

Estudio para la puesta en marcha de un robot SCARA AdeptThree-XL

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Eléctrica

Autor: Pareja Aparicio, Rafael

Tutor: Masiá Vañó, Jaime

Cotutor: Rufino Valor, Juan Ramón

Curso: 2017-18

Índice

Contenido

Índice	2
Resumen	5
Abstract	6
1. Presentación del proyecto	7
2. Estudio partes del robot industrial.....	9
2.1. <i>Introducción</i>	9
2.2. <i>Introducción a los robots industriales</i>	9
2.3. <i>Morfología de los robots industriales</i>	10
2.3.1. Estructura mecánica de los robots industriales.....	10
2.3.2. Ejes principales y secundarios.....	11
2.4. <i>Brazo robot Adept Three XL</i>	12
2.4.1. Grados de libertad	12
2.4.2. Especificaciones de rendimiento del brazo robot Adept Three-XL	14
2.5. <i>Estructura sistema robot</i>	16
2.5.1. Introducción	16
2.5.2. Unidad de control de AdeptThree XL.....	16
3. Pruebas y montaje	20
3.1. <i>Introducción</i>	20
3.2. <i>Montaje</i>	20
3.2.1. Características técnicas	20
3.2.2. Normas básicas de seguridad para la colocación del brazo robot.....	21
3.3. <i>Esquemas básicos</i>	23
3.3.1. Introducción	23
3.3.2. Esquema básico 1	24
3.3.3. Esquema básico 2	27
3.4. <i>Proceso seguido en las pruebas realizadas</i>	28
3.5. <i>Conclusiones de las pruebas realizadas</i>	28
4. Estudio elementos de control	30

4.1.	<i>Introducció</i>	30
4.2.	<i>Morfologia del robot AdeptThree XL: articulacions 1 y 2</i>	31
4.2.1.	Accionamiento	31
4.2.2.	Actuador	31
4.2.3.	Sensores	32
4.3.	<i>Morfologia del robot AdeptThree XL: articulacions 3 y 4</i>	33
4.3.1.	Accionamiento	33
4.3.2.	Actuador	33
4.3.3.	Sensores	34
4.4.	<i>Propuesta equipos para el control de las articulaciones</i>	34
4.4.1.	Justificació del disseny	34
4.4.2.	Solució proposta	34
4.5.	Control del posicionado articulaciones	37
4.5.1.	Introducció	37
4.5.2.	Cinemática inversa	37
4.6.	Presupuesto equipos propuestos	41
5.	Estudio para adquirir brazo robótico manipulador equivalente	42
5.1.	<i>Introducció</i>	42
5.2.	<i>Solució més equivalente en Epson</i>	42
5.2.1.	Brazo robótico manipulador	42
5.2.2.	Controlador	43
5.2.3.	Software	45
5.2.4.	Lenguaje de programación	46
5.3.	<i>Presupuesto robot equivalente</i>	47
5.4.	<i>Alternativa más económica Epson</i>	48
5.4.1.	Características técnicas	48
5.4.2.	Presupuesto	49
5.5.	<i>Alternativa más económica de Omron</i>	50
5.5.1.	Características técnicas	50
5.5.2.	Software	51
5.5.3.	Lenguaje de programación	52
5.5.4.	Presupuesto	54
5.6.	<i>Comparativa</i>	54
6.	Conclusió	57

7. Bibliografía y referencias	59
Índice de figuras	60
Anexos.....	62

Resumen

A partir de un robot recuperado de la industria, se estudiarán los diversos componentes y se analizarán las mejores opciones para la puesta en marcha del robot. Se estudiará toda la cadena de control del robot recuperado y se conectará para ponerlo en marcha según las especificaciones de fábrica. En caso de resultar una cadena obsoleta, se propondrán soluciones para la puesta en marcha utilizando, bien la estructura mecánica solamente, o bien la estructura con los accionamientos integrados. Se plantearán soluciones que permitan el control del brazo, además de la posibilidad de adquirir nuevos robots.

Palabras clave: SCARA, Adept, industrial, servodrivens, servomotores, brazo robótico.

Abstract

From a robot recovered from the industry, the various components will be studied and the best options for the start-up of the robot will be analyzed. The entire chain of control of the recovered robot will be studied and connected to start it according to the factory specifications. In case of an obsolete chain, solutions for the start-up will be proposed using either the mechanical structure only, or the structure with the integrated drives. Solutions will be proposed that allow the control of the arm, in addition to the possibility of acquiring new robots.

Keywords : SCARA, Adept, industrial, servodrivers, servomotors, robotic arm.

1. Presentación del proyecto

En el presente proyecto vamos a estudiar la puesta en marcha del robot Adept three-XL, así como las posibilidades de interconectados todos los elementos disponibles, y si es posible su puesta en marcha.



Figura 1.1.- Robot SCARA (www.adept.com cortesía OMROM).

El robot está catalogado como robot industrial, también denominado brazo robot o brazo mecánico, por su analogía con el brazo humano, formado por una base la cual puede rotar 360° sobre su eje, incluyendo varias articulaciones (simulan el hombro y el codo), en el extremo (al final del codo), se puede incorporar una parte mecánica denominada muñeca que le permite orientar la herramienta final. La herramienta final determinará la aplicación final, dependerá de las acciones propias a realizar dentro del sistema de automatización de procesos. Dentro de los tipos de robots industriales, es de los denominados como SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*), que presenta ciertas características que determinará su área de trabajo.

En el presente trabajo se van a analizar los pasos realizados para la puesta en funcionamiento del robot industrial, estudio de los tipos de robots para definir las características, montajes realizados con los resultados obtenidos, extrayendo una serie conclusiones y, finalmente, se incluyen propuestas para una puesta en funcionamiento mediante el uso de servo sistemas de control de los motores de cada una de las articulaciones como sustitución a toda la parte electrónica de control.

A continuació, se poden veure unes fotografies del equip en les instal·lacions del laboratori I2L1 situat en la planta 1 del edifici Georgina Blanes de la Escola Politècnica Superior de Alcoi (EPSA):



Figura 1.2.- Brazo robòtic industrial manipulador (Fuente: propia).

En la figura anterior dreta, se poden visualitzar els equips electrònics de control situats sobre la taula, així com la gran quantitat d'elements disponibles, que se iràn testejant amb la finalitat de realitzar un muntatge inicial que sirva com a prova per a la seua posada en marxa, prenent com a referència la seua instal·lació prèvia en una cadena de producció.

Finalment se realitzarà la investigació sobre el software necessari, així com diferents possibilitats de braços robòtics amb les mateixes característiques o similars, per a establir una comparativa, per a obtenir les conclusions sobre què seria la millor opció.

2. Estudio partes del robot industrial

2.1. Introducción

En este apartado se van a ver la definición y características de un robot industrial, indicando las características propias del equipo disponible: Adept three XL. Que sirve como paso inicial al estudio de los equipos necesarios para su puesta en funcionamiento, que se verá en próximos apartados.

2.2. Introducción a los robots industriales

La definición más comúnmente aceptada es la de la Asociación de Industrias Robóticas (RIA):

- Un **robot industrial** es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.

Esta definición, ligeramente modificada, ha sido adoptada por la Organización Internacional de Estándares (ISO) define al robot industrial como:

- Un **manipulador multifuncional reprogramable** con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas.

Otra definición muy aceptada es la realizada por la Federación Internacional de Robótica (IFR) que realiza la distinción entre robot industrial de manipulación y otros robots:

- Por **robot industrial** de manipulación se entiende una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento.

En esta definición se debe entender que la re-programabilidad y multifuncionalidad se consiguen sin modificaciones físicas del robot. De tal forma, que una vez el equipo este montado, se pueden modificar su aplicabilidad mediante programación y sustituyendo la herramienta colocada en su posición final.

Común en todas las definiciones anteriores es la aceptación del robot industrial como un brazo mecánico con capacidad de manipulación y que incorpora un control más o menos complejo. Un sistema robotizado, en cambio, es un concepto más amplio. Engloba todos aquellos dispositivos que realizan tareas de forma automática en sustitución de un ser humano y que pueden incorporar o no a uno o varios robots, siendo esto último lo más frecuente.

En el caso particular del presente proyecto se establece que **Adept Three XL se trata de un brazo robot manipulador industrial**. Entonces, para ver como interconectar las distintas partes, hay que conocer más en detalle la morfología de un brazo robot, para ir particularizando en las características del brazo robot disponible.

2.3. Morfología de los robots industriales

2.3.1. Estructura mecánica de los robots industriales

Las características mecánicas más relevantes propias de los robots industriales y se proporcionan valores concretos de las mismas, para determinados modelos y aplicaciones, son:

- Grados de libertad: son los parámetros que se precisas para determinar la posición y orientación del terminal del manipulador. También se define como los posibles movimientos básicos (giratorios o de desplazamiento). A mayor número de grados de libertad aumenta la flexibilidad en el posicionado del elemento terminal.
- Zonas de trabajo y dimensiones: se define como el área que cubre el elemento terminal (o herramienta), queda delimitada por los límites de giro y desplazamiento de las articulaciones.
- Capacidad de carga: peso, en kilogramos, que puede transportar la garra del manipulador.
- Precisión: grado de exactitud en la repetición de los movimientos de un manipulador al realizar una tarea programada. Dependiendo de la aplicación interesa que sea mayor o menor (en ensamblaje de piezas debe ser menor -0,1mm-, pudiendo aumentar en aplicaciones como soldadura de 1 a 3mm- o mecanizado -1mm-).
- Velocidad: o velocidad de trabajo, dependiendo de la aplicación puede interesar que mayor o menor velocidad (en aplicaciones de soldadura y manipulación contra más rápido mejor aumentando el rendimiento del robot, en tareas de pintura, mecanizado y ensamblaje interesa una velocidad media o baja).
- Tipo de articulaciones: prismática (1 grado de libertad), rotación (1 grado de libertad), cilíndrica (2 grados de libertad), esférica (3 grados de libertad), planar (2 grados de libertad) o tornillo (2 grados de libertad).

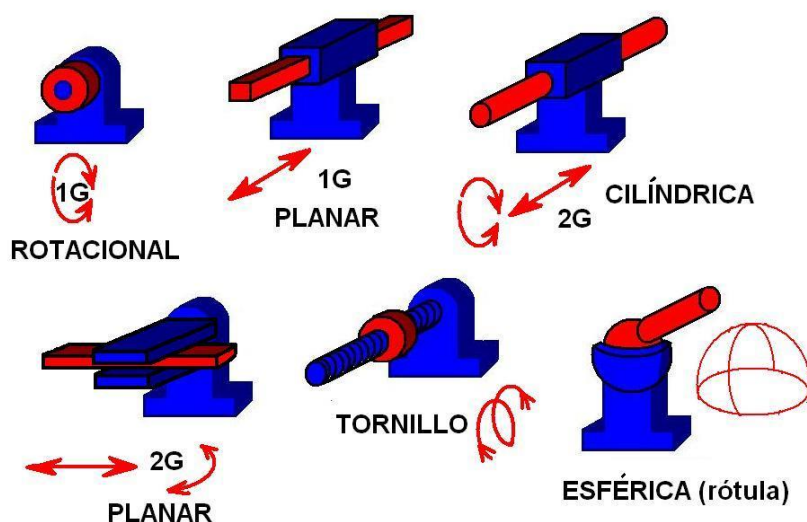


Figura 2.1.- Tipos de articulaciones (Fuente: <https://coparoman.blogspot.com/2013/05/12-grados-de-libertad-de-un-robot.html>).

El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot da lugar a diferentes configuraciones, con características para tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicación. Siendo las más utilizadas la rotacional (R) y la prismática (P).

Las combinaciones más frecuentes con las denominadas configuraciones clásicas, donde se toma como referencia a las tres primeras articulaciones del robot, que son las más importantes a la hora de posicionar su extremo en un punto del espacio, correspondientes a modelos de coordenadas:

- a) Cartesiana (3 desplazamientos, PPP).
- b) Cilíndrica (2 desplazamientos y 1 giro, PRP).
- c) Polar (1 desplazamiento y 2 giros, RRP).
- d) Angular (3 giros, RRR).
- e) SCARA (1 desplazamiento y 2 giros, RRP y PRR). No está considerada como clásica.

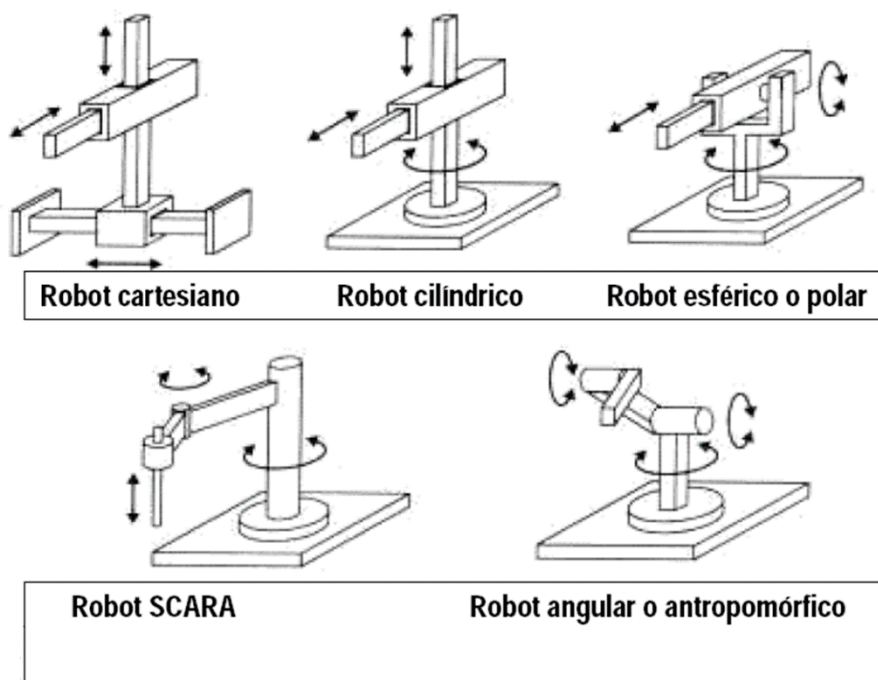


Figura 2.2.- Tipología de brazos robots industriales manipuladores (Fuente: <https://charlesandrew.wordpress.com/2010/04/13/articulaciones/>).

Mención especial debe tener la configuración SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*), aun no siendo una de las configuraciones clásicas, es una de las configuraciones más utilizadas en la industria.

2.3.2. Ejes principales y secundarios

A las 3 primeras articulaciones que definen la configuración de los robots, son las denominadas como ejes principales, y definirán los ejes de coordenadas XYZ, por lo que permiten el acceso a cualquier parte del espacio.

Los secundarios permiten cambiar la orientación de la pinza, herramienta, o terminal. Incluirán todas las configuraciones de la muñeca.

También aparece el concepto de séptimo eje, cuando el robot este situado sobre una plataforma con algún tipo de movimiento, principalmente longitudinal.

Finalmente, los ejes auxiliares, son externos al robot pero que están controlados por la misma unidad de control

En el caso del análisis particular del robot solo estarán incluidos los ejes principales y secundarios, propiamente indicados en la estructura del propio brazo robot.

2.4. Brazo robot Adept Three XL

2.4.1. Grados de libertad

El robot AdeptThree-XL es un robot SCARA de cuatro ejes:

- Las articulaciones 1, 2 y 4 de rotación.
- La articulación 3 es traslacional.

