encuentra en un rango de 40 € y 70 €, variable según el nivel de graduación. Sin embargo, el precio de venta de intermediario se encuentra en un rango de 15 € y 30 €, por lo que se ha considerado un precio de venta unitario de 20 €.

Teniendo en cuenta que la capacidad real calculada previamente es de 54.601 lentes oftálmicas al año y que todas ellas se venden, los ingresos son de 1.092.020 €

Como se ha comentado al inicio del proyecto, existe una tendencia creciente en el número de personas que sufren problemas de visión, estimándose que en 2050 alrededor del 50% de la población mundial requiera soluciones encaminadas a una mejora de las capacidades de visión. Es por ello por lo que los ingresos estimados se consideran crecientes en el desarrollo de la cuenta de resultados, la cual es mostrada posteriormente.

6.11 Cuenta de resultados

A continuación, se muestra una tabla con la cuenta de resultados. Se han considerado todos los costes, tasas e impuestos comentados previamente y se ha calculado el beneficio neto en cada periodo, desde la inversión inicial en el año en curso (2023) hasta el final de la vida útil según establece Artículo 12 de la Ley 27/2014.

Tabla 17. Cuenta de resultados

Fuente: Elaboración propia

	2024	2025	2026	2027	2028
Ingresos (€)	327.606	382.207	436.808	491.409	546.010
Coste de obra de ingeniería (€)	6.870				
Costes de mano de obra (€)	63762	63762	63762	63762	63762
Costes de mantenimiento (€)	2237,66	2237,66	2237,66	2237,66	2237,66
EBITDA (€)	254.736	316.207	370.808	425.409	480.010
Amortización (€)	49.071,54	38.958,92	28.846,30	18.733,68	9.355,37
BAII (€)	205.665	277.248	341.962	406.676	470.655
Gastos financieros (€)	15919,81	15919,81	15919,81	15919,81	
BAI (€)	189.745	261.329	326.042	390.756	470.655
IBI (€)	7000	7000	7000	7000	7000
IAE (€)	369,5	369,5	369,5	369,5	369,5
IS (€)	65.521	76.441	87.362	98.282	109.202
Beneficio Neto (€)	117.224	177.518	231.311	285.105	354.083

2029	2030	2031	2032	2033	2034
600.611	655.212	709.813	764.414	873.616	982.818
63762	63762	63762	63762	63762	63762
2237,66	2237,66	2237,66	2237,66	2237,66	2237,66
534.611	589.212	643.813	698.414	807.616	916.818
534.611	589.212	643.813	698.414	807.616	916.818
534.611	589.212	643.813	698.414	807.616	916.818
7000	7000	7000	7000	7000	7000
369,5	369,5	369,5	369,5	369,5	369,5
120.122	131.042	141.963	152.883	174.723	196.564
407.120	450.800	494.481	538.162	625.524	712.885

Se observa un beneficio neto positivo todos los años, lo cual es muy favorable y visibiliza la rentabilidad del proyecto.

6.12 Análisis económico

Para proceder al cálculo del Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno y Período de Recuperación se deberán considerar los flujos de caja correspondientes a cada año además de la amortización pertinente.

Esto es observable en la siguiente tabla:

Tabla 18. Análisis económico y flujos de caja

Fuente: Elaboración propia

Año	Inversión inicial (€)	Beneficio Neto (€)	Amortización (€)	Flujo de caja neto (€)	Flujo de caja acumulado (€)
2024	-55941,55	117.224	10112,619	51.170	51.170
2025		177.518	10112,619	167.405	218.575
2026		231.311	10112,619	221.199	439.773
2027		285.105	9380,055	275.724	715.498
2028		354.083	9355,368	344.728	1.060.226
2029		407.120		407.120	1.467.346
2030		450.800		450.800	1.918.146
2031		494.481		494.481	2.412.627
2032		538.162		538.162	2.950.789
2033		625.524		625.524	3.576.313
2034		712.885		712.885	4.289.198

6.12.1 Valor Actual Neto

Para calcular el VAN es necesario conocer la tasa de descuento, cuyo valor se encuentra entre un 3% y un 7,5% variable según el proveedor. En consecuencia, se ha considerado un VAN del 5%.

El valor del VAN obtenido a partir de la tasa de descuento del 5%, los flujos de caja netos y la inversión inicial es de 2.939.244,58 € lo que implica que el proyecto es rentable y genera beneficios.

6.12.2 Tasa Interna de Retorno

A partir de los flujos de caja netos de cada uno de los años y el valor de la inversión inicial se procede a calcular la TIR, esto es, la tasa que anula el valor del VAN.

Se obtiene una tasa interna de retorno del 251%, lo que implica que el proyecto posee una elevada rentabilidad y se trata de una inversión recomendable y segura. Se debe tener en cuenta que el valor de la TIR es tan elevado debido a que los costes de inversión inicial e impuestos son considerablemente inferiores en comparación con los beneficios obtenidos por las lentes.

Otro de los principales motivos de este valor para la Tasa Interna de Retorno es que el coste de compra de la nave industrial no ha sido considerado debido a que ya se encuentra abonado en su totalidad desde el inicio del proyecto. Para incrementar la precisión del cálculo se podría considerar el coste del resto de equipos implicados en el proceso productivo como la máquina de secado o de visión artificial para el control de calidad.

6.12.3 Período de Recuperación

El concepto Payback (periodo de recuperación) hace referencia al tiempo necesario para recuperar la inversión inicial del proyecto.

Observando la tabla relativa al análisis económico, se observa que el flujo de caja acumulado resulta positivo desde el inicio del proyecto, lo cual resulta muy positivo.

Capítulo 7. PLANIFICACIÓN TEMPORAL

7.1 Actividades

Para poder llevar a cabo la realización del proyecto de manera íntegra, es necesario definir todas aquellas actividades involucradas en el proceso de desarrollo de éste, tanto de investigación como de puesta en marcha y realización de pruebas.

El listado de las actividades implicadas en el proyecto, así como la dependencia entre las mismas se define a continuación:

1. Planteamiento inicial
 - 1.1 Establecimiento de objetivos.

- 1.2 Decisión de tutor de proyecto.
2. Lluvia de ideas (Brainstorming)
 - 2.1 Búsqueda de problemática actual en la industria.
 - 2.2 Planteamiento de temática sobre la que se basa el proyecto.
 - 2.3 Determinación de software de desarrollo.
 - 2.4 Propuestas adicionales como interfaz hombre – máquina y aplicación de seguridad.
3. Investigación genérica
 - 3.1 Conceptos básicos de automatización.
 - 3.2 Industria 4.0.
 - 3.3 Modelo OSI.
 - 3.4 Tipologías de red.
 - 3.5 Protocolos de comunicación.
 - 3.6 Información técnica sobre software de desarrollo TwinCAT.
 - 3.7 Sistemas de monitorización y control.
4. Redacción inicial
 - 4.1 Redacción de problemática.
 - 4.2 Redacción de objetivos del proyecto.
5. Formación de software en diversos aspectos
 - 5.1 TwinCAT PLC.
 - 5.2 TwinCAT Motion.
 - 5.3 TwinCAT HMI.
 - 5.4 eXtended Transport System (XTS).
6. Desarrollo y entrega de anteproyecto
 - 5.1 Definición de problemática actual.
 - 5.2 Definición de objetivos del proyecto.
 - 5.3 Desarrollo de Diagrama de Gantt.
7. Definición de propuesta de valor

Se debe tener en cuenta que, para poder llevar a cabo una correcta definición de la propuesta de valor, se debe haber identificado previamente un problema para el cual el proyecto resulte una óptima solución. Esto muestra su dependencia con la actividad 2, relativa a la lluvia de ideas.