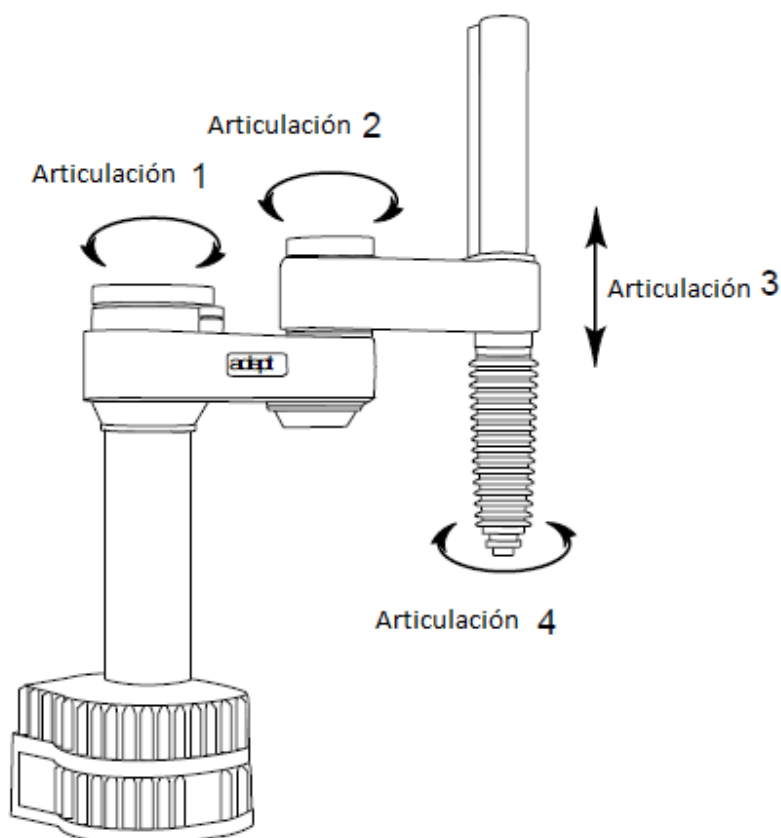


Figura 2.3.- Número de articulaciones brazo robot Adept Three XL (Fuente: www.adept.es, handbook installation).

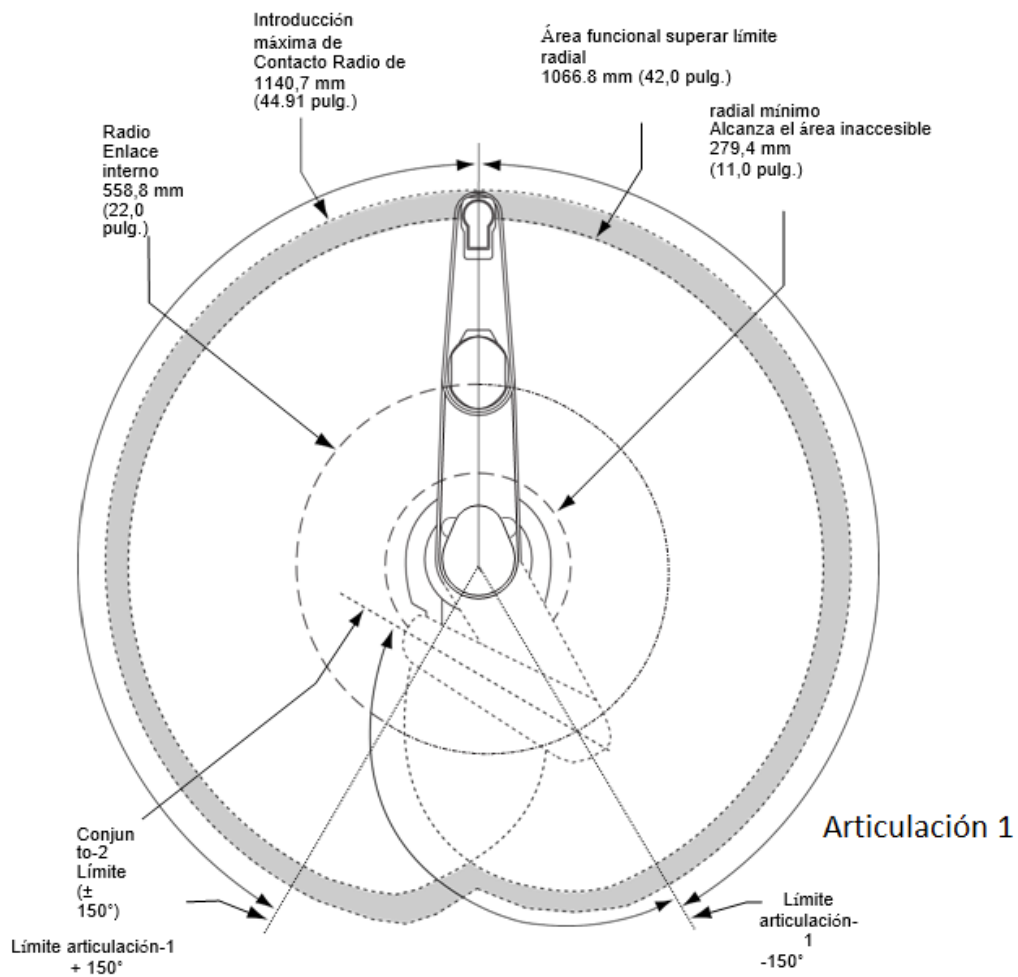
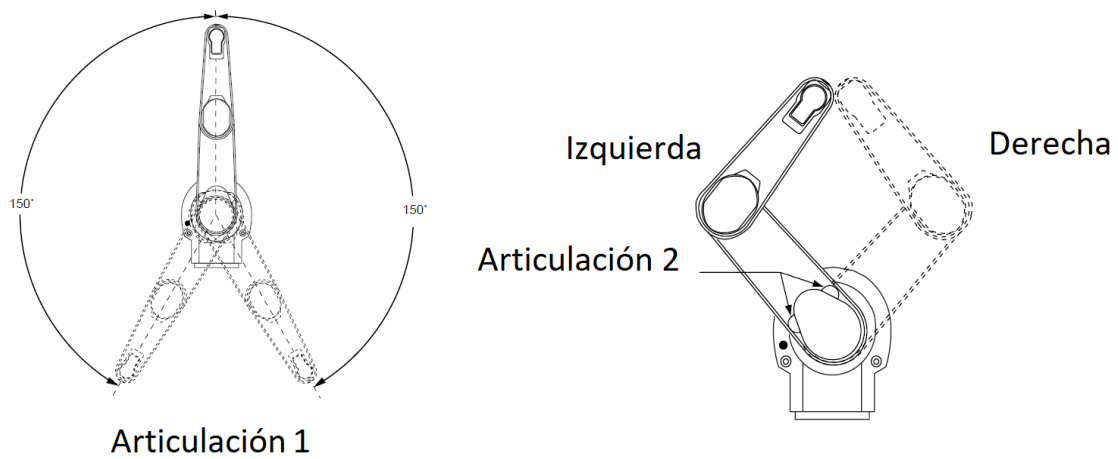


Figura 2.4.- Movimiento y zona de trabajo según articulaciones 1 y 2 (Fuente: www.adept.es, handbook installation).

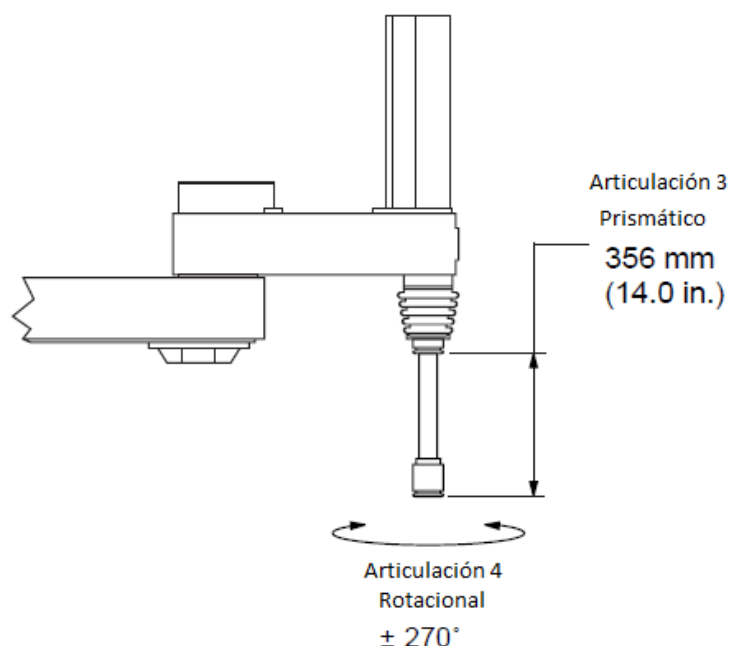


Figura 2.5.- Movimiento y zona de trabajo articulaciones 3 y 4 (Fuente: www.adept.es, handbook installation).

La zona de trabajo que delimitará el área de manipulación, sobre un eje horizontal vendrá determinada por las articulaciones 1 y 2, siendo la articulación 3 la que determinará la zona de trabajo vertical. La articulación 1, denominada como hombro, proporciona el movimiento de rotación de 300°. La articulación 2, denominada como codo, establece la unión entre la articulación 1 y 2, del eje rotacional al prismático. La articulación 3 establece un movimiento vertical de 356 mm.

La articulación 4, denominada como muñeca, ofrece un movimiento rotacional de +/-240° en donde se colocará la herramienta.

2.4.2. Especificaciones de rendimiento del brazo robot Adept Three-XL

En la siguiente tabla se indican las principales especificaciones del brazo robótico Adept Three XL (parte 1):

Rango de trabajo	
Radial máxima	1066.8 mm (42,0 pulg.)
Radial mínima	279,5 mm (11,0 pulg.)
(Brida inferior de la base de efector final) de espacio libre Vertical con la máxima articulación 3-retracción con la máxima extensión articulación 3	876,3 mm (34,5 pulg.) 520,7 mm (20,5 pulg.)
Movimiento dirección Z	
Conjunto 3	356 mm (14,0 pulg.)

Continuación, especificaciones del brazo robótico Adept Three XL (parte 2):

Rotación conjunta	
Conjunto 1	300 °
Conjunto 2	300 °
Conjunto 4	540 °
Carga útil (incluyendo efector de extremo)	25 kg (55 lb)
Inercia	
Acerca de conjuntos de 4 ejes	14.600 kg-cm ² (5000 lb-in ²)
Fuerza	
3 articulación fuerza hacia abajo sin carga útil	45,5 kg (100 lb)
Tiempo de ciclo	
sin carga útil	0,73 seg
9 kg (20 lb) de carga útil	0,88 seg
25 kg (55 lb) de carga útil	1,24 seg
Resolución	
Conjunto 1	0.00078 °
Conjunto 2	0.00078 °
Conjunto 3 (Z vertical)	0.0067 mm (0,00026 pulg.)
Conjunto 4 (rotación de la herramienta)	0,025 °
Repetibilidad	
Plano X, Y	± 0,038 mm (± 0,0015 in.)
Conjunto 3 (Z vertical)	± 0,038 mm (± 0,0015 in.)
Conjunto 4 (de rotación)	± 0,05 °
Velocidad conjunta (máximo)	
Conjunto 1	540 ° / seg
Conjunto 2	820 ° / seg
Conjunto 3	1.200 mm / seg (47,2 pulg. / Seg)
Conjunto 4	3,300 ° / seg
Peso	
Robot sin opciones adicionales	266 kg (585 lb)
Chasis de potencia, con 3 módulos amplificadores	aproximadamente 16,4 kg (36 lb)
MV-5 / -10 controlador, con 040, SIO, VGB	aproximadamente 14,5 kg (32 lb)
Vida de diseño	120 millones de ciclos de producción

2.5. Estructura sistema robot

2.5.1. Introducció

La estructura del brazo robot serà ampliant per la unitat de control, cuyas funcionalidades son:

- Control cinemàtic i dinàmic del moviment del braç.
- Control del equipament i processado de la informació provenient de los sensores externs, para que se integre dentro del sistema automàtic.
- Soporte del sistema de programación del robot.

A la unitat de control se alimentarà desde la red elèctrica, y este dispondrà de los elementos de control de los actuadores de los motores, a su vez, recogerà a partir de los sensores para realizar el control de los actuadores de cada una de las articulaciones.

2.5.2. Unidad de control de AdeptThree XL

El robot AdeptThree-XL està dissenyat para interactuar con el controlador de Adept MV-10 y el chasis de potencia PA-4. El control y el funcionamiento del robot està programado y realizado a través del controlador, el cual requerirá comunicación con los elementos de control manual o automàtic, por lo que tendrán que estar interconectados.

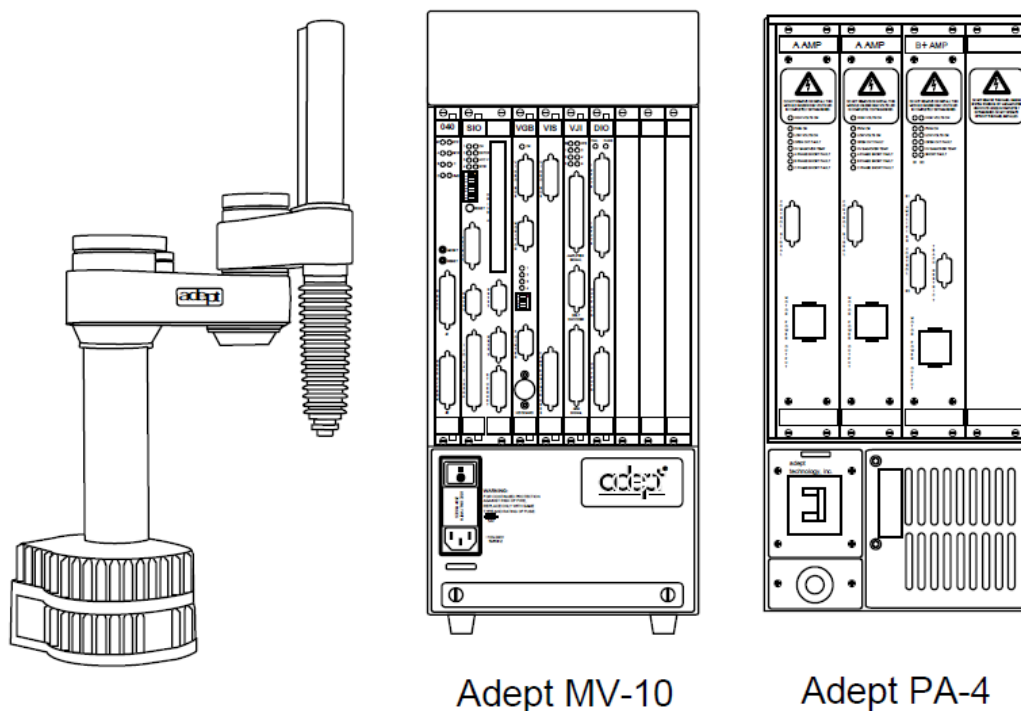


Figura 2.6.- Elementos básicos del sistema robótico (Fuente: www.adept.es, handbook installation).

En el manual se especifica el paquete opcional de seguridad, denominado como MMSP (*Mounting of the security panel*), que incluye las características de seguridad adicionales, las cuales estarán conectados y controlados por el panel de seguridad. De tal forma, que si no se cumplen una serie de condiciones el sistema no se pondrá en marcha, es decir, el brazo robótico no se moverá.

A continuación, se muestran las fotos de los equipos disponibles en el laboratorio I2L1, con los principales bloques de elementos que forman parte del sistema completo del brazo robótico Adept Three XL. En donde, se puede apreciar los diferentes conectores que utilizan y determinarán el cableado de interconexión entre ellos, de tal forma, que no haya posibilidad de realizar una conexión errónea o indebida.



Figura 2.8.- Controlador y chasis de potencia para robot Adept Three XL (Fuente: propia).



Figura 2.9.- Controlador (Fuente: propia).



Figura 2.10.- Chasis de potencia (Fuente: propia).

Los bloques del controlador y el chasis de potencia van separados, pero permite montaje como elementos adyacentes, a pesar de que el cableado y conexionado se realiza como si fueran

elementos distintos, con sus correspondientes interruptores de alimentación, siendo el chasis de potencia el elemento que controlará los motores (actuadores) por lo que el consumo de energía será mayor y por lo tanto las diferencias constructivas.