8. Documentación específica XTS.
9. Desarrollo de programa de control del XTS.

Para poder llevar a cabo el desarrollo de programa que controle el funcionamiento del XTS es necesario haber comprendido en profundidad el funcionamiento y las características técnicas del mismo. Esto ha sido posible gracias a la asistencia a los diversos cursos formativos, por lo que esta actividad muestra dependencia con la tarea 5 (Formación de software en diversos aspectos) y la tarea 3 (Investigación Genérica).

Se debe tener en cuenta que la realización de pruebas en el simulador del XTS (XTS Viewer) no exige que el programa de control sea desarrollado al completo, posibilitando la realización de pruebas intermedias y la determinación de la respuesta del sistema ante diversos cambios en el software de control.

10. Diseño mecánico en SolidWorks.
11. Realización de pruebas en laboratorio Universidad Europea.

De igual manera que la tarea previa, la realización de pruebas en el laboratorio puede realizarse simultáneamente al desarrollo del programa de control, permitiendo verificar el correcto funcionamiento del sistema por secciones.

12. Investigación sobre normativa en marco ambiental, social y económico.

Muestra un grado elevado de dependencia de la tarea 3 (Investigación genérica) y la tarea 8 (Documentación específica), ya que para poder realizar una exhaustiva investigación acerca de la normativa vigente, se deben tener previamente identificadas las características técnicas de los equipos.

13. Estudio del impacto ambiental, social y económico.

Presenta dependencia de la tarea 8, relativa a las características técnicas de los equipos.

14. Desarrollo de Pliego de Condiciones.
15. Determinación de Viabilidad Económica.
16. Análisis de Riesgos.
17. Implementación de mejoras.

- 18. Resultados y conclusiones.
- 19. Corrección final.
- 20. Inclusión de anexos y librerías.
- 21. Desarrollo de vídeo ilustrativo.

Para poder desarrollar un vídeo ilustrativo que muestre el funcionamiento del sistema, es necesario haber completado con éxito todas las tareas nombradas previamente.

- 22. Desarrollo de presentación en Microsoft Power Point.

	NOMBRE DE LA TAREA	FECHA DE INICIO	FECHA FINAL	DURACIÓN en días	ESTADO	COMENTARIO
1	Planteamiento inicial	2022-10-01	2022-10-07	6	Integro	
1.1	Establecimiento de objetivos	2022-10-01	2022-10-04	3	Integro	
1.2	Contacto con tutor del proyecto	2022-10-04	2022-10-07	3	Integro	Ramiro Díez Zaera
2	Brainstorming	2022-10-10	2022-11-11	32	Integro	
2.1	Búsqueda de problema actual	2022-10-10	2022-10-20	10	Integro	
2.2	Planteamiento temático y ámbito	2022-10-20	2022-11-01	12	Integro	
2.3	Determinación de software	2022-11-01	2022-11-05	4	Integro	
2.4	Propuesta de implementación de HMI	2022-11-05	2022-11-10	5	Integro	
2.5	Propuesta a tutor del proyecto	2022-11-10	2022-11-11	1	Integro	
3	Investigación	2022-11-11	2022-12-07	26	Integro	
3.1	Conceptos básicos de automatización	2022-11-11	2022-11-17	6	Integro	
3.2	Software de desarrollo	2022-11-17	2022-11-22	5	Integro	
3.3	Protocolos de comunicación	2022-11-22	2022-12-05	13	Integro	
3.4	Industria 4.0	2022-12-05	2022-12-07	2	Integro	
4	Redacción inicial	2022-12-10	2022-12-16	6	Integro	
4.1	Redacción de problemática	2022-12-10	2022-12-15	5	Integro	
4.2	Redacción de objetivos del proyecto	2022-12-15	2022-12-16	1	Integro	
5	Formación de software	2023-01-31	2023-02-23	23	Integro	
5.1	Curso TwinCAT PLC	2023-01-31	2023-02-03	3	Integro	Beckhoff Madrid
5.2	Curso TwinCAT HMI	2023-02-07	2023-02-09	2	Integro	Beckhoff Madrid
5.3	Curso TwinCAT Motion	2023-02-14	2023-02-16	2	Integro	Beckhoff Madrid
5.4	Curso extended Transport System	2023-02-21	2023-02-23	2	Integro	Beckhoff Barcelona
6	Planificación temporal	2022-12-26	2023-01-05	10	Integro	
6.1	Anteproyecto	2022-12-26	2023-01-01	6	Integro	
6.2	Desarrollo de EDP	2023-01-01	2023-01-04	3	Integro	
6.3	Desarrollo de Metodología	2023-01-04	2023-01-06	2	Integro	
7	Definición de propuesta de valor	2023-01-06	2023-01-12	6	Integro	
8	Documentación técnica XTS	2023-01-12	2023-01-31	19	Integro	
9	Programación	2023-02-25	2023-04-30	64	Integro	
9.1	Desarrollo de sección PLC	2023-02-25	2023-04-18	52	Integro	
9.2	Desarrollo de sección Motion	2023-02-25	2023-03-05	8	Integro	
9.3	Desarrollo TwinCAT HMI	2023-04-18	2023-04-30	12	Integro	
9.4	Simulación	2023-02-25	2023-04-30	64	Integro	
10	Diseño mecánico en Solidworks	2023-04-12	2023-04-16	4	Integro	
11	Montaje y Pruebas en Laboratorio	2023-04-21	2023-05-15	24	Integro	Laboratorio 4D Universidad Europea de Madrid
12	Investigación	2023-04-22	2023-05-16	24	Integro	
12.1	Normativa y Marco legal	2023-04-22	2023-04-27	5	Integro	
12.2	Impacto social, económico y ambiental	2023-04-27	2023-05-01	4	Integro	
12.3	Pilego de Condiciones	2023-05-01	2023-05-06	5	Integro	
12.4	Viabledad Económica	2023-05-06	2023-05-11	5	Integro	
12.5	Análisis de riesgos	2023-05-12	2023-05-16	4	Integro	
13	Implementación de mejoras	2023-05-17	2023-05-19	2	Integro	
14	Inclusión de anexos y librerías	2023-05-19	2023-05-20	1	Integro	
15	Resultados y Conclusiones	2023-05-20	2023-05-22	2	Integro	
16	Desarrollo de vídeo	2023-05-22	2023-05-24	2	Integro	
17	Desarrollo de presentación	2023-05-24	2023-05-28	4	Integro	
18	Corrección final	2023-05-28	2023-06-03	6	Integro	

Figura 180. Cronograma y descomposición de actividades

Fuente: Elaboración Propia

7.2 Estructura de Descomposición del Proyecto (EDP)

Una vez determinadas todas aquellas actividades necesarias para la realización del proyecto, éstas han sido incluidas en un gráfico EDP con el objetivo de determinar la dependencia entre ellas, de manera que se eviten los denominados “cuellos de botella” como consecuencia de la relación entre tareas y se alcance una mayor productividad.

Se ha desarrollado un Diagrama de Gantt, el cual incluye una estimación de la duración de cada una de las tareas de manera que el proyecto se realice de manera estructurada y a lo largo de un plazo temporal fijo.