La alimentación del controlador es monofásica a 230 voltios, con un consumo de 5 amperios, y el del chasis de potencia es de trifásico más neutro a 400 voltios, con un consumo de 15 amperios. En la figura anterior, se puede apreciar que el circuito encargado del suministro trifásico es controlado por el panel de seguridad a través de dos contactores, situando fusibles de 16 amperios como elementos de protección, además de una fuente de alimentación de 24 voltios para alimentación del circuito de relés que forman parte del MMSP.

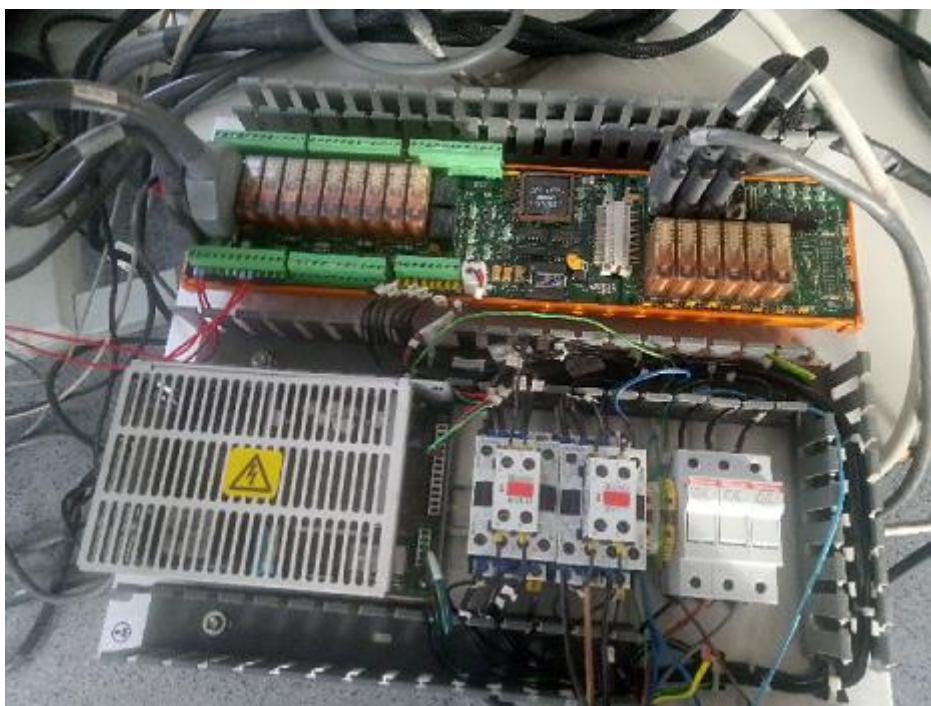


Figura 2.11.- Cuadro eléctrico de control del panel de seguridad (Fuente: propia).



Figura 2.12.- Placa de características del chasis de potencia (Fuente: propia).



Figura 2.13.- Placa de características del controlador (Fuente: propia).

3. Pruebas y montaje

3.1. Introducción

Una vez realizada la comprobación visual de todas sus partes e identificados todos los componentes, se procede a testear su estado previo a la conexión a la red eléctrica. Estableciéndose la configuración básica, la interconexión entre todos los elementos, y se establecen una serie de conclusiones en base a los resultados obtenidos tras la ejecución de las pruebas.

3.2. Montaje

3.2.1. Características técnicas

El robot Adept Three-XL es un robot diseñado para el trabajo industrial, de transmisión directa, gran precisión, alta velocidad y gran robustez. Las características técnicas más importantes extraídas de los manuales técnicos del equipo:

Conexiones de usuario	Eléctricas	22 hilos
	Neumáticas	6mm (x2)
Peso	266 kg	
Alcance	1067 mm	
Carga máxima	25 kg	
Inercia máxima de eje	14660 kg·cm ²	
Recorridos	Eje 1	±150°
	Eje 2	±150°
	Eje 3	356 mm
	Eje 4	±270°
Velocidades	Eje 1	540 °/s
	Eje 2	820 °/s
	Eje 3	1200 mm/s
	Eje 4	1955 °/s

3.2.2. Normas básicas de seguridad para la colocación del brazo robot

Teniendo en cuenta el tamaño y el peso, así como la velocidad de los movimientos que realiza y con la fuerza que se realizan hay que tener en cuenta una serie de normas, como son:

- Correcto anclado a suelo para evitar un posible vuelco.
- Objetos fuera del alcance de su zona de trabajo para evitar los impactos y lanzamiento de objetos a los usuarios que lo manipulen.
- Marcado y delimitación de las zonas en dónde es peligroso estar situado durante las pruebas para evitar el posible peligro a las personas.

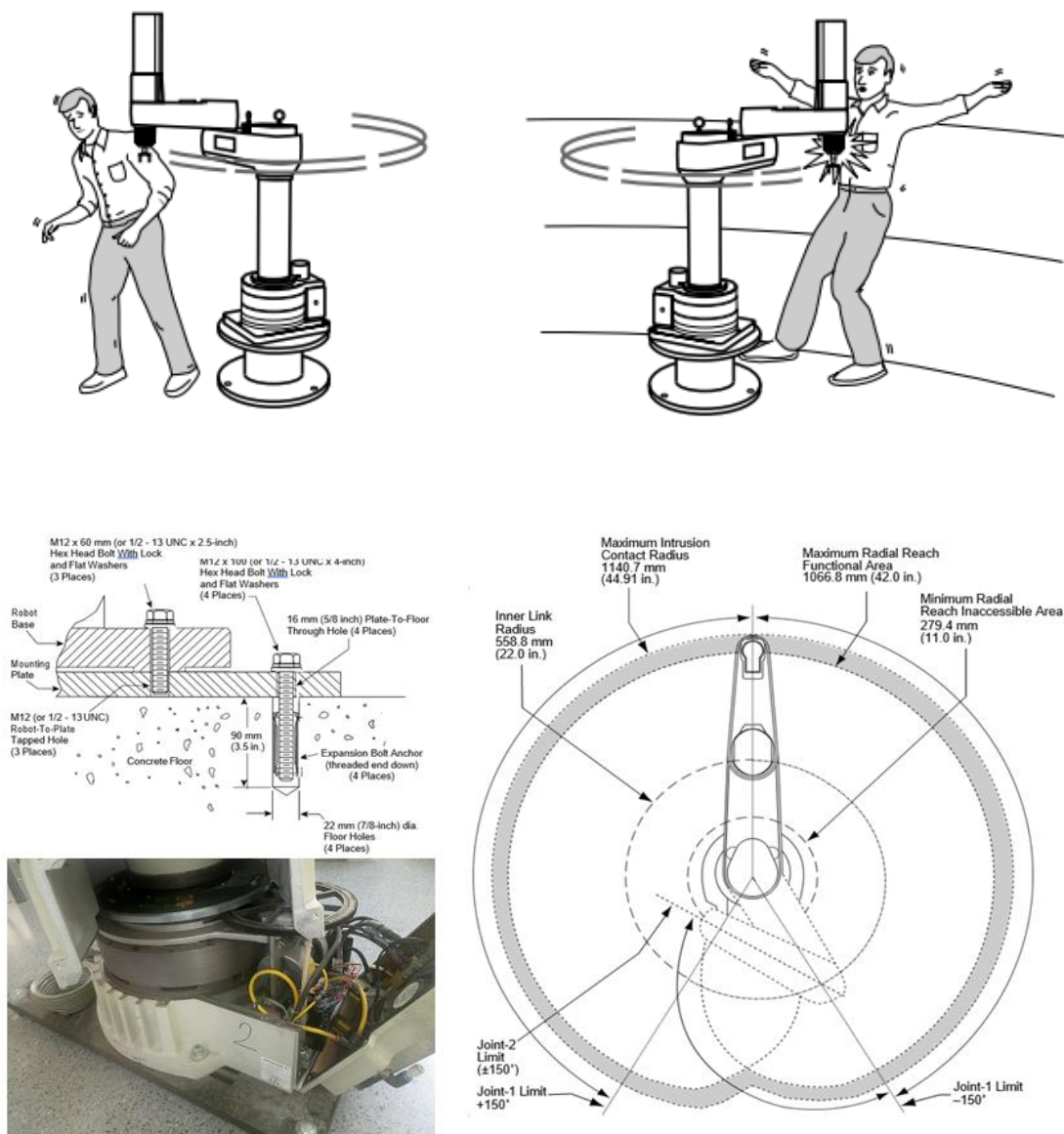


Figura 3.1.- Anclaje y cobertura para evitar el peligro a los usuarios que manipulan el robot (Fuente: www.adept.es, handbook installation. Fuente fotografía: propia).

Se requiere de un compresor para desbloquear los movimientos, sirviendo de ayuda para comprobar posibles agarrotamientos en las articulaciones, para ello se dispone de un accionamiento pulsador de accionamiento manual para desbloquear los frenos neumáticos del brazo robot. Este se encuentra situado entre la parte del brazo entre las articulaciones 1 y 2, tal y como se muestra en la siguiente figura:

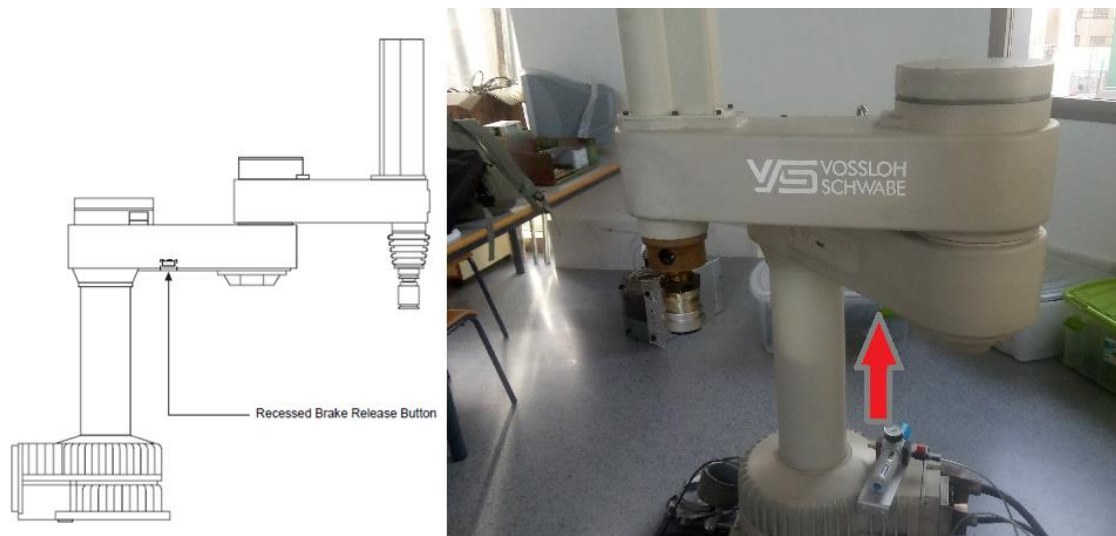


Figura 3.2.- Sistema de seguridad y bloqueo de las articulaciones (Fuente: www.adept.es, handbook installation. Fuente fotografía: propia).

Los sistemas neumáticos sirven de protección, bloqueando el movimiento de las articulaciones, puesto que el brazo robot no debería moverse si antes no se encuentran las condiciones preestablecidas de seguridad en el diseño. Para ello, dispone de las electroválvulas neumáticas situadas en la base del brazo robótico, las cuales serán controladas por el controlador, tal y como se muestra en la siguiente figura:



Figura 3.3.- Electroválvulas neumáticas de frenado de las articulaciones (Fuente: propia).

3.3. Esquemas básicos

3.3.1. Introducción

Los montajes que realizar son 2, uno consiste en la conexión con y el otro sin el panel o paquete de seguridad.

En ambos casos, se utiliza un control manual realizado a través del mando externo, denominado como MCP (*Manual control panel*), que permite controlar el robot y poder manejarlo a nuestro antojo, así como realizar una programación básica.



Figura 3.4.- Mando de control manual, MCP (Fuente: propia).

En la siguiente figura, se muestra los controles básicos disponibles en el MCP, así como realiza el brazo robótico en movimiento de la herramienta desde los ejes de coordenadas XYZ, además de la rotación de la articulación 4.

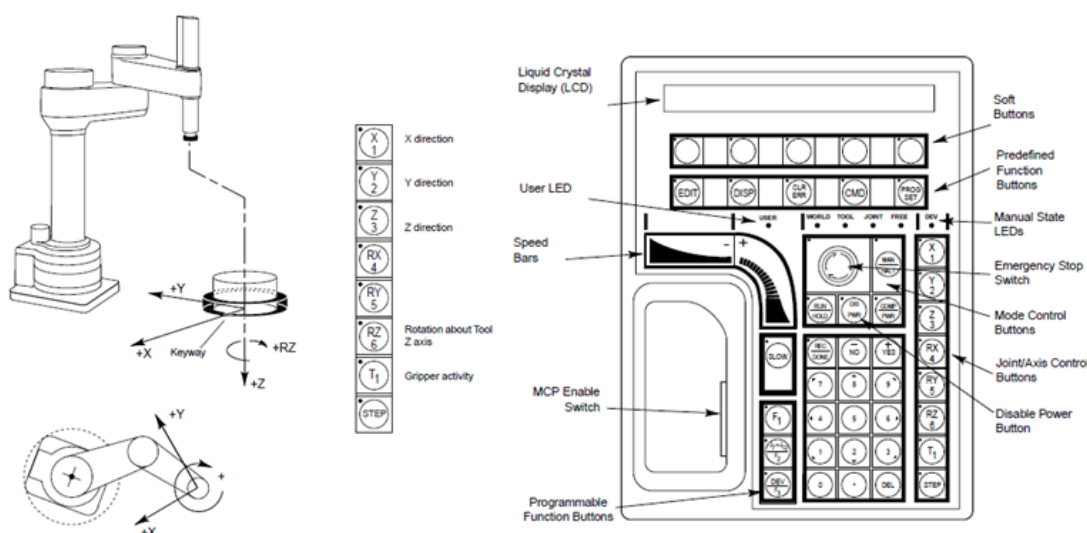


Figura 3.5.- Sistema de control manual robot Adept Three XL (Fuente: www.adept.es, handbook installation).

3.3.2. Esquema básico 1

A continuació, se mostra el esquema de conexionado de con el panel de seguridad, el cual va conectado a la unidad de control, que su vez se interconecta con los equipos de control externo, y a su vez el controlador se conecta con el chasis de potencia, a su vez, el robot tiene las conexiones de potencia de los motores que se conectan con el chasis de potencia y los sensores con el controlador, siendo el controlador el encargado de realizar el sistema de movimiento del brazo robot:

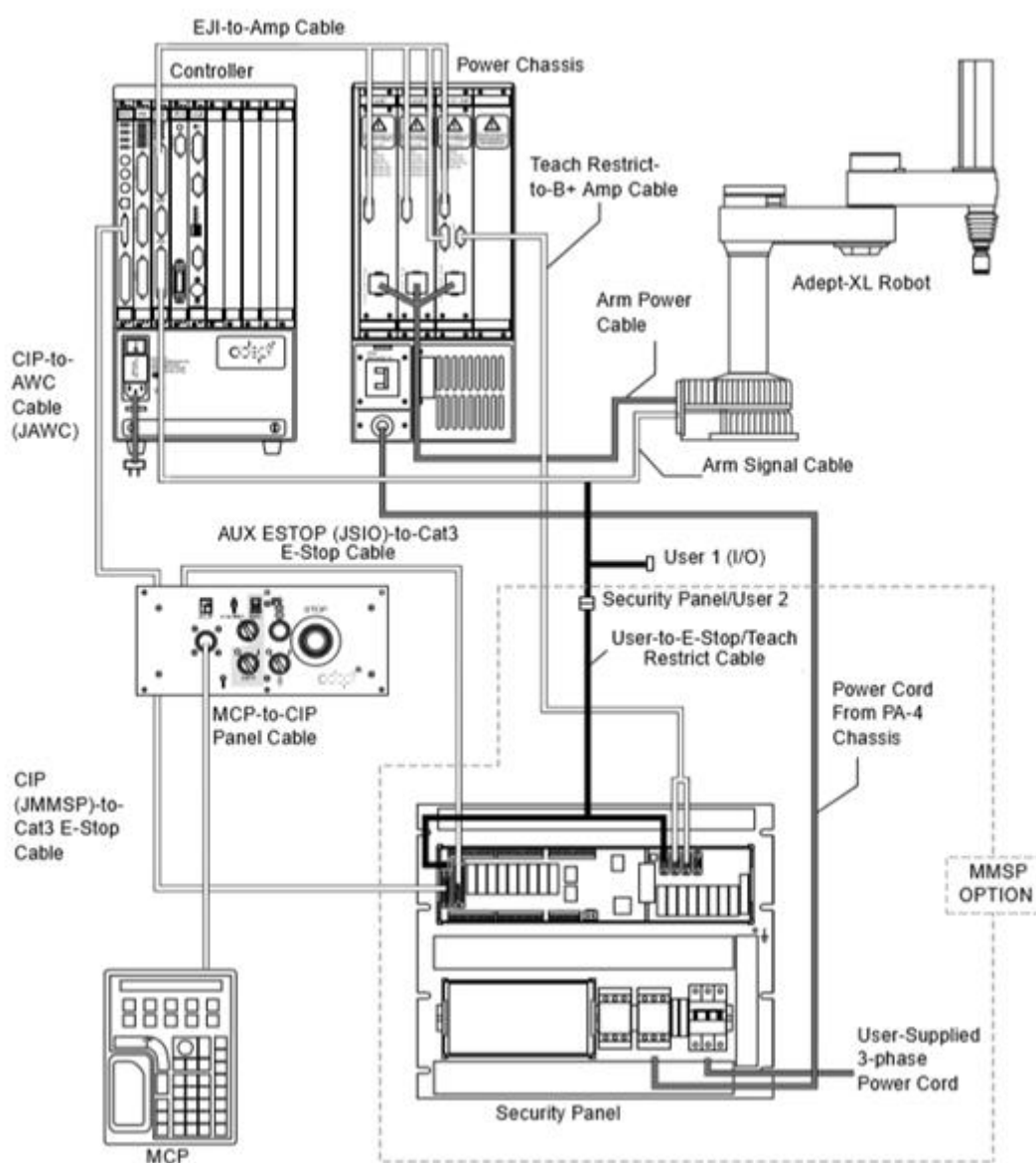


Figura 3.6.- Esquema básico con panel de seguridad de control Adept Three XL (Fuente: www.adept.es, handbook installation).

Los elementos que se van a interconectar son:

- Controlador, que deberá contener las siguientes tarjetas:
 - AWC: indica prueba de diagnóstico, control de potencia y estado de comunicación. Es el módulo de control, al cual le llegan los mandos que controlan el robot y desde el cuál se tiene que realizar la programación.
 - EJI: establece la comunicación entre el controlador y el chasis de potencia. El módulo EJI es el que manda la orden de movimiento al robot a través de los amplificadores, además está conectado al motor y reconoce la posición que está el motor por su comunicación con los sensores situados en el brazo robot.
- Al módulo AWC y al panel de seguridad y al mando (MCP), se intercala la unidad de control (denominada CIP), desde el cual se puede seleccionar el modo manual y automático, siendo el modo automático para ejecutar los programas que controlan el mecanismo con la velocidad que puede alcanzar es la máxima velocidad del robot, y el modo manual permite controlar con el mando de control (MCP) a una velocidad limitada máxima de 250mm/s. El CIP contará con botón de parada de emergencia, ya que la seguridad es lo primero y así tener más sitios donde poder parar el robot en caso de fallo.
- Panel de seguridad: incluye la fuente de alimentación de 24 voltios de continua, un conjunto de relés de seguridad, fusibles de protección de potencia y 2 contactores como seguridad que establece la alimentación del chasis de potencia. Sus funciones son:
 - Verifica las fallas en el sistema de seguridad antes del encendido en modo Manual
 - Eliminar la potencia del robot si los sensores en el robot detectan una velocidad y/o aceleración excesiva mientras el robot está en modo manual.
 - Enclavar con circuitos de seguridad de Categoría B en el controlador Adept MV
 - Indicar al controlador Adept MV la fuente de las condiciones de parada de emergencia
 - Su función es el de ser la interfaz entre la programación y el robot.
- Chasis de potencia, que incluirá los siguientes módulos:
 - A AMP: es el amplificador que va al robot para los dos motores grandes que lo componen, por lo que tendremos dos módulos como este. Uno será para mover el motor de la base (J1) y otro para el intermedio del brazo(J2).
 - B+ AMP: es un módulo de doble canal, ya que controla dos motores del robot, los dos de la punta (J3 y J4), que hacen girar, subir y bajar la punta del robot.

A continuación, se muestra una imagen en dónde se pueden ver el cableado de interconexión entre los distintos elementos, se puede apreciar que los cables y conectores ya estaban preparados:



Figura 3.7.- Montaje y cableado realizado para las pruebas del esquema básico 1 (Fuente: propia).

En este punto, la falta en la documentación técnica relativa a la asignación más concreta de las conexiones de cada uno de los terminales hubiera sido de gran utilidad, aunque es lógico no disponer de dicha información en sistemas propietarios. En la siguiente imagen se pueden ver en más detalle las conexiones del controlador y del chasis de potencia:



Figura 3.8.- Conexiones a la parte electrónica de control del Adept Three XL (Fuente: propia).

3.3.3. Esquema básico 2

La siguiente prueba consistió en eliminar el panel de seguridad para evitar cualquier interferencia que pudiera provocar que no realizará movimientos, para ello se sigue las indicaciones básicas de montaje de los manuales.

A continuación, se muestra el esquema de conexionado básico de los elementos entre el controlador, el chasis de potencia, el brazo robot y el panel de control.

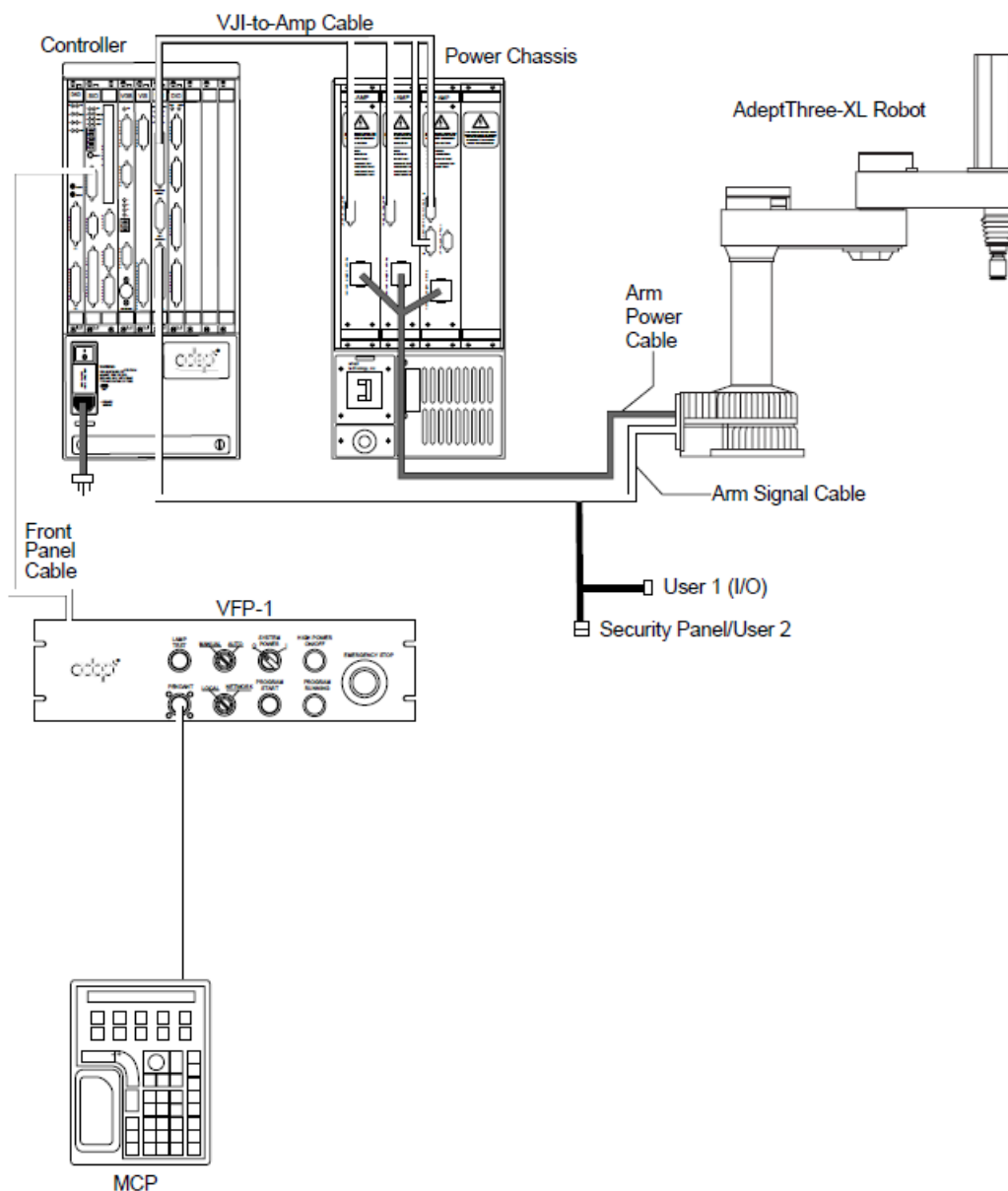


Figura 3.9.- Esquema básico sin panel de seguridad de control Adept Three XL (Fuente: www.adept.es, handbook installation).

3.4. Proceso seguido en las pruebas realizadas

Se han seguido los siguientes pasos, durante las pruebas:

1. Una vez realizadas las comprobaciones visuales y localización de todos los elementos.
2. Comprobar de nuevo las articulaciones, que no estuviesen engarrotados los motores.
3. Conexión de todos los elementos, utilizando los cables prefabricados. Comprobando que el conexionado era más sencillo al eliminar elementos que no se iban a conectar.
4. Comprobaciones de seguridad, tanto eléctrica como mecánica, comprobando de forma particular la zona de trabajo del brazo robot, para evitar el peligro sobre los usuarios que estaban realizando las pruebas, ya sea por golpe directo como por el arrojado de elementos que pudieran ser provocados por los movimientos del brazo robot.
5. Alimentar controlador.
6. Alimentar el chasis de potencia.
7. Realización de pruebas en modo manual desde el panel de control.

3.5. Conclusiones de las pruebas realizadas

Todas las pruebas dieron un resultado negativo, sin posibilidad de establecer comunicación y por lo tanto, movimiento en el brazo robot, inicialmente se pensó, en la posibilidad que estuviera actuando algún sistema de seguridad y ello provocara que no hubiera movimiento, pero el principal problema, es que el controlador no establecía comunicación y a partir de ahí nada funcionaba.

Por ello, los ledes de las tarjeta y módulos indicaban un fallo de comunicación y de seguridad, después de mucho probar, mirar los circuitos para intentar solucionar el problema y no hallar un resultado favorable decidimos hacer una instalación más simple, sin el panel de seguridad y así comprobar si podía venir de ahí los errores, pero el error continuaba.

Tras intentar contactar con el servicio técnico de Adept, se averiguó que la marca había sido adquirida por la multinacional Omron, por consiguiente, se contactó con el servicio técnico de Omron a través de los formularios de contacto sin obtener una respuesta satisfactoria, en parte porque ya tenían sus propios equipos que sustituyen a los modelos de Adept.

En consecuencia, consultando las características de los equipos disponibles de Omron se llega a que el equipo equivalente en la nueva designación en Omron es: R6YXG600 Series Scara Robots.

El nuevo modelo se ha actualizado la controladora y el chasis de potencia por lo que es incompatible con los equipos de descatalogados, además de una actualización de software de comunicación. Respecto al lenguaje de programación mantienen el V+. En la siguiente figura se muestra el ejemplo del nuevo equipo con una captura del actual software que utiliza para su programación, con la posibilidad de simulación en 3D de los brazos robóticos de Omron.



Automation Control Environment (ACE)

R6Y/XG/X/XC-series Scara Robots Datasheet

Figura 3.10.- Alternativa comercial actual al robot (Fuente: www.omron.es).

Por lo tanto, el equipo disponible en el laboratorio estaba descatalogado, lo que hacía difícil acceder a mayor documentación, o sustitución de elementos para su puesta en funcionamiento.

En conclusión, se ha decidido el realizar un estudio de los dispositivos utilizado en las articulaciones para su control. Por lo tanto, en el próximo apartado se verán los dispositivos de control elegidos y los criterios seguidos para su selección.

4. Estudio elementos de control

4.1. Introducción

Para realizar el estudio de los elementos de control de las articulaciones del robot, hay que entrar más en detalle en los elementos: sensores, actuadores y transmisiones, de que dispone el brazo robot Adept Three XL. Realizando lo que se conoce como ingeniería inversa, para deducir las posibilidades de puesta en marcha sustituyendo los equipos electrónicos del controlador y chasis de potencia. Así pues, se realiza el desmontaje de todas las partes accesibles de cada una de las articulaciones del brazo robot, siguiendo las pautas de seguridad para evitar golpes, debido a la dificultad del tamaño y peso de cada una de las partes del brazo robot.



Figura 4.1.- Servomotores Adept Three XL (Fuente: propia).

<p>United States Patent [19] Carlisle et al.</p> <p>[54] DIRECT DRIVE ROBOTIC SYSTEM</p> <p>[75] Inventors: Brian B. Carlisle, Palo Alto; Carl R. Wilman, Dublin; Donald R. Allen, Menlo Park; John W. Meadows, Los Alamos Hills, all of Calif.</p> <p>[73] Assignee: Adept Technology, Inc., San Jose, Calif.</p> <p>[21] Appl. No.: 694,385</p> <p>[22] Filed: Jun. 24, 1985</p> <p>[52] Int. Cl. H02K 18/00</p> <p>[51] U.S. Cl. 302/114; 301/71; 301/71; 301/72; 301/75</p> <p>[58] Field of Search: 414/744 R-C; 414/7; 301/9; 18, 21, 23, 34, 25, 29; 74/96; 216.3</p> <p>[56] References Cited</p> <p>U.S. PATENT DOCUMENTS</p> <p>3,046,801 7/1962 Dohmen</p> <p>3,052,059 12/1971 Mueller et al.</p> <p>4,281,784 7/1981 Cruz et al.</p> <p>4,282,176 7/1981 Blum</p> <p>4,672,418 7/1984 Asada et al.</p> <p>4,621,151 7/1984 Chiriac et al.</p> <p>4,818,288 7/1985 Yasukawa</p> <p>4,812,151 7/1985 Maling</p> <p>4,842,131 9/1985 Steiner et al.</p> <p>4,822,282 11/1985 Corcoran</p> <p>FOREIGN PATENT DOCUMENTS</p> <p>8012217 6/1980 European Pat. Off.</p> <p>800624 12/1981 European Pat. Off.</p>	<p>[11] Patent Number: 4,702,668</p> <p>[45] Date of Patent: Oct. 27, 1987</p> <p>010282 1/1984 European Pat. Off.</p> <p>332673 2/1981 Fed. Rep. of Germany</p> <p>310168 06/1984 Fed. Rep. of Germany</p> <p>127789 2/1979 Japan</p> <p>210927 6/1976 United Kingdom</p> <p>Primary Examiner—Robert J. Spier</p> <p>Assistant Examiner—Donald W. Underwood</p> <p>Attorney, Agent, or Firm—Fitch, Hobbach, Test, Altmeyer & Horben</p> <p>ABSTRACT</p> <p>A direct drive robot which includes a pedestal having two sections which rotate around a common axis to directly drive rotation of first and second linking arms which are rotating in a plane perpendicular to the pedestal. The first inner link is preferably driven through a column directly driven by a first motor rotor, the column supporting the lower end of the link. The second outer link is driven by the second rotator direct drive motor through a simple, highly-tensioned belt and pulley arrangement. As a result of the direct drive arrangement, movement is provided about two separate parallel axes in two areas arranged perpendicular to the first axis which means the two major driving rotors of the robot. These two areas are linked together between the robot pedestal and the end effector of the robot, controlling the driving rotors at the same stabilizing pedestal, while providing rapid rotational movement around each of the two axes. The first axis is defined by the major pedestal, the second axis is defined by the junction between the inner and outer linking arms which connect the pedestal to the end effector.</p> <p>13 Claims, 13 Drawing Figures</p>	<p>U.S. Patent Oct. 27, 1987 Sheet 1 of 9 4,702,668</p> <p>FIG. 1</p> <p>FIG. 2</p>	<p>U.S. Patent Oct. 27, 1987 Sheet 2 of 9 4,702,668</p> <p>FIG. 3</p>
--	---	---	---

Figura 4.2.- Patente sobre la que se basa el diseño del Adept Three XL (Fuente: elaboración propia a partir de la patente: <https://patents.google.com/patent/US4702668A/>).