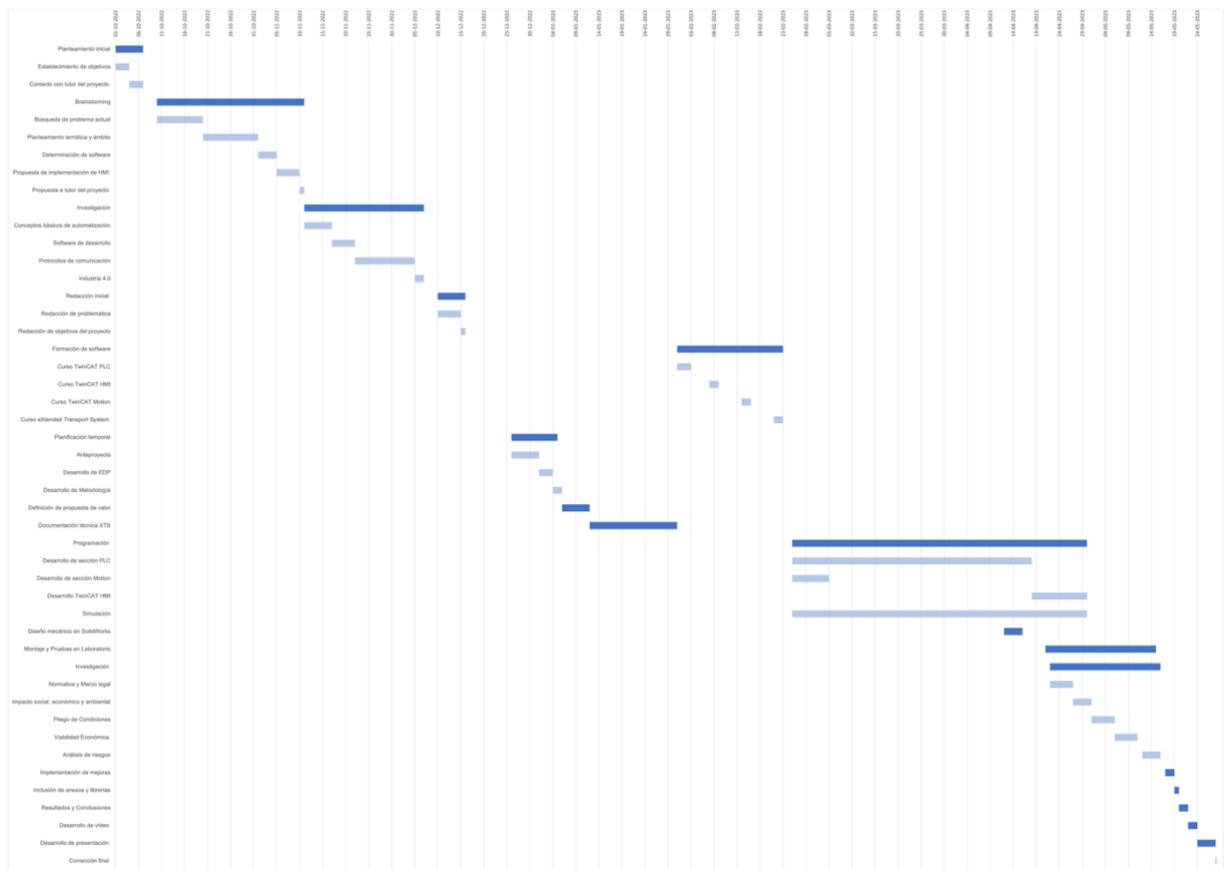


Figura 181. Diagrama de Gantt

Fuente: Elaboración Propia

Capítulo 8. PLIEGO DE CONDICIONES

8.1 Definición y alcance

El presente pliego de condiciones se ha elaborado para el proyecto de *Programación de célula de transporte industrial con XTS*. Su finalidad reside en fijar los criterios que rigen las relaciones entre las partes implicadas en el proyecto y servir de base para la realización de contratos entre el contratista y el promotor.

8.2 Documentos que definen el estudio

Los documentos que definen el estudio realizado para el diseño y programación de una célula de transporte industrial que implemente un XTS son los siguientes:

- Memoria descriptiva.
- Esquema eléctrico.
- Mediciones.
- Presupuesto (unitario como el cómputo de todos los costes).
- Anexos.

8.3 Compatibilidad y relación entre documentos

Todos los documentos integrados en este estudio presentan compatibilidad y complementariedad, constituyendo un cuerpo inseparable que rige la ejecución del proyecto. Es de gran importancia tener en cuenta que las condiciones establecidas en este estudio serán aplicables desde el inicio del proyecto hasta su finalización.

8.4 Condiciones generales facultativas

Con el objetivo de que un proyecto sea llevado a cabo con éxito, es de relevada importancia que todos los miembros implicados cumplan con sus respectivas responsabilidades, las cuales son expuestas a continuación para cada una de las personas implicadas.

8.4.1 Responsabilidades y derechos del Promotor

Un promotor de un proyecto hace referencia a cualquier persona de carácter privado o público, físico o jurídico, que de manera individual o colectiva se encarga de impulsar, programar y financiar (a través de recursos propios o ajenos) un proyecto.

El promotor deberá contar con la opinión del contratista en dos situaciones clave: en caso de que el promotor realice la totalidad o parte del proyecto con recursos medios o materiales o bien, en caso de que se lleve a cabo la contratación de trabajadores autónomos para una parte o el proyecto en su totalidad, según establece el Real Decreto.

Sus responsabilidades son las siguientes:

- Promoción de idea proyectada.
- Decisión de técnicos y directores del proyecto basándose en criterios como la competencia profesional de los mismos.
- Velar por la integración de la prevención de riesgos laborales en la planificación del trabajo.
- Facilitar la información y documentación previa necesaria para la redacción del proyecto.
- Gestión, petición y obtención de las licencias y autorizaciones facultativas que permiten que la ejecución del proyecto se lleve a cabo dentro de la normativa vigente.

- Exigencia de solvencia a las empresas subcontratadas por el contratista durante todo el plazo de ejecución del proyecto.

El promotor deberá contar con un equipo de asesoramiento técnico con el objetivo de garantizar la eficacia de sus decisiones y verificar una completa acreditación documental.

8.4.2 Responsabilidades y derechos del Contratista

El contratista es la persona jurídica o física encargada de llevar a cabo la ejecución del proyecto con medios materiales y humanos suficientes, propios o ajenos, dentro del plazo acordado y cumpliendo con las especificaciones establecidas en el contrato con el promotor, aquellas acordadas por la Dirección del proyecto y siempre dentro del marco legal vigente.

Algunas de sus responsabilidades se recogen a continuación

- Conocimiento íntegro del proyecto, así como la legislación vigente.
- Garantizar el cumplimiento de los plazos de entrega y el nivel de calidad acordados.
- Asignación de medios materiales y humanos necesarios para la realización del proyecto durante todo el plazo de ejecución del mismo.
- Facilitar al director los datos necesarios para la elaboración de la documentación del proyecto.
- Redacción del Plan de Seguridad y Salud.
- Contratación de servicios externos como trabajadores o un equipo de asesoría técnica en caso de que sus capacidades resulten necesarias.
- Designación de un representante físico, así como definición de la estructura organizativa más conveniente según las características del proyecto.