Por consiguiente, tras una tarea de investigación y búsqueda en Internet, así como la consulta de la bibliografía sobre robots manipuladores industriales, se pretende obtener la máxima información posible, para una correcta elección de los dispositivos de control. Los documentos básicos de consulta han sido los manuales de instalación, y la documentación sobre la patente

4,702,668 de octubre de 1987 sobre Direct Drive Robotic para Adept Technology Inc, que es anterior a la fabricación del brazo robot disponible.

Hay que comentar que en el equipo algunas partes no se han podido desmontar, debido a requerir herramientas específicas para manejar tanto peso con la suficiente seguridad.

4.2. Morfología del robot AdeptThree XL: articulaciones 1 y 2

4.2.1. Accionamiento

Los ejes correspondientes a las articulaciones 1 y 2 del brazo robot, son lo que se ha denominado accionamiento directo (*Direct Drive* DD), en dónde el eje del actuador se conecta directamente a la carga o articulación, sin requerir la utilización de reductor.

Este tipo nace con la necesidad de utilizar robots en aplicaciones en dónde se combina la precisión con la velocidad, por lo que se elimina los reductores que introducen una serie de efectos negativos: juego angular, rozamiento o disminución de la rigidez del accionador.

Las principales ventajas de los accionamientos directos son:

- Posicionado rápido y preciso, pues se evitan rozamientos y juego en las transmisiones y reductores.
- Aumento de las posibilidades de controlabilidad del sistema con un aumento de complejidad.
- Simplificación del sistema mecánico, pues se elimina el reductor.

El principal inconveniente que existe para el uso de este tipo de accionamiento consiste en el tipo de motor a utilizar, el cual tiene que proporcionar un par elevado (del orden de 50 a 100 veces mayor que si tuviera reductor) a bajas revoluciones (reducir la velocidad de movimiento de la articulación) manteniendo la máxima rigidez posible.

El empleo de este tipo de accionamientos directos repercute sobre la cinemática del robot, puesto que requiere de la colocación de motores pesados y voluminosos, en las articulaciones, por lo que no es factible en todas las configuraciones de robots debido a los pares que se generan, por lo que su estructura estará claramente definida por esa condición. En consecuencia, su utilización se ha centrado en los robots SCARA, cuyo diseño facilita su colocación en los ejes principales.

4.2.2. Actuador

En los brazos robots, los actuadores pueden ser: neumáticos, hidráulicos y eléctricos. En función de las características que tiene que tener los accionamientos de tipo directo, en dónde se indica que los motores a emplear deben proporcionar un par elevado a bajas revoluciones y manteniendo la máxima rigidez posible.

Los motores que cumplen estas características son:

- Motores síncronos.
- Corriente continua sin escobilla (*brushless*).
- Con imanes permanentes.

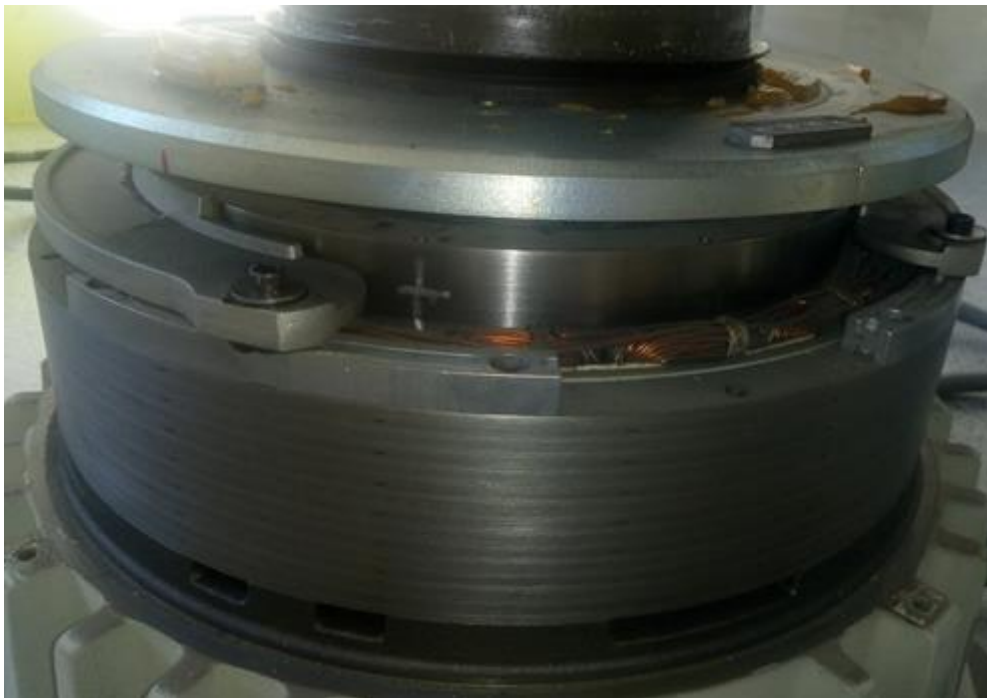


Figura 4.3.- Motor de la articulación 1 del Adept Three XL (Fuente: propia).

4.2.3. Sensores

Para que un robot realice su tarea con la adecuada precisión, velocidad e inteligencia, deberá recoger información relacionada con su estado, ello se consigue con los denominados sensores internos.

La información que la unidad de control (controlador) puede obtener sobre su estado (estructura mecánica) es fundamentalmente:

- Posición.
- Velocidad.

Existen en la industria distintos tipos, para realizar ambas medidas. En el caso particular del brazo robótico, las articulaciones 1 y 2 disponen de encoders incrementales rotatorios de la marca rsf elektronik:



Figura 4.4.- Sensores de las articulaciones 1 y 2 del Adept Three XL (Fuente: propia).

Este tipo de sensores de posición, utilizan encoder de alta resolución, del orden de 4 096 000 pulsos por revolución.

4.3. Morfología del robot AdeptThree XL: articulaciones 3 y 4

4.3.1. Accionamiento

Los elementos de accionamiento de las articulaciones 3 y 4 corresponden a servomotores, los cuales son los encargados de realizar el giro de la herramienta (articulación 4) mediante el uso de una correa desde la colocación de los servomotores a lo largo del brazo, y del desplazamiento vertical de la herramienta (articulación 3) mediante el uso de una correa que mediante un sistema sinfín produce el movimiento en el terminal del brazo robótico.

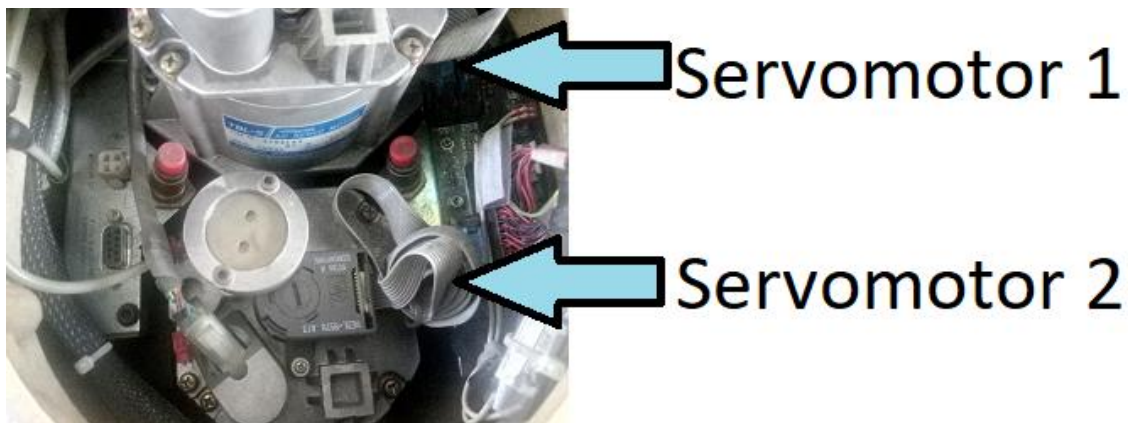


Figura 4.5.- Servomotor en el interior de la articulación (Fuente: propia).

Los servomotores son la marca Tamagawa, y actualmente se encuentran descatalogados, solo encontrándose en tiendas online de segunda mano.

4.3.2. Actuador

En el caso particular de las articulaciones 3 y 4, se trata de un motor eléctrico de corriente alterna de 87 vatios con una tensión de 243 voltios.



Figura 4.6.- Actuador servomotor articulaciones 3 y 4 del Adept Three XL (Fuente: propia).

4.3.3. Sensores

Los correspondientes servomotores se encuentran en la parte posterior, y son encoders incrementales de la marca HP, y se encuentran incorporados en el propio servomotor.



Figura 4.7.- Sensores de las articulaciones 3 y 4 del Adept Three XL (Fuente: propia).

Cada uno de los servomotores van asociados a una placa de control que se encuentran dentro de la misma articulación, y sirve de comunicación con el controlador para el envío de señales de los sensores.

4.4. Propuesta equipos para el control de las articulaciones

4.4.1. Justificación del diseño

Una vez se ha estudiado los dispositivos disponibles para el control de las 4 articulaciones del brazo robótico industrial manipulador, se deduce que hay que controlar de forma independiente cada uno de los 4 servomotores, con sus correspondientes drivers o controladores, a su vez estos se deberán comunicar entre ellos a través de un elemento maestro (controlador) y un dispositivo que actúe con el exterior, que podrá ser un controlador lógico programable (PLC), además de incorporar elementos extra de visualización del estado como una pantalla. Además, se debe incluir en el control el sistema neumático para poder quitar los frenos de cada una de las articulaciones.

Se ha realizado un estudio de las principales marcas dedicadas a la automatización industrial: Omron, Siemens, Lovato, ABB, Yaskawa, etc. Tomando como referencia las características de cada uno de los dispositivos a controlar (servomotores), disponibilidad (que permitan su control), que sean de la misma serie o universales (para utilizar mismo sistema de comunicación) y la facilidad de conseguir el precio para poder elaborar un presupuesto.

4.4.2. Solución propuesta

El sistema elegido es el denominado SIGMA 5 (porque corresponde con los servodrive asociado a dichos servomotores) de Omron (puede acceder a una descripción más detallada en: https://assets.omron.eu/downloads/brochure/en/v1/sigma-5_brochure_en.pdf), cuyas características principales para este estándar son:

- Comunicaciones en tiempo real: Sigma-5 ofrece alta velocidad de transmisión permite la transmisión en tiempo real de varios datos necesarios para el control. Dependiendo de las necesidades de las aplicaciones de varias comunicaciones de bus de campo están disponibles.

- MECHATROLINK-II: máxima. velocidad de transmisión con 10 Mbps en un ciclo de transmisión de 250 ms a 4 ms (configuración de usuario) de comunicaciones habilitar el control de alta velocidad para hasta 30 estaciones.
- MECHATROLINK-III: máxima. velocidad de transmisión con 100 Mbps en un ciclo de transmisión de 125 ms a 4 ms (configuración de usuario) de comunicaciones habilitar el control de alta velocidad para hasta 62 estaciones.
- Los ahorros de costes: de hasta 62 estaciones pueden estar conectados a una sola línea de transmisión, por lo que los costes de cableado y el tiempo se reducen considerablemente. Además, sólo se requiere un conector de señal en el controlador de host. Y, la red totalmente digital elimina la necesidad de la conversión de digital a analógico para la velocidad, referencias de par y por un generador de impulsos para generar referencias de posición.
- Controlar el movimiento de alta precisión: el MECHATROLINK SGDV SERVOPACK cuando está conectado al controlador de host proporciona no sólo par, la posición y el control de velocidad, pero el control de fase también sincronizado que requiere tecnología de control avanzado. El modo de control se puede cambiar en línea para que la máquina pueda moverse suavemente con movimientos complejos con gran eficiencia.

Gráficamente se puede apreciar en la siguiente figura el diagrama de bloques de conexionado de los servodrivs de control de cada uno de los servomotores del brazo robótico industrial manipulador:

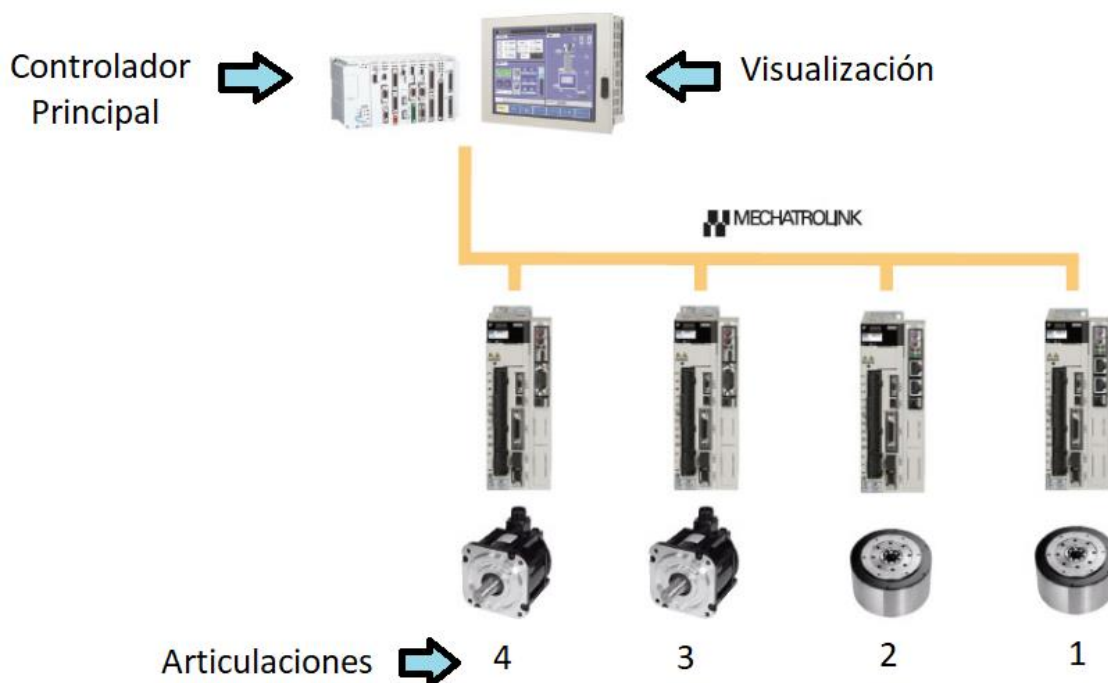


Figura 4.8.- Diagrama de bloques conexionado propuesta de control (Fuente: propia).