8.4.3 Responsabilidades y derechos del Projectista

El projectista es la persona que redacta y elabora las especificaciones del proyecto por encargo del promotor y cumpliendo con el marco técnico, ambiental y social vigente.

Es el agente encargado de definir y redactar un documento que incluya, entre otros aspectos:

- Equipos, herramientas y maquinaria especializada para el tipo y objeto de proyecto.
- Designación de métodos de ejecución de acuerdo a los precios que aseguren un correcto desarrollo del trabajo.
- Todos aquellos documentos de utilidad, coherencia y legalidad que afecten al proyecto.
- Posibilidad de asumir la titularidad del proyecto en caso de que el proyecto se complete a través de proyectos parciales.

8.4.4 Responsabilidades y derechos del Director

Es la persona física encargada de la dirección de la ejecución del proyecto, así como el control de manera cuantitativa y cualitativa. Esto es, su responsabilidad reside en el control del desarrollo del proyecto a nivel estético, técnico y medioambiental de acuerdo con las licencias obtenidas y las condiciones establecidas en el contrato.

Se debe tener en cuenta que dicho control no se centra únicamente en la ejecución del proyecto sino también en criterios legales y de calidad previamente establecidos.

Algunas de sus responsabilidades son, entre otras:

- Verificación de ejecución del proyecto dentro del marco técnico, ambiental y social vigente.
- Aprobación y definición de posibles modificaciones en el proyecto.
- Elaboración de documentación a entregar al promotor.

8.4.5 Responsabilidades y derechos del Proveedor

El proveedor es toda aquella persona que suministra los bienes materiales y servicios necesarios para llevar a cabo la ejecución del proyecto, lo que incluye materias primas, productos semielaborados, productos terminados, fabricantes y vendedores, entre otros.

Deben cumplir con los plazos de ejecución y entrega establecidos en el contrato, así como, en caso de posibles contingencias, notificar con suficiente antelación al director de proyecto, de manera que exista una constante comunicación entre todas las partes implicadas y se garantice una correcta ejecución del trabajo.

8.5 Plazos de ejecución y entrega

Esta sección incluye un análisis de las actividades del proyecto que puedan verse afectadas temporalmente por adelantos o atrasos en su ejecución, alterando los plazos de ejecución del resto de tareas.

Cabe destacar que, todas estas actividades ya han sido asignadas un plazo de ejecución temporal en el cronograma mostrado previamente, habiéndose considerado aspectos como dependencias entre actividades y días festivos, donde no se ejerce la actividad laboral.

Se debe tener en cuenta que, las modificaciones en los plazos afectarán a nivel penal a las empresas implicadas de manera que; si las actividades son realizadas por empresas externas, se someterán a penalizaciones económicas. De manera contraria, si las actividades son internas de la empresa o se encuentran en estado pendiente de aceptación por parte de órganos gubernamentales, no se verán sometidas a penalizaciones.

Las actividades más susceptibles en cuanto a modificación de plazos son las siguientes:

1. Desarrollo de normativa y marco legal: posibilidad de realizarlo de manera interna o por subcontratación a terceros. Admite un retraso máximo de tres días posteriormente a la fecha de entrega.
2. Estudio de mercado: posibilidad de realizarlo interna o externamente a la empresa. Admite un retraso máximo de tres días con respecto a la fecha límite.
3. Tamaño óptimo: admite un retraso máximo de tres días.
4. Estudio técnico: debe ser llevado a cabo por personal especializado relativo a la propia empresa o a través de subcontratación a terceros. Admite un retraso máximo de tres días y su duración es variable según la complejidad del proyecto. En este caso, se ha estimado un total de 96 horas.
5. Cálculos y estimaciones: ejecución acorde a los plazos internos de la empresa. Admite un retraso máximo de tres días.
6. Procesos de selección de personal: puede llevarse a cabo de manera interna por parte del departamento de recursos humanos o de manera externa, en cuyo caso, deberá subcontratarse una empresa de gestión de personal. Debido a que se requieren diversas capacidades del personal, este proceso se repite en diversas actividades, admitiendo un retraso máximo de diez días.
7. Presentación del proyecto: retraso máximo de tres días.
8. Firma de contratos y acuerdos necesarios para la legalización de proyecto: debido a que se trata de un trámite relativo a órganos gubernamentales, se admite un retraso máximo de una semana.
9. Obtención de licencias: debido a que corresponden a organizaciones gubernamentales, se admite un retraso de una semana.
10. Solicitud y petición de equipos y maquinarias: en este caso, se realiza a través de las compañías Beckhoff Automation y Siemens (para los dispositivos de seguridad). Se admite un retraso de una semana desde la fecha estimada de entrega.
11. Instalación de equipos: responsabilidad del departamento técnico designado al proyecto. Debido a las posibles complicaciones a surgir, se admite un retraso máximo de una semana.
12. Pruebas y puesta en marcha: retraso máximo de una semana con respecto a la fecha estimada de entrega.

13. Control de calidad: puede llevarse a cabo de manera interna o de manera externa por terceros, admite un retraso máximo de una semana.

Cabe destacar que la duración estimada del proyecto es de ocho meses, concretamente la fecha de inicio y fin del proyecto es 01/10/2022 y 03/06/2023 respectivamente.

8.6 Condiciones de ejecución

La ejecución del proyecto se llevará a cabo de acuerdo con las especificaciones y criterios solicitados por el promotor y redactados, posteriormente, por el proyectista y siempre dentro del marco legal vigente.

8.6.1 Limitaciones de suministro y montaje

Para garantizar la ejecución del proyecto dentro de un plazo temporal en el que las posibles modificaciones no afecten significativamente al cronograma o los costes del proyecto, es necesario determinar las limitaciones en cuanto al suministro y montaje de los equipos.

Los criterios en la recepción de los suministros son los siguientes:

- En caso de deficiencia o ausencia de suministros por un retraso en los plazos de entrega, la responsabilidad caerá sobre el contratista, penalizado económicamente y estando obligado a abonar la cantidad monetaria fija establecida en el contrato.
- El plazo máximo para la recepción de los suministros, una vez solicitados, es de una semana, siendo posible evaluar el motivo por el que se produce dicho retraso.

Esto debe complementarse con el plan de contingencias incluido en el capítulo 6 (apartado 6.9) del documento global del proyecto, en el cual se establece el método de actuación ante las diversas situaciones críticas.

De todas formas, el método de actuación consiste en lo siguiente:

- En caso de accidente laboral, el accidentado debe ser atendido de inmediato para evitar un agravamiento de las condiciones.

En caso de que el accidente sea causado por motivos eléctricos, se extremarán las precauciones de atención primaria, posicionándose al accidentado en una posición de inmovilización hasta la llegada de la ambulancia, la cual realizará el traslado al hospital más cercano.

En caso de que el accidente resulte de mayor gravedad, se inmovilizará al accidentado y se podrá recurrir a métodos de transporte alternativos como helicópteros.

- Es responsabilidad del contratista informar a la infraestructura sanitaria más cercana sobre la situación de emergencia para garantizar que el accidentado sea atendido de manera adecuada.
- Es responsabilidad del contratista el posicionamiento en la planta de información relativa al centro hospitalario más cercano, contacto de emergencia y un manual de primeros auxilios. Además, debe verificar la disposición de botiquines de primeros auxilios con el objetivo de garantizar la seguridad laboral y el método de actuación en caso de incidente.
- Las instalaciones deben contar con sistemas de prevención de incendios, incluyendo extintores según la extensión de la planta.
- En caso de mal funcionamiento de algún equipo de la instalación, se comunicará al departamento técnico, los cuales deberán llevar a cabo un análisis de los equipos y detección de fallos.

Se debe tener en cuenta que, si se trata de un fallo de fábrica, será comunicado a los proveedores y éstos asumirán los costes estipulados en el contrato.

8.6.2 Garantías de suministro y funcionamiento

Las garantías tienen el objetivo de proteger a los clientes frente a defectos de fábrica de los productos adquiridos, lo que exime de responsabilidad a los mismos, cayendo ésta sobre los proveedores.

Las garantías en el proyecto constituirán un porcentaje total de las certificaciones que debe ser abonado por el contratista en la firma del contrato. Dicho porcentaje debe ser superior o igual al 5% y otorgará cobertura frente a las siguientes situaciones:

- Penalizaciones por fallo o retrasos en las entregas.
- Reparaciones durante la ejecución o una vez finalizado el proyecto.

Es importante considerar los siguientes criterios relativos a la cantidad monetaria acordada entre clientes y proveedores:

- Posibilidad de abonar la cantidad monetaria mediante un aval bancario que asegure la retención del importe en cuestión o de manera metálica.
- Una vez firmado el Acta de Recepción Definitiva, la fianza relativa a la garantía será devuelta al contratista en el plazo estipulado en el contrato.
- En caso de que el contratista no cumpla con sus obligaciones y responsabilidades, el director del proyecto tendrá la responsabilidad de nombrar a otra persona que cumpla con dichas tareas.

8.6.3 Criterios de modificación del proyecto

La solicitud y posterior aprobación de modificaciones durante la ejecución del proyecto se podrá realizar siempre y cuando éstas se encuentren alineadas con el objeto del

proyecto y no supongan alternaciones significativas a nivel económico, técnico, legal y ambiental.

Los criterios de modificación del proyecto a cumplir son los siguientes:

- Los cambios solicitados deberán cumplir con la normativa vigente y resultar coherentes con el objeto y las características del proyecto.
- Las modificaciones que sean solicitadas una vez transcurrido el 66,6% del proyecto no serán aceptadas.
- Siempre que se presente un cambio, es necesario adjuntar una definición y motivación de dicho cambio. Ésta será entregada al director del proyecto, que tomará la decisión de dar inicio al proceso de validación y aprobación. Una vez tomada la decisión, esta será sometida al Comité de Dirección, que aprobará o denegará el cambio.
- Si el cambio supone alteraciones a nivel técnico, éste debe ser presentado al departamento técnico, el cual comprobará la validez de la propuesta. Si el equipo técnico no entrega la aprobación, el cambio no será implementado de ninguna manera.
- Es necesario entregar una evaluación de las alteraciones que supone la integración del cambio en el proyecto a nivel económico, material y temporal.
- En caso de aprobación del cambio por el Comité de Dirección, se deberá desarrollar una nueva línea de actuación y presentar la documentación necesaria ante las entidades públicas.
- Una vez implementado el cambio, el proyecto será sometido a un control de calidad con el objetivo de verificar que el cambio ha sido integrado con éxito y determinar su repercusión en el mismo.

Capítulo 9. Pruebas y Simulación

La primera toma de contacto con los equipos implicados en el proyecto tuvo el objetivo de determinar los siguientes aspectos: modelo y utilidad de los mismos en el proyecto.

Para ello, fue necesario acudir al laboratorio de Industria 4.0 de la Universidad Europea de Madrid, donde en presencia del técnico del laboratorio, se recogió la información sobre los equipos y su utilidad en el proyecto. Además, se corroboró la instalación eléctrica acorde al esquema eléctrico, lo que posibilitó el entendimiento de las conexiones entre los equipos. El esquema eléctrico nombrado se encuentra incluido en los documentos adicionales de la entrega de documentación.

Más adelante, se acudió al laboratorio para realizar un escaneo de los dispositivos en TwinCAT, de manera que éstos pudiesen ser utilizados en el proyecto a partir de la vinculación con las variables del proyecto de PLC, el proyecto de Motion y el HMI.

Posteriormente, se llevó a cabo el desarrollo del programa de control del XTS, lo cual fue posible a partir del software TwinCAT 3 y la realización constante de pruebas en el simulador del XTS (XTS Viewer). Esto permitió verificar el funcionamiento del sistema paso a paso, de manera que se fueron corrigieron los errores ocurridos en las diferentes secuencias de movimiento.

El proceso de inicialización del Environment del XTS resultó sencillo, así como la habilitación de los movers, la habilitación del grupo de colisión avoidance y la inclusión de los movers en el grupo CA. Todos estos aspectos fueron verificados a partir de la observación del estado de los ejes en la pestaña Online en el proyecto de Motion.

Los principales problemas surgieron en cuanto al acoplamiento y desacoplamiento de los movers en la primera y tercera estación, los cuales fueron resueltos a partir de la definición de numerosas condiciones del tipo "if" en las secuencias comentadas previamente (Sec, Sec1, Sec2, Sec3 y Sec4).

Una vez desarrollado el programa de control del XTS a partir de la realización de pruebas en el simulador, se procedió a probar físicamente su funcionamiento en el laboratorio.

En primer lugar, fue necesario actualizar las versiones de TwinCAT, del servidor TF2000 del HMI y del TF5850 (relativo a la extensión del XTS), lo cual se realizó a partir de la conexión remota con el equipo, la posterior descarga de dichas versiones desde la página oficial de Beckhoff Automation y su instalación. También, fue necesario llevar a cabo un reinicio del equipo para que el sistema actualizase las versiones y funcionase correctamente.

En segundo lugar, fue necesario conectarse con el C6930 a partir de un cable Ethernet y cargar el proyecto de PLC, pudiendo observar así el funcionamiento real del sistema, el cual funcionaba adecuadamente gracias a las pruebas en el simulador realizadas anteriormente.

En tercer lugar, se llevó a cabo la vinculación de las variables del programa de control con los movers y los pulsadores del panel HMI, de manera que la activación de éstos provocase el inicio, detención o reinicio del sistema, respectivamente.

Finalmente, se procedió a cargar el proyecto del HMI en el servidor y probar su funcionamiento, lo que implica la verificación de que los pulsadores funcionen correctamente, la alternancia entre pantallas se encuentra operativa y sea posible la visualización del XTS Viewer, la documentación y los gráficos de información de los ejes.

Adicionalmente, se grabó un vídeo que mostrase el funcionamiento del sistema de manera que éste sirviese como prueba de funcionamiento en la presentación oral del trabajo.

Capítulo 10. Resultados y Conclusiones

10.1 Conclusiones

Considerando la tendencia creciente de personas que sufren problemas de visión a nivel mundial, la automatización industrial y la denominada industria inteligente constituyen una solución alcanzable y al mismo tiempo fiable, sobre todo considerando el incremento que esto supone en la tasa de productividad de las plantas industriales, el bienestar de las personas y la contribución con el medio ambiente.

Según el informe anual publicado por la Federación Internacional de Robótica (también conocido por las siglas IFR) en 2022, España ocupa la posición 14 en el ranking de países más automatizados del mundo. Sin embargo y a pesar de los intentos promovidos por las organizaciones gubernamentales, la tendencia creciente no es muy elevada, presentando un incremento del 1% entre los años 2021 y 2022. Es por ello por lo que la implementación de un sistema de transporte completamente automatizado como el XTS supone una óptima contribución al fomento de la automatización de los procesos industriales y el avance tecnológico.