Como se puede apreciar en la anterior figura, el sistema de protocolo de comunicaciones indicado es el MECHATROLINK por ser el nativo o propietario de dispositivo, aunque acepta

otros protocolos de comunicaciones según se indican en las hojas de características: CANopen, EtherCAT, PROFINET, ETHERNET POWERLINK y Device Net.



Figura 4.9.- Controlador principal Trajexia (Fuente: www.omron.es).

El controlador principal se trata de una estación o controlador independiente, según el fabricante, recomienda la estación denominada Trajexia TJ2-MC64, cuyas características son:

- Control de movimiento perfecto de hasta 64 ejes.
- Soporta control de posición, velocidad y par.
- Controlador multitarea capaz de ejecutar 22 tareas simultáneas.
- Control de movimiento avanzado: levas lineales, circulares, helicoidales o de interpolación esférica, electrónicas y mediante cajas de cambios mediante simples comandos de movimiento.
- Control de servos, variadores, sistemas de visión, y E/S distribuida a través de una única red EtherCAT.
- Compatibilidad con comunicaciones EtherNet/IP.
- Herramientas de depuración avanzadas con funciones de seguimiento de datos y osciloscopio.
- Comunicación abierta: puerto serie y Ethernet/IP integrado, PROFIBUS-DP, DeviceNet y CANopen.

Además, hay que añadir un autómatas o PLC, que controle el sistema neumático y sirva de interfaz hombre a máquina. El fabricante recomienda la familia CJ1A, en la siguiente figura se puede apreciar como utilizando la comunicación Ethernet, se podría comunicar con un equipo informático y una pantalla HMI para la visualización de procesos. Teniendo, en cuenta que se debe disponer de comunicación ethernet el PLC requerirá el uso del módulo de expansión correspondiente.

Nota: en la siguiente figura se muestran muchas más opciones que las que se van a utilizar, pero puede ser de utilidad como ejemplo de un sistema completo de control y automatización de elementos externos al propio brazo robótico.

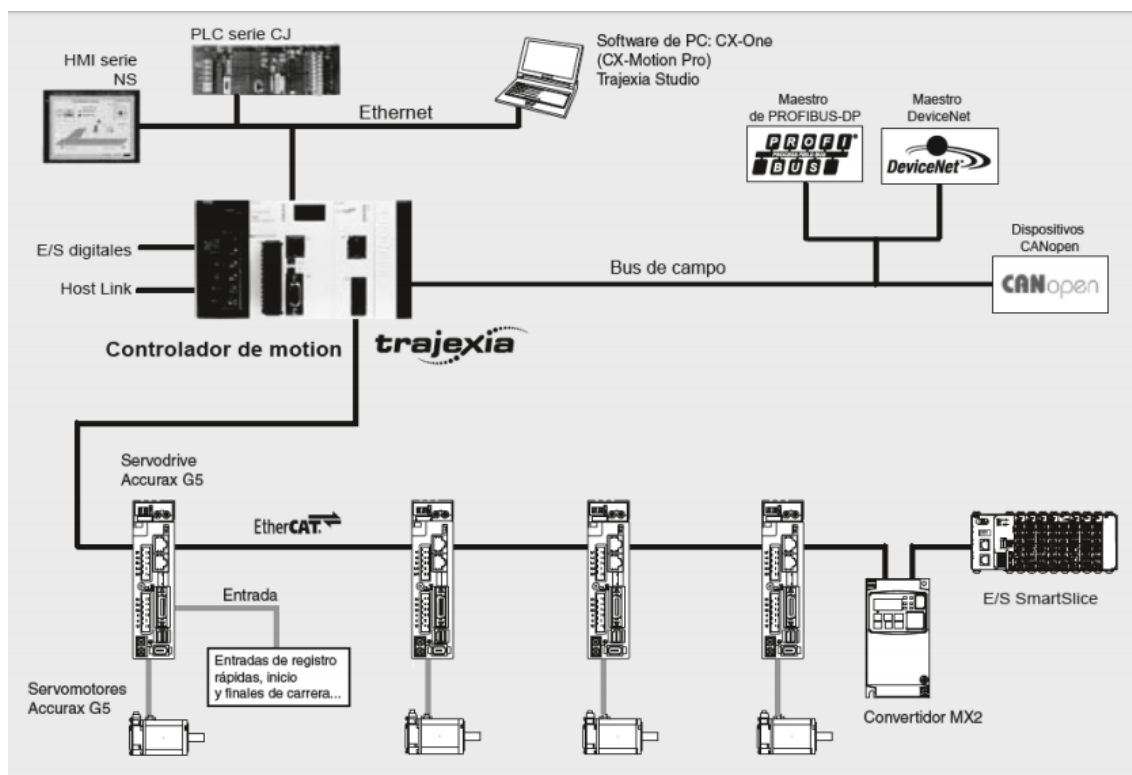


Figura 4.10.- Esquema básico de los elementos asociados al controlador Trajexia (Fuente: www.omron.es).

4.5. Control del posicionado articulaciones

4.5.1. Introducción

Puesto que habría que realizar el control completo de todas las articulaciones, para que movimiento de los ejes corresponda a la localización dentro de la zona de trabajo del posicionado de la herramienta.

Las articulaciones 1 y 2, son las encargadas del posicionado en el eje X e Y, mientras que el posicionado en Z, se realiza con la articulación 3, dejando la articulación 4 como el elemento de posición, rotacional, de la herramienta situada en el punto terminal.

En consecuencia, la señal de control de los servodrive que controlen los servomotores de las articulaciones 3 y 4, deberán enviar la información por separado, indicando los grados de colocación de la herramienta, y la distancia en el eje Z, respecto a los puntos de referencia.

Mientras el movimiento en el plano horizontal se realiza a través de las articulaciones 1 y 2 conjuntamente. Para obtener el algoritmo de posicionado se basa en la denominada como cinemática inversa de dos ejes, de tal forma que con el movimiento permitan modificar el punto de colocación de la herramienta o punto terminal.

4.5.2. Cinemática inversa

La cinemática inversa más sencilla es la que se aplica al brazo robot tipo SCARA puesto que hay que resolver los dos ángulos de las articulaciones, en este caso corresponde con las articulaciones 1 y 2 del brazo robótico Adept Three XL. En este tipo de brazos el eje Z no interviene en la cinemática inversa porque es un resultado en sí mismo, tal y como se ha

comentado en el apartado anterior. Por consiguiente, solo se tendrá en cuenta los ejes X e Y, y la longitud de las articulaciones.

Para calcular la cinemática inversa de dos grados de libertad, se conoce:

- Longitud del brazo y antebrazo.
- Eje X e Y.

A partir de dichos datos se debe calcular los ángulos del:

- Brazo (θ_1).
- Antebrazo (θ_2).

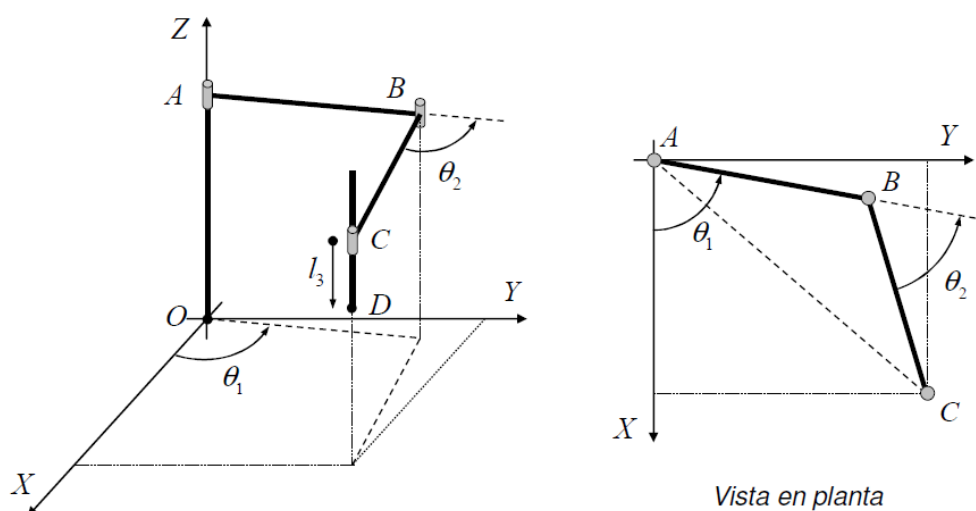


Figura 5.11.- Esquema de robot SCARA (Fuente: Resolución del problema cinemático inverso en un robot SCARA, <http://www.xixcnim.uji.es/CDActas/Documentos/ComunicacionesOrales/14-02.pdf>).

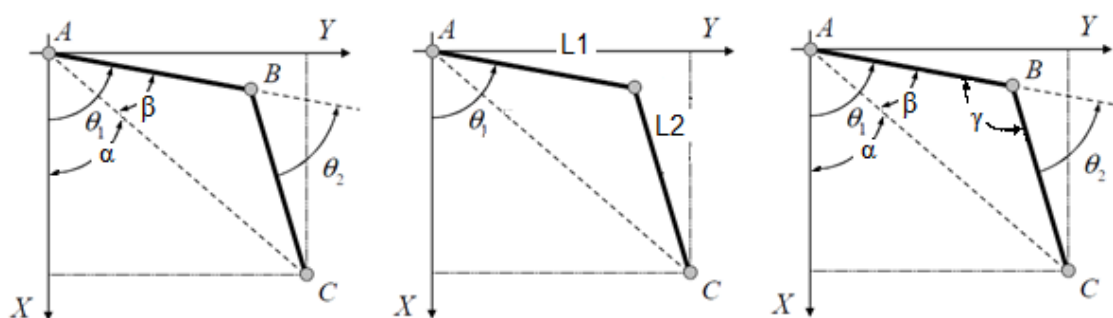


Figura 5.12.- Ángulos ejes brazo robot SCARA (Fuente: modificación de las figuras del resolución del problema cinemático inverso en un robot SCARA, <http://www.xixcnim.uji.es/CDActas/Documentos/ComunicacionesOrales/14-02.pdf>).

Para realizar el cálculo hay que basarse en la vista de planta, se puede apreciar que se trata de un triángulo formado por longitud del brazo (\overline{AB}) y la longitud del antebrazo (\overline{BC}) y su hipotenusa (\overline{AC}), además el triángulo será de tipo irregular (cuyos catetos no son iguales). La resolución de este tipo de triángulos se basa en aplicar el teorema del coseno, conociendo la longitud del brazo (L1) y la longitud del antebrazo (L2):

$$|\overrightarrow{AC}|^2 = |\overrightarrow{AB}|^2 + |\overrightarrow{BC}|^2$$

$$|\overrightarrow{AC}| = \sqrt{|\overrightarrow{AB}|^2 + |\overrightarrow{BC}|^2}$$

$$\theta_1 = \alpha + \beta$$

$$\theta_2 = 180 - \gamma$$

A partir del teorema de cosenos, y conocidos la longitud de todos los lados, se puede calcular los ángulos que determinarán la posición de cada una de las articulaciones:

$$R^2 = L1^2 + L2^2 - 2 \cdot L1 \cdot L2 \cdot \cos \beta$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{L1^2 + L2^2 - R^2}{2 \cdot L1 \cdot L2} \right)$$

$$L2^2 = L1^2 + R^2 - 2 \cdot L1 \cdot R \cdot \cos \gamma$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{L1^2 + R^2 - L2^2}{2 \cdot L1 \cdot R} \right)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{Px}{Py} \right)$$

$$R = \sqrt{Px^2 + Py^2}$$

En la siguiente figura se dispone de la información gráfica correspondiente a las anteriores ecuaciones trigonométricas:

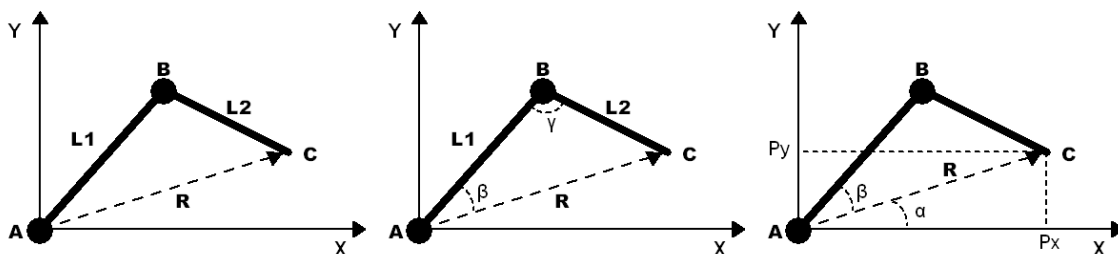


Figura 5.13.- Representación gráfica (Fuente: propia).

Los ángulos que se deben utilizar para el posicionamiento del brazo robótico son:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{Px}{Py} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{L1^2 + L2^2 - R^2}{2 \cdot L1 \cdot L2} \right)$$

$$\theta_2 = 180 - \cos^{-1} \left(\frac{L1^2 + R^2 - L2^2}{2 \cdot L1 \cdot R} \right)$$

Ahora se sustituye con los datos concretos de las dimensiones de cada uno de los eslabones del brazo (brazo y antebrazo) robótico Adept Three XL, quedando como únicas incógnitas la posición X e Y de la posición terminal (Px, Py):

$$L1 = 560mm$$

$$L2 = 506mm$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{Px}{Py}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{560^2 + 506^2 - Px^2 - Py^2}{2 \cdot 560 \cdot 506}\right)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{Px}{Py}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{569\,636 - Px^2 - Py^2}{566\,720}\right)$$

$$\theta_2 = 180 - \cos^{-1}\left(\frac{560^2 + Px^2 + Py^2 - 506^2}{2 \cdot 560 \cdot \sqrt{Px^2 + Py^2}}\right)$$

$$\theta_2 = 180 - \cos^{-1}\left(\frac{57\,564 + Px^2 + Py^2}{1\,120 \cdot \sqrt{Px^2 + Py^2}}\right)$$

Hay que tener que los límites que vendrán limitados por la zona de trabajo de este, que irá directamente relacionado con el tamaño de cada uno de los eslabones, en la siguiente figura se muestra para el caso particular del Adept Three XL, de tal forma que si se introduce una posición de X e Y fuera del rango de trabajo el brazo no se mueva o de un error.