La elección de este sistema de transporte se encuentra motivada por su elevada flexibilidad como consecuencia de su configuración modular y la posibilidad de definir los perfiles de movimiento de cada uno de los movers individualmente, a diferencia de las cintas transportadoras convencionales. Se debe considerar que sistemas tan novedosos como éste supondrán un incremento de la rentabilidad del sector en el que se implante, contribuyendo tanto al incremento del PIB nacional como a la preservación del medio ambiente debido al bajo consumo energético.

Se debe tener en cuenta que, para lograr que el sistema XTS se encuentre operativo y funcione correctamente es necesaria la presencia de personal especializado y

altamente cualificado ya que el proceso de programación resulta complejo y debe comprenderse en profundidad la integración de todos los componentes implicados en el sistema, constituyendo así un sistema de control preciso y novedoso.

Los resultados obtenidos están ligados con una serie de estimaciones que se han realizado con el fin de llevar a cabo, en la medida de lo posible, un proyecto que se asemeje a la realidad. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que puede existir cierto margen de error, por lo que a continuación se describen las limitaciones que sujetan la realización del proyecto y que pueden afectar sobre los resultados de negocio.

10.2 Limitaciones

El factor más limitante se presenta en el estudio económico, ya que las estimaciones relativas a los costes del proyecto y previsión de ingresos no contemplan todos los equipos y maquinarias implicados en todo el proceso productivo de lentes oftálmicas. La decisión de no incluir dichos costes en el proyecto se encuentra motivada por la gran extensión del mismo y la falta de información precisa, especialmente las máquinas de secado, corte, pulido y aplicación de tratamientos superficiales.

También se debe tener en cuenta el posible error en cuanto a la planificación temporal de ejecución del proyecto como consecuencia de factores externos como climatología, festividades etc. Esto puede ocasionar un desajuste en los plazos de entrega del material solicitado, afectando considerablemente a los resultados de negocio calculados previamente. Además, estos pueden verse afectados por variaciones en los impuestos, así como problemas durante el funcionamiento del sistema, lo que incrementará los costes de mantenimiento.

Finalmente, la adaptación de las industrias hacia las nuevas tecnologías supone un cambio de mentalidad de las personas y del modelo de negocio, por lo que se trata de

un proceso lento como consecuencia de la transformación hacia un proceso productivo basado en la integración del mundo físico y el mundo digital.

10.3 Líneas Futuras

El proyecto ha sido realizado teniendo en cuenta la disponibilidad tecnológica, la normativa vigente a nivel social y medioambiental y la adaptabilidad del sistema de transporte a múltiples industrias. A lo largo de los últimos años, la transformación hacia el mundo digital ha ganado peso significativamente, suponiendo una de las principales ventajas competitivas de las empresas.

Por este motivo, las líneas futuras de este proyecto se encuentran enfocadas en alcanzar un mayor grado de automatización industrial. Se ha considerado la posibilidad de implementar robots antropomórficos de manera que éstos sean los encargados de depositar y retirar las lentes oftálmicas de los soportes de los movers en el momento adecuado.

Se debe tener en cuenta que para que esto sea posible, se debe iniciar un proceso de comunicación entre el sistema de control y los brazos robóticos, lo cual puede realizarse a través de protocolos como MODBUS TCP. Esto conllevaría un mayor aprovechamiento de los recursos tecnológicos disponibles, una mayor tasa de producción y un incremento de la rentabilidad, lo que afectaría positivamente a los resultados de negocio.

Finalmente, se debe considerar la posibilidad de implementar un sistema XTS a lo largo de todo el proceso productivo, de manera que abarque cada una de las etapas de fabricación de lentes oftálmicas. Esto es posible gracias a su diseño modular, lo que permite que se adapte a los requerimientos de la instalación y del cliente.

Capítulo 11. Anexos

11.1 Fichas técnicas de equipos

Manual XTS

[Operating Instructions XTS | EN | eXtended Transport System](#)

Comunicación y Control

CU2508: [Documentation | EN | CU2508 Real-time Ethernet port multiplier](#)

CU8801-0000: [Installation- and Operating instructions for CU8801-0000](#)

Terminales

EL9576: [Documentation | EN | EL9576 Brake Chopper Terminal with EtherCAT connection](#)

EL5101: [Documentation | EN | EL5101-00xx Incremental Encoder Interface](#)

EL1008: [Documentation | EN | EL10xx, EL11xx Digital Input Terminals](#)

EL2008: [Documentation | EN | EL20xx, EL2124 Digital Output Terminals](#)

EK1100: [Documentation | EN | EK110x-00xx, EK15xx EtherCAT Bus Coupler](#)

C6930-1106-0050: [Manual | EN | C6930 Industrial PC](#)

Panel HMI

CP3916-0000: [Manual | EN | CP39xx Control Panel](#)

C9900-G034: [Installation and Operating Manual for C9900-G0xx](#)

Alimentación

PS1111-2403-0002: [Documentation | EN | PS1111-2403-0002 Power supply 24 V DC, 3.8 A, 1-phase, AC 100-240 V](#)

QS20.241: [Datasheet QS40.241, QS40.241-C2](#)

QS40.241: [Datasheet QS20.241, QS20.241-A1, QS20.241-C1](#)

Elementos de seguridad y protección

3RT2526-2BB40: [Contactor de potencia, AC-3e/AC-3, 25 A, 11 kW/400 V, 24 V DC](#)

5SU1354-6KK10: [Interruptores FI/LS, 10 kA, 1 P+N, Tipo A, 30 mA](#)

5SY6516-7: [Automático magnetotérmico 230V 6kA](#)

5SY4204-7: [Automático magnetotérmico 400V 10kA](#)

5SL3016-7: [Automático magnetotérmico 230V 4,5kA](#)

Elementos de conexión

ZK1090-9191: [Conectores RJ45 ZK1090-9191-Cxxx](#)

11.2 Lista de errores NC Motion

[Manual | EN | NC Errorcodes TwinCAT 3 | Motion](#)

11.3 Licencias

TF5410: [Manual | EN | TF5410 TwinCAT 3 | Motion Collision Avoidance](#)

TF5850: [XTS Software TF5850 | TC3 XTS Extension](#)

TF2000: [Manual | EN | TF2000 TwinCAT 3 | HMI Server](#)

TF6250: [Manual | EN | TF6250 TwinCAT 3 | Modbus TCP](#)

Capítulo 12. Bibliografía

Capítulo 2. Sección 2.2. Apartados 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 y 2.2.4

- I. *Beckhoff Information System - English*. (s. f.). infosys Beckhoff.
https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/cx8190_hw/5091854987.html&id=
- II. *Buses de campo y protocolos en redes industriales *1 - PDF Descargar libre*. (s. f.). <https://docplayer.es/1228687-Buses-de-campo-y-protocolos-en-redes-industriales-1.html>
- III. Corvo, H. S. (2019). *Topología de árbol: características, ventajas, desventajas*. Lifered. <https://www.lifered.com/topologia-de-arbol/>
- IV. Julio. (2022, 11 septiembre). *Topologías de red - apuntesjulio Redes*. apuntesjulio. <https://apuntesjulio.com/topologias-de-red/>
- V. Calderón, C. (2021, 17 noviembre). *¿Cuáles son los componentes de una Red de computadores?* Redes de Computadores.
<https://www.plotandesign.com/redes/componentes-de-red-informatica/>
- VI. *Capa 7: Nivel de Aplicación – Todo de Redes*. (s. f.).
<https://tododeredes.com/modelo-osi/capa-7/>
- VII. Solano, J. (s. f.). *El modelo OSI*.
http://dis.um.es/~lopezquesada/documentos/IES_1213/LMSGI/curso/xhtmll/xhtmll2/documentos/index7.html
- VIII. *¿Qué es el modelo OSI?* (s. f.). cloudflare.com. <https://www.cloudflare.com/es-es/learning/ddos/glossary/open-systems-interconnection-model-osi/>
- IX. *EtherCAT - The Ethernet Fieldbus*. (s. f.). Beckhoff.
https://www.beckhoff.com/media/downloads/information-media/etg_brochure_en.pdf
- X. *CAPÍTULO I EL MODELO CIM Y JERARQUÍA DE REDES DE COMUNICACIÓN EN LA INDUSTRIA*. (s. f.).
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2007/bmfcim971e/doc/parte/i.pdf>
- XI. Díaz, R. B., Francolí, J. F., & Martínez, C. (2017). La industria 4.0: El estado de la cuestión. *Economía industrial*, 406, 151-164.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6343649>

Capítulo 2. Sección 2.2. Apartado 2.2.5

- I. Tema 3. *Redes de comunicación industriales*. (s. f.). Universidad de Valencia. https://www.uv.es/rosado/courses/sid/Capitulo3_rev0.pdf
- II. Aula. (2022). Qué es un Bus de Campo y para qué sirve. *aula21 | Formación para la Industria*. <https://www.cursosaula21.com/que-es-un-bus-de-campo/>
- III. colaboradores de Wikipedia. (2023). Protocolo de internet. *Wikipedia, la enciclopedia libre*. https://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_internet
- IV. Abraham González. (2017, 2 julio). *Diferencias entre TCP y UDP* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=WnC-iWK5zVQ>
- V. colaboradores de Wikipedia. (2019). OPC. *Wikipedia, la enciclopedia libre*. <https://es.wikipedia.org/wiki/OPC>
- VI. colaboradores de Wikipedia. (2022). SERCOS III. *Wikipedia, la enciclopedia libre*. https://es.wikipedia.org/wiki/SERCOS_III
- VII. Fluke. (s. f.). *Foundation™ Fieldbus: conceptos básicos del sistema y su diagnóstico*. <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/osciloscopios/foundation-fieldbus-conceptos-basicos-del-sistema-y-su-diagnostico>
- VIII. *Conmutadores y Tecnologías de Anillo – PROFINET MRP y MRPD – PI Norte América*. (s. f.). <https://us.profinet.com/conmutadores-y-tecnologias-de-anillo-profinet-mrp-y-mrpd/>
- IX. Aula. (2022a). PROFINET: Qué es y cómo funciona. *aula21 | Formación para la Industria*. <https://www.cursosaula21.com/profinet-que-es-y-como-funciona/>
- X. ¿Qué es Ethernet (IEEE 802.3)? (2022, 12 agosto). IONOS Digital Guide. <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/ethernet-ieee-8023/>
- XI. Autex.Training. (2020, 8 enero). *Canales de comunicación en PROFINET - Universidad PROFINET*. Universidad PROFINET. <https://profinetuniversity.com/profinet-basico/canales-de-comunicacion-en-profinet/>
- XII. Ravn, R. S. (2022, 15 junio). *Unicast vs Multicast vs Broadcast: diferencias | TVyVideo*. www.tvyvideo.com.

<https://www.tvyvideo.com/2022052019568/articulos/tecnologia/unicast-vs-multicast-vs-broadcast-diferencias.html>

- XIII.** *Carrier sensing multiple access with collision resolution (CSMA/CR) protocol for next-generation wireless LAN.* (2013, 1 julio). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6614815>
- XIV.** *B&R Industrial Automation GmbH.* (s. f.). B&R: Perfection in Automation. <https://www.br-automation.com/es/productos/modulos-de-red-y-bus-de-campo/informacion-adicional/transferencia-de-mensajes-segun-el-principio-de-productor-consumidor/>
- XV.** Wikipedia contributors. (2023). CANopen. *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/CANopen>
- XVI.** Real Time Automation. (2022, 22 agosto). *Modbus RTU Protocol Overview - Real Time Automation, Inc.* Real Time Automation, Inc. <https://www.rtautomation.com/technologies/modbus-rtu/>
- XVII.** Real Time Automation. (2022b, octubre 6). *Modbus TCP/IP Protocol Overview - Real Time Automation, Inc.* Real Time Automation, Inc. <https://www.rtautomation.com/technologies/modbus-tcpip/>
- XVIII.** *Modbus ASCII vs RTU | Simply Modbus Software.* (s. f.). <https://www.simplymodbus.ca/ASCII.htm>
- XIX.** Aula. (2022a). Modbus: Qué es y cómo funciona. *aula21 | Formación para la Industria.* <https://www.cursosaula21.com/modbus-que-es-y-como-funciona/>
- XX.** *INFORME: INTERBUS.* (s. f.). <http://karlagaona.blogspot.com/2015/08/informe-de-agosto.html>
- XXI.** *Sistema LonWorks.* (s. f.). ISA - Ingeniería de Sistemas y Automática. <http://isa.uniovi.es/docencia/AutomEdificios/transparencias/LonWorks.pdf>
- XXII.** *CANOPEN.* (s. f.). Rincón del Técnico. <https://postventa.webcindario.com/pdf/redcanopen.pdf>
- XXIII.** *Solución inteligente para puentes de lavado automático - Trabajo de Fin de Grado Daniel Casco González.*

Capítulo 2. Sección 2.2. Apartado 2.2.6

- I. Aula. (2023). Qué es un sistema SCADA, para qué sirve y cómo funciona. *aula21 | Formación para la Industria*. <https://www.cursosaula21.com/que-es-un-sistema-scada/>
- II. colaboradores de Wikipedia. (2020). Sistema de control industrial. *Wikipedia, la enciclopedia libre*. https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_control_industrial
- III. Nico. (2021). Programación en PLC: controladores programables. *Electrónica Edimar*. <https://edimar.com/programacion-en-plc/>
- IV. Factoria. (2022, 25 febrero). *Sistemas de monitorización y control de procesos industriales | Meinsa*. Meinsa. <https://meinsa.com/2020/05/sistemas-de-monitorizacion-y-control-de-procesos-industriales/>

Capítulo 3. Sección 3.1

- I. ¿Cómo se fabrican las lentes oftálmicas? (s. f.). <https://www.zeiss.es/vision-care/mejor-vision/entender-la-vision/como-se-fabrican-las-lentes-oftalmicas.html>

Capítulo 4. Sección 4.3. Apartado 4.3.1

- I. *Guide to Certification of Electrical Insulation Systems according to UL Standard 1446 Ed.7*. (s. f.). ZVEI: Die Elektroindustrie. https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2019/September/UL-Guideline-1446-Revision-2019-engl/UL-Guideline-1446-Revision-2019-engl.pdf
- II. *IEC*. (s. f.). IEC - International Electrotechnical Commission. <https://webstore.iec.ch/publication/666>
- III. Redeweb, & Redeweb. (2019). Niveles de protección frente a sobre tensiones para fuentes de alimentación. OVC Over Voltage Category III |