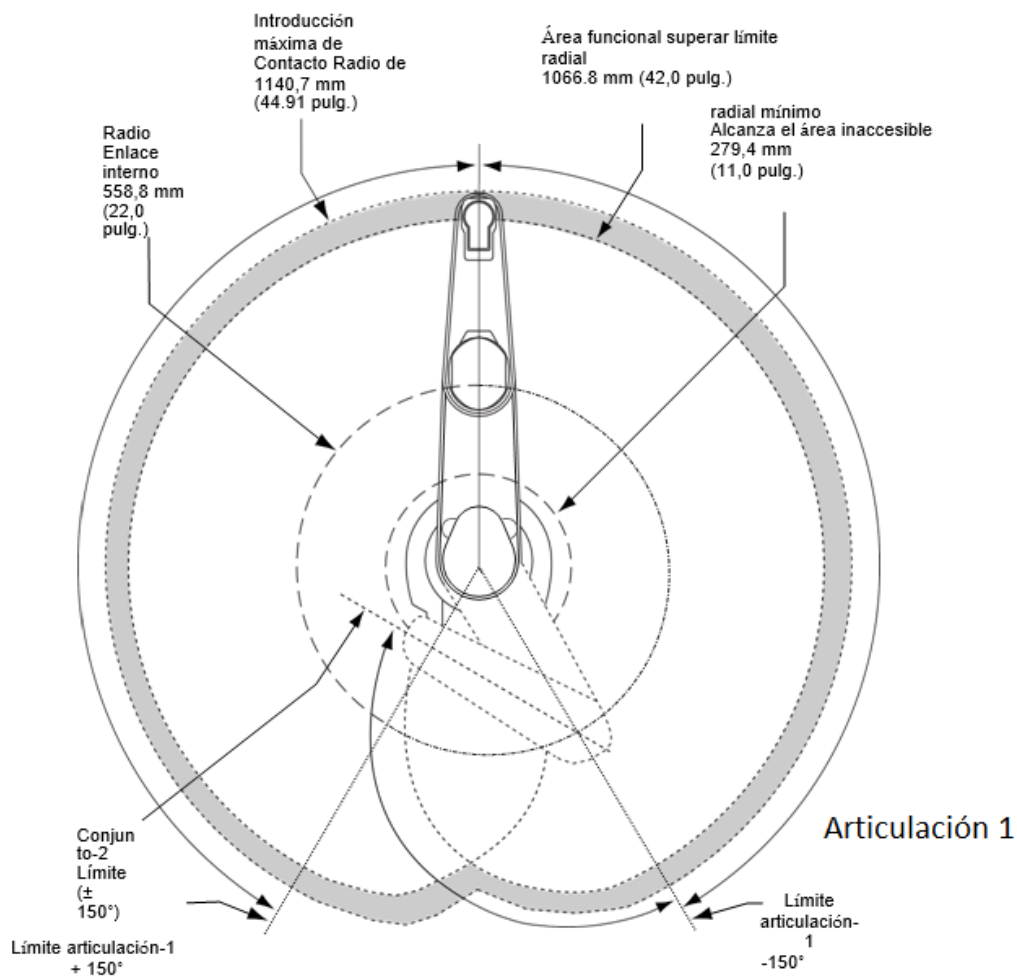


Figura 5.14.- Limitaciones zona de trabajo brazo robótico Adept Three XL (Fuente: www.adept.es, handbook installation).

4.6. Presupuesto equipos propuestos

A continuación, veremos los precios de los componentes propuestos como elementos de control del brazo robótico.

Componente/Descripción	Cantidad	Precio unitario (€)	Precio total (€)
Omron Servopack Sigma-5 A/P 400V 1.5Kw Motor Rotativo	1	1.705,04	1.705,04
Omron Servopack Sigma-5 ML-II 200V 100w Motor Rotativo	2	1.578,01	3.156,02
Omron Servopack Sigma-5 A/P 400V 3Kw Motor Rotativo	1	2.381,90	2.381,9
Omron Licencia de Software Profesional MotionWorks	1	1.521,44	1.521,44
Omron Trajexia Unidad Motion Control	1	5.483,32	5.483,32
Omron Fuente de Alimentación AC Display Status	1	267,06	267,06
Omron CPU 640 E/S 20Kpasos	1	1.033,41	1.033,41
Omron Módulo Posicionador 2 ejes ETHERCAT	1	1.287,22	1.287,22
Omron Serie NS Handy 5.7" TFT	1	1.391,20	1.391,2
Fuente de precios: www.electricalautomationnetwork.com/es	SUMA		18.226,61
	IVA	21%	3.827,59
	TOTAL		22.054,20

Al coste de los equipos, habría que añadir, el coste de instalación (montaje sobre cuadro eléctrico, con sus correspondientes protecciones eléctricas) y material fungible (canaleta, cable, tornillos, terminales, etc.), además, de la mano de obra.

Además, requerirá de las tareas de programación para adecuarse al movimiento de un brazo robot SCARA con sus correspondientes estudios de cinemático y dinámico de posicionamiento de la herramienta. Puesto, que los softwares comerciales ya tienen salvada esta circunstancia, basándose en los lenguajes de programación correspondientes, por ejemplo, el Adept Three XL utiliza V+ (otros brazos industriales utilizan más conocidos utilizan RAPID como es ABB, o KRL como el caso de KUKA). Todo ello requeriría del uso de bloques de instrucciones que emulen el movimiento en el eje tridimensional correspondiente a la zona de trabajo de la herramienta, mientras que los softwares comerciales utilizan entornos específicos que facilitan mucho las tareas de los ingenieros que diseñan los sistemas mecatrónicos de automatización industrial, siendo el equipo robótico una parte de dicho sistema.

5. Estudio para adquirir brazo robótico manipulador equivalente

5.1. Introducción

En los apartados anteriores, se ha visto las dificultades para la puesta en marchas con los equipos, la problemática de disponer de equipos descatalogados, y se ha propuesto la sustitución de los elementos de control manteniendo la estructura de brazo robótico SCARA Adept Three XL, introduciendo los nuevos elementos de control de cada una de las articulaciones.

Ahora bien, en el presente apartado se va a realizar otro estudio que consiste en seleccionar un equipo que se adecue a las necesidades iniciales, y que incluye todo el sistema del brazo robótico industrial manipulador. Para establecer la comparación entre que opciones podrían ser más interesantes de cara al empresario o usuario final, que quisiera poner en funcionamiento el brazo robótico.

5.2. Solución más equivalente en Epson

5.2.1. Brazo robótico manipulador

Investigando las distintas marcas de robot SCARA encuentro la marca Epson, la cual tiene una amplia gama de productos y te da la posibilidad de poder realizar un presupuesto. Aunque inicialmente parece que se trata de una marca comercial destinada a equipos informáticos, dispone de una sección de productos destinados a la robótica (<https://www.epson.es/robots>), siendo Epson una empresa pionera en robótica y un proveedor de servicio completo desde la fabricación hasta el proceso de ventas y asistencia, desde el lanzamiento de su primer robot en el año 1980 y manteniéndose entre los principales proveedores en el campo de la automatización. Además, desde su página web se puede acceder a gran cantidad de complementos que pueden ampliar las funcionalidades del sistema automático.

Para la elección del brazo robótico está basado en las siguientes características:

Diseño	Que se trata de un SCARA de 4 ejes
Carga	Pueda levantar hasta 20kg
Zona de trabajo	Alcance horizontal del orden a 1000mm y vertical mínimo 350mm
Potencia de inserción	200N
Opción montaje	Pedestal

De la gama de productos disponibles en más adecuado es la categoría SCARA Light, y más concretamente a la serie LS20 (<https://www.epson.es/products/robot/epson-scara-ls20-series>), de

los modelos disponibles el equipo que se adecua es el LS20-A04S, el cual se suministra con el controlador RC90, con las siguientes características:

Diseño	SCARA de 4 ejes
Carga	Nominal 10kg, máxima 20kg
Alcance horizontal	1000mm
Potencia de inserción	250N
Peso	50kg
Opción montaje	Pedestal

En la siguiente figura se puede apreciar el brazo robótico elegido, el cual mantiene la misma configuración.



Figura 5.1.- Robot SCARA Epson LS20 (Fuente: www.epson.es).

5.2.2. Controlador

Se requiere de un controlador, que sirve para interconectar el brazo robótico, como principal característica es que son de fácil montaje puesto que viene suministrado con los cables prefabricados, de tal forma que simplifica el conexionado de los dispositivos.

Características y ventajas del controlador RC90 son:

- Regulador esclavo potente y compacto.
- Sistemas de seguridad graduados (circuito de puerta de seguridad/circuito de parada de emergencia).

- Fàcil manejo gracias al consolidado entorno de desarrollo Epson RC.
- Las interfaces de comunicación incluyen un puerto Ethernet, USB, copia de USB, I/O estándar y RS-232C.
- Sistema Servo para un robot de máxima potencia.
- Control remoto.
- Sistema de diagnóstico completo.
- Sistemas de visión artificial con el software Vision Guide 7.0 de Epson.
- Comunicación ampliada debido al bus de campo, RS-232C y I/O.



Figura 5.2.- Controlador RC90 para serie LS20 (Fuente: www.epson.es).

En la siguiente figura, se puede apreciar el modo de conexión, así como el cableado necesario, en donde se utilizan los cables de potencia que sirven para el control de los actuadores de cada articulación, y de los cableados de señal que le envían al controlador la posición y velocidad de cada articulación (sensores). Así como la posibilidad de conexión al equipo informático, al panel de control manual y los puertos de comunicaciones.

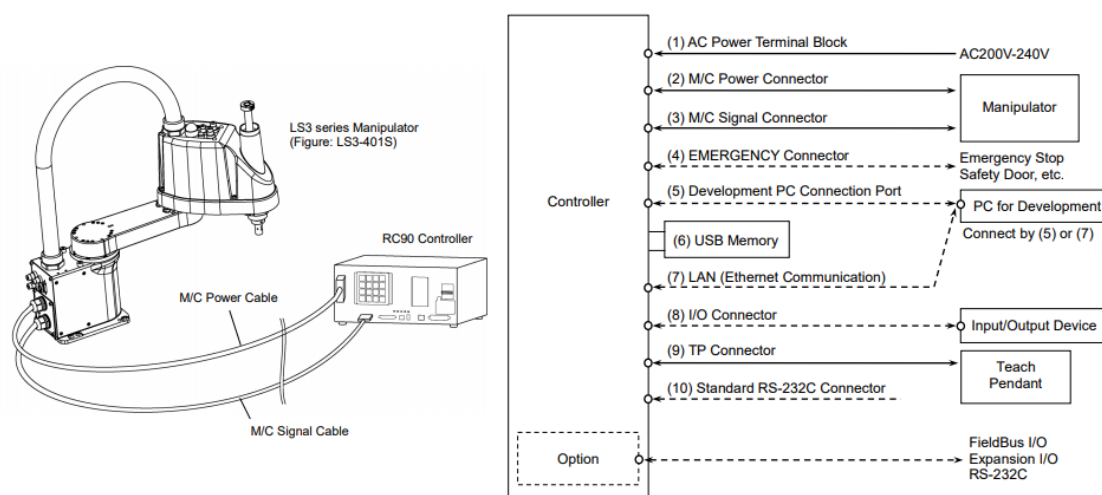


Figura 5.3.- Conexión brazo robot a controlador serie LS20 (Fuente: www.epson.es).

Las características principales de conjunto son:

- Elevador asequible para cargas pesadas: Capacidad de carga de 20kg a un precio asequible.

- Rendimiento uniforme: Ofrece una excelente precisión y exactitud de repetición.
- Tiempos de ciclo cortos: Los tiempos de ciclo pueden ser de tan solo 0,42 segundos, incluso durante un uso prolongado.
- Completamente integrado: Solución Epson completa que incluye robot, sistema de control y software.
- Versatilidad y flexibilidad: Una solución ideal para una amplia gama de aplicaciones, desde automovilísticas a farmacéuticas.

El sistema se adquiere como si fuera un kit, en dónde se incluye:

- Epson SCARA LS20-A04S.
- Controlador RC90.
- Conexión para E/S estándar.
- Conector de parada de emergencia.
- Epson RC5 con CD del programa y simulador incluido Robot y controlador.
- Epson Grasa para el eje (50 g).
- Instalación / Manual de seguridad.
- Cable de alimentación y señal (3 m).
- Juego de conectores para cables de usuario.
- TP/OP conexión bypass (ya instalada).
- Manual de usuario.

5.2.3. Software

Los robots de Epson disponen de un potente entorno de desarrollo y gestión del proyecto, denominado RC+. El cual es ideal para una programación de aplicación directa mediante el uso de una interfaz de usuario de Windows muy intuitiva, de estructura abierta y procesamiento de imagen integrado.

Además, incluye un entorno gráfico 3D que permite una simulación de tu programa robótico casi por completo y visualizar de una manera clara los movimientos del robot, para su funcionamiento requiere comunicación con un equipo real. El entorno de gestión de proyectos y de desarrollo funciona con las versiones más recientes de Windows y se comunica con el controlador RC90 a través de USB o Ethernet, proporcionando todas las herramientas necesarias para llevar a cabo una programación rápida y eficiente.

En la siguiente figura, se puede ver la pantalla del software de simulación RC+, en dónde se puede simular una maniobra de un robot SCARA determinando la zona de trabajo y visualizando el funcionamiento del brazo robótico industrial manipulador, en una tarea de movimiento de objetos de una zona a otra.

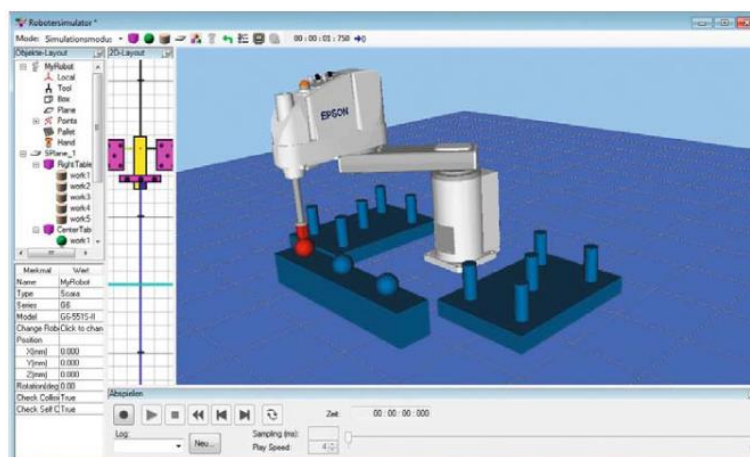


Figura 5.4.- Pantalla simulador robot SCARA Epson en RC+ (Fuente: www.arizonam.com).

Características y ventajas del software RC+ son:

- Entorno de desarrollo para aplicaciones con el lenguaje del robot de Epson SPEL+.
- Es posible ejecutar una operación paralela de varias aplicaciones RC+ 5.0 (un ordenador accede a varios controladores robóticos en paralelo).
- Sistema de gestión del proyecto paralelo para un desarrollo del proyecto rápido.
- Interfaz de usuario intuitiva.
- Procesador de imagen incluido en la interfaz.
- Conexión de interfaz versátil: Ethernet I/O, Profibus, DeviceNet, interfaz serie, TCP/IP, Handshake de I/O, disponibles de manera directa u opcional.

5.2.4. Lenguaje de programación

Los brazos robóticos de Epson utilizan el lenguaje de programación SPEL+ ([https://files.support.epson.com/far/docs/epson_spel_pl_70_language_reference_spanish_\(v73r2\).pdf](https://files.support.epson.com/far/docs/epson_spel_pl_70_language_reference_spanish_(v73r2).pdf)) basado en línea ha sido desarrollado especialmente por Epson y es tan potente como fácil de aprender.

```

Main.prg *
Function main
  Reset
  Motor On
  Weight 1
  Speed 10
  Accel 10, 10
  Integer 1

  Pallet Outside, 1, Corner1, Corner2, Corner3, 4, 3

  P11 = Pallet(1, 1, 0)
  P12 = Pallet(1, 4, 0)
  P13 = Pallet(1, 1, 4)

  Pallet 2, P11, P12, P13, 4, 5

  Go PickPoint

  For i = 1 To 20
    Select i
      Case 1
      Case 4
      Case 17
      Case 20
      Default Jump3 Here -TL2(50), Pallet(2, i) -TL2(50), Pallet(2, i)
    Send
    If i = 1 Or i = 4 Or i = 17 Or i = 20 Then Print i Else Jump3 Here -TL2(50), PickPoint -TL
  Next i
End
  
```

Figura 5.5.- Ejemplo programación (Fuente: www.arizonam.com).

En la anterior figura, se puede ver un ejemplo de código del lenguaje de programación SPEL+, muy similar a otros lenguajes utilizados para la programación de brazos robóticos.

Su rango de comandos permite programar una amplia gama de movimientos robóticos: desde sencillas aplicaciones de pick and place como un complejo control de líneas de manipulación múltiple.

Además, de los comandos de estructura del programa, puedes utilizar técnicas de subprogramación, multitareas y comandos de interrupción para escribir programas fáciles de leer, mejorar y ampliar.

La sintaxis de SPEL+ se puede transferir a una variedad de productos .Net. También dispone de una interfaz a LabVIEW. Por ejemplo, en la siguiente figura se puede ver como se podría editar un entorno de control visual con GUI Builder incluido en el software RC+ para el diseño de una pantalla SCADA.