Revista Española de Electrónica. *Revista Española de Electrónica | Todas las noticias de electrónica actualizadas a diario.*

<https://www.redeweb.com/articulos/niveles-de-proteccion-frente-a-sobre-tensiones-para-fuentes-de-alimentacion-ovc-over-voltage-category-iii/?cn-reloaded=1>

- IV. *La Estrategia de Transición Justa será el marco de actuación para optimizar las oportunidades de la transición ecológica.* (s. f.).
<https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/la-estrategia-de-transici%C3%B3n-justa-ser%C3%A1-el-marco-de-actuaci%C3%B3n-para-optimizar-las-oportunidades-de-la-transici%C3%B3n-ecol%C3%B3gica-/tcm:30-487299>
- V. *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030.* (s. f.). Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado.
https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-5106
- VI. *Marco Estratégico de Energía y Clima: Una oportunidad para la modernización de la economía española y la creación de empleo.* (s. f.).
<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/participacion-publica/marco-estrategico-energia-y-clima.aspx>

Capítulo 4. Sección 4.3. Apartado 4.3.2

- I. *Ley de Industria.* (s. f.). MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO. <https://industria.gob.es/Calidad-Industrial/legislaciongeneral/Paginas/Ley-de-Industria-Ley-211992.aspx>
- II. *El Gobierno aprueba el anteproyecto de Ley de Industria que aspira a situar la industria española a la vanguardia del siglo XXI.* (2022, 5 diciembre). MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO.
<https://www.mincotur.gob.es/es-es/GabinetePrensa/NotasPrensa/2022/Paginas/El-Gobierno-aprueba-el-anteproyecto-de-Ley-de-Industria-que-aspira-a-situar-la-industria-espa%C3%B1ola-a-la-vanguardia-del-siglo.aspx>

Capítulo 4. Sección 4.3. Apartado 4.3.3

- I. Bullick, J. (2023). What is Safety over EtherCAT, FSoE? *KEB*.
<https://www.kebamerica.com/blog/what-is-failsafe-over-ethercat-fsoe/>
- II. Wikipedia contributors. (2023a). IEC 61508. *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61508
- III. colaboradores de Wikipedia. (2022b). IEC 61131-3. *Wikipedia, la enciclopedia libre*. https://es.wikipedia.org/wiki/IEC_61131-3
- IV. IEC. (s. f.-b). IEC - International Electrotechnical Commission.
<https://webstore.iec.ch/publication/59890>
- V. *UNE-EN 61131-2:2007 (Ratificada) Autómatas programables. Parte. . .*
(s. f.). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0040035>

Capítulo 5

- I. *Marco Estratégico de Energía y Clima: Una oportunidad para la modernización de la economía española y la creación de empleo*. (s. f.-b).
<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/participacion-publica/marco-estrategico-energia-y-clima.aspx>
- II. United Nations Environment Programme. (s. f.). La capa de ozono se recupera poco a poco pero quedan obstáculos. *UNEP*.
<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/la-capade-ozono-se-recupera-poco-poco-pero-quedan-obstaculos#:~:text=En%20la%20actualidad%2C%20se%20han,2022%20en%20comparaci%C3%B3n%20con%201987%3F>
- III. *Paro en España hoy, según la EPA del INE*. (s. f.).
<https://www.epdata.es/datos/paro-espana-hoy-epa-ine/10/espana/106>
- IV. Ministerio de Consumo/EC-JRC, Sostenibilidad del consumo en España. Evaluación del impacto ambiental asociado a los patrones de consumo

- mediante Análisis del Ciclo de Vida, Ministerio de Consumo, Madrid, 2022.
[https://www.consumo.gob.es/es/system/tdf/prensa/Informe de Sostenibilidad del consumo en Espan%CC%83a EU MinCon.pdf?file=1&type=node&id=1126&force=](https://www.consumo.gob.es/es/system/tdf/prensa/Informe_de_Sostenibilidad_del_consumo_en_Espan%CC%83a_EU_MinCon.pdf?file=1&type=node&id=1126&force=)
- V. Lomba, P., & Lomba, P. (2022, 21 diciembre). *La industria española sigue perdiendo peso en la economía del país*. El País.
<https://elpais.com/economia/2022-12-21/la-industria-espanola-sigue-perdiendo-peso-en-la-economia-del-pais.html>
- VI. Emilia. (2022, 16 marzo). *28 de enero de 2022.- Barómetro Industrial 2021 del COGITI e Informe Una perspectiva económica de la situación de la industria en España del CGE. Se constata la caída del sector industrial durante la pandemia y se prevé una complicada recuperación si los fondos europeos no se emplean de manera eficiente - Consejo General de Economistas*. Consejo General de Economistas.
https://economistas.es/cust_notas/28-de-enero-de-2021-barometro-industrial-2021-del-cogiti-e-informe-una-perspectiva-economica-de-la-situacion-de-la-industria-en-espana-del-cge-se-constata-la-caida-del-sector-industrial-durante-la/
- VII. INE - Instituto Nacional de Estadística. (s. f.). *INE. Instituto Nacional de Estadística*. INE. <https://www.ine.es/>
- VIII. *Estadística Estructural de Empresas: Sector Industrial Año 2020. Resultados definitivos*. (2022, 9 junio). INE. Instituto Nacional de Estadística. https://www.ine.es/prensa/eesi_2020_d.pdf

Capítulo 6

- I. *Agencia Tributaria: Tipo impositivo*.
(s. f.). <https://sede.agenciatributaria.gob.es/Sede/impuesto-sobre-sociedades/que-base-imponible-se-determina-sociedades/tipo-impositivo.html>

- II. *Agencia Tributaria: Tipos impositivos de IVA.* (2023, 5 mayo). <https://sede.agenciatributaria.gob.es/Sede/iva/calculo-iva-repercutido-clientes/tipos-impositivos-iva.html>
- III. IAE: ¿Qué es, para qué sirve y cuándo se paga? (s. f.). *business.amazon.es*. <https://business.amazon.es/es/descubremas/blog/que-es-iae>
- IV. Bego. (2023). ¡Benefíciate este año 2023 de las bonificaciones que el ayuntamiento de Madrid ha aprobado en el IBI y el IAE! *Spain*. <https://es.figroup.com/el-ayuntamiento-de-madrid-abre-el-plazo-para-solicitar-las-bonificaciones-del-ibi-y-del-iae/>
- V. *Ley 27/2014, de 27 de noviembre, del Impuesto sobre Sociedades.* (2014, 28 noviembre). BOE LEGISLACIÓN CONSOLIDADA. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2014/BOE-A-2014-12328-consolidado.pdf>

Capítulo 8

- I. *PROYECTO REDUCIDO: ACONDICIONAMIENTO DE VIALES PUBLICOS EN POBLE NOU DE BENITATXELL (ALICANTE).* (2018, octubre). Diputación de Alicante. <https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/5bdaf796-08ed-48dc-be21-3791976ce1fe/DOC20190612093208ANEXO+PLIEGO+DE+CONDICION+ES+TECNICAS.pdf?MOD=AJPERES>
- II. *Construcción de Central de Energía Eólica – Trabajo Proyectos y Legislación* (2022, MAYO). Universidad Europea de Madrid.