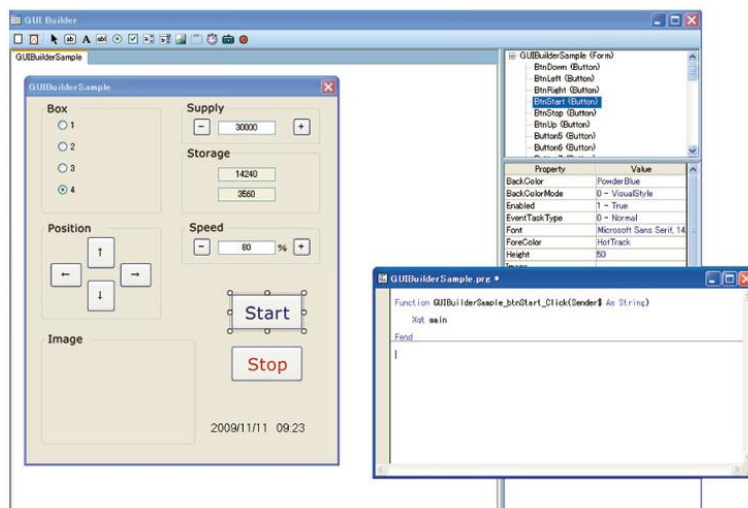


Figura 5.6.- Ejemplo diseño de entorno SCADA (Fuente: www.arizonam.com).

5.3. Presupuesto robot equivalente

A continuación, se muestra una tabla con los precios del kit completo del brazo robótico SCARA de EPSON:

Componente/Descripción	Cantidad	Precio total (€)
Epson SCARA LS20-A04S con RC90	1	18.500,00
Epson de secuencia TP2	1	900,00
Tarifa Plana de manejo	1	120,00
Software	1	0,00
	SUMA	19.520,00
	IVA 21%	4.099,20
	TOTAL	23.619,20

Fuente de precios: www.epson.es

5.4. Alternativa más económica Epson

5.4.1. Características técnicas

En la misma página de Epson nos encontramos otro robot SCARA más asequible, pero con características más limitadas, aunque se incluye en el presente trabajo, como una alternativa a la adquisición de un robot SCARA para uso didáctico en el laboratorio.

En este caso es interesante la serie T de Epson, una serie asequible que incorpora el controlador integrado en la propia estructura del brazo robótico. En particular el modelo SCARA T6-602S, con las siguientes características:

Diseño	SCARA de 4 ejes
Carga	Nominal 2kg, máxima 6kg
Alcance horizontal	600mm
Potencia de inserción	83N
Peso	22kg
Opción montaje	Pedestal

Las características principales de conjunto son:

- Gran alcance y manejo de cargas: Carga de hasta 6 kg y alcance de 600mm.
- Ahorro energético: Unidad motora sin batería y de bajo consumo.
- Tamaño reducido: Controlador integrado y cableado sencillo para ocupar poco espacio.
- Robot básico económico: Sin funcionalidades innecesarias.
- Flexibilidad: Amplio rango de movimiento gracias a los cuatro ejes.

El sistema se adquiere como si fuera un kit, en dónde se incluye:

- Epson SCARA T6-602S con controlador integrado.
- Conexión para E/S estándar, conector de parada de emergencia.
- Epson RC5 con CD del programa y simulador incluido Robot y controlador.
- Epson Grasa para el eje (50 g).
- Manual de: instalación, seguridad y usuario.
- Cable de alimentación y señal (3 m).
- Juego de conectores para cables de usuario.
- TP/OP conexión bypass (ya instalada).



Figura 5.7.- Robot SCARA Epson T6 (Fuente: www.epson.es).

En la siguiente figura, se muestran la diferencia de disponer la unidad de control integrada, como el caso de la serie T, o la disponibilidad de utilizar la unidad de control RC90:

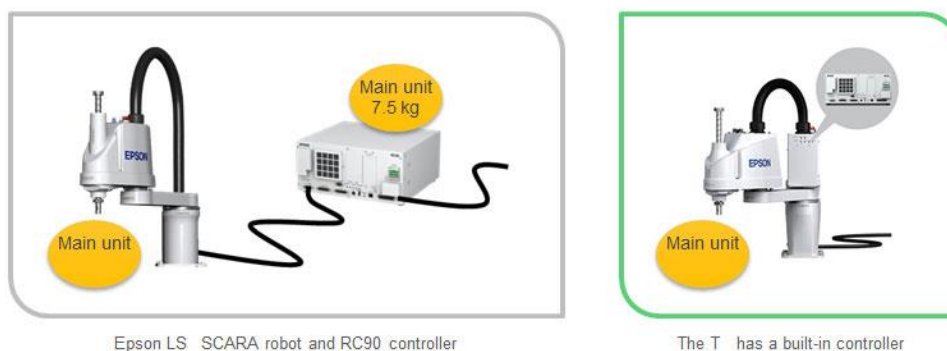


Figura 5.8.- Diferencia controlador de la serie LS a la T (Fuente: www.epson.es).

5.4.2. Presupuesto

A continuación, se muestra una tabla con los precios de la solución más económica de EPSON:

Componente/Descripción	Cantidad	Precio total (€)
Epson SCARA T6-602S con control integrado	1	9.500,00
Epson de secuencia TP2	1	900,00
Tarifa Plana de manejo	1	120,00
Software	1	0,00
Fuente de precios: www.epson.es	SUMA	10.520,00
	IVA 21%	2.209,20
	TOTAL	12.729,20

5.5. Alternativa más económica de Omron

5.5.1. Características técnicas

Omron también dispone de una línea más ligera y económica del robot tipo SCARA, al igual que Epson sus características son más limitadas en comparación al robot SCARA Adepth Three XL o su posible actualización R6Y. Aunque destaca por ser algo más rápido que el modelo de Epson y con mayor precisión, en concreto hemos elegido el Omron XGL 600, con las siguientes características:

Diseño	SCARA de 4 ejes
Carga	Nominal 4kg, máxima 5kg
Alcance horizontal	600mm
Peso	18kg
Opción montaje	Pedestal

Las características principales del brazo son:

- Gran fiabilidad (sin correas en la serie XG, sin piezas electrónicas en movimiento).
- Gran precisión y alta velocidad.
- Mantenimiento mínimo.
- Mayor rigidez.
- Mayor facilidad de uso.
- Diseño muy compacto.
- Varias opciones de conectividad.
- Funciones integradas de visión y seguimiento de la cinta transportadora.

El sistema se adquiere como si fuera un kit, en dónde se incluye:

- Epson SCARA Omron XGL600.
- Controlador de robot YRC.
- Cableado.
- Software de simulación.
- Software de programación.
- Cable de programación.



Figura 5.9.- Robot SCARA Omron XGL 600 (Fuente: www.omron.es).

En la siguiente figura, se puede apreciar el esquema de conexionado del robot con el controlador con varias opciones adicionales de ampliación.

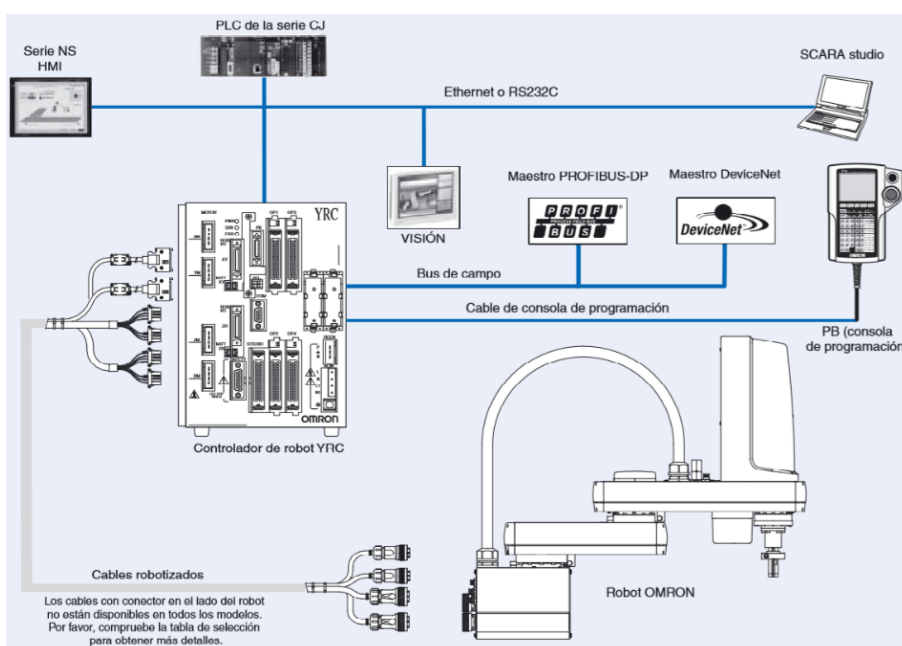


Figura 5.9.- Esquema conexión robot SCARA Omron serie XGL (Fuente: www.omron.es).

5.5.2. Software

Para la programación de Omron dispone de SCARA Studio Windows, que incluye:

- **E**dición sin conexión de todos los datos utilizados en los controladores de robot.
- Operar y monitorear robots conectados al controlador.
- Edición en línea (*online*) de todos los datos utilizados con los controladores.

- Copia de seguridad y restauración de los datos del controlador del robot.
- Conexión Ethernet a los controladores.
- Entrada de datos en formato de software de hoja de cálculo.
- Copia de seguridad sin interrupciones y restauración de la información del controlador.
- Realizar transferencia de datos entre el controlador en línea y un documento fuera de línea arrastrando y soltando.
- Ejecutar comandos en línea usando una ventana de terminal.
- Estructura de controladores y documentos en árbol similar a Windows Explorer.

Aunque Omron dispone de ACE que es una solución todo en uno de Omron Adept Technology. Es un paquete de desarrollo integrado para la implementación, incluyendo opciones de simulación, en la siguiente figura se muestra un ejemplo con un robot SCARA:

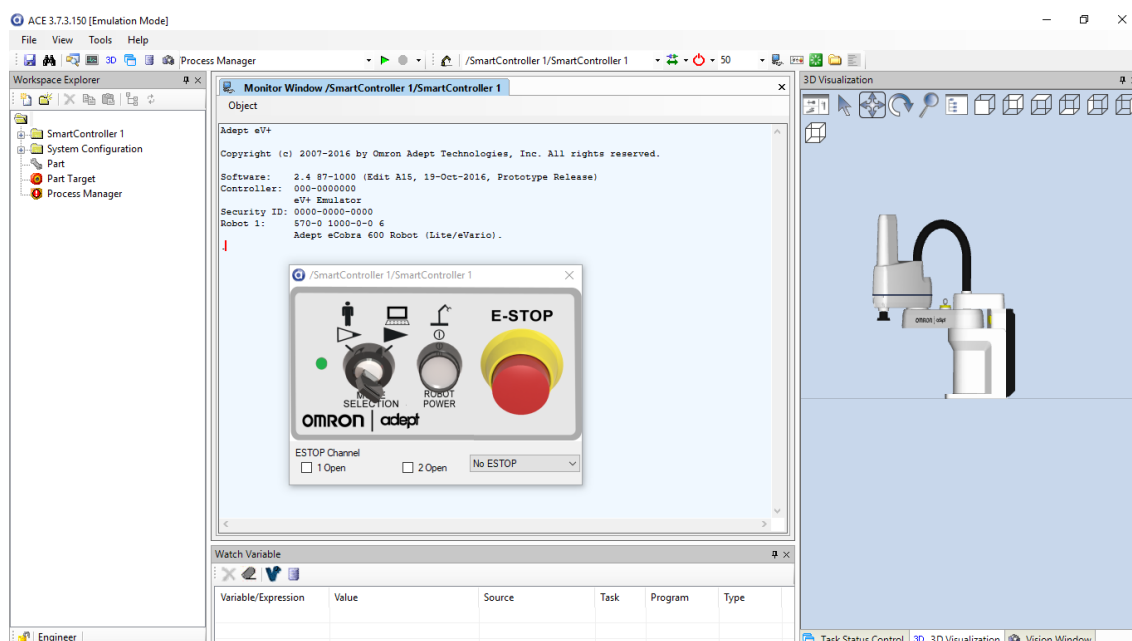


Figura 5.10.- Ejemplo software ACE de Omron (Fuente: propia, captura de pantalla).

5.5.3. Lenguaje de programación

Utiliza V + como lenguaje de programación, el cual tiene una amplia historia y se ha convertido en el lenguaje de programación de robots más poderoso, seguro y predecible disponible en la actualidad. V + es el único lenguaje que brinda una solución integrada a todas las necesidades de programación en una celda de un sistema robótico, que incluye seguridad, movimiento de robot, operaciones de visión, detección de fuerza, control de entradas y salidas. Las principales funciones son:



Figura 5.11. Logo V+ (Fuente:www.omron.es).

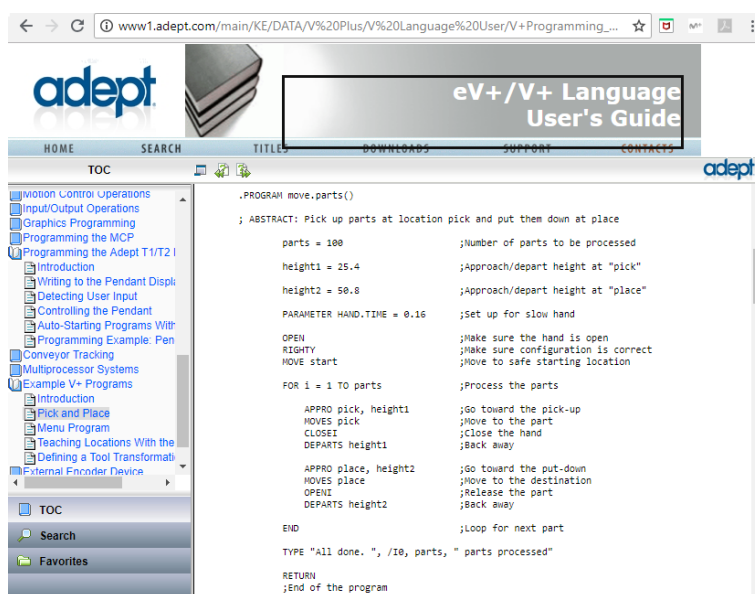
El lenguaje V+ es un lenguaje de programación textual de alto nivel, desarrollado en 1989 por Adept Technology. Es una evolución del VAL II, y parece ser que se denomina indistintamente V+ y VAL III. El lenguaje V+ proporciona una gran interacción entre el hombre y el robot. Presenta las siguientes aportaciones más relevantes:

- Inteligibilidad: Proporcionar documentación y un diseño ordenado y coherente.
- Fiabilidad: sobre todo en sistemas que deben responder a situaciones imprevistas.
- Adaptabilidad: se pueden mejorar, ampliar y modificar fácilmente.
- Portabilidad.

Así mismo, V+ es muy versátil, contando con las siguientes características:

- Rápido y alto nivel de interpretación del lenguaje en las aplicaciones.
- Multitarea del sistema a tiempo real.
- Sistema de visión integrada en el proceso en el mismo programa V+.
- Arquitectura abierta de diseño, pudiendo añadirse fácilmente nuevos periféricos, redes, etc.

Actualmente ha evolucionado hasta la denominación eV+, tal y como se indica en la siguiente figura para una aplicación de mover y colocar un objeto:



```

.PROGRAM move.parts()
; ABSTRACT: Pick up parts at location pick and put them down at place
parts = 100 ;Number of parts to be processed
height1 = 25.4 ;approach/deparr height at "pick"
height2 = 50.8 ;approach/deparr height at "place"
PARAMETER HAND.TIME = 0.16 ;Set up for slow hand
OPEN ;make sure the hand is open
RIGHTY ;make sure configuration is correct
MOVE start ;Move to safe starting location
FOR i = 1 TO parts ;Process the parts
APPRO pick, height1 ;Go toward the pick-up
MOVES pick ;Move to the part
CLOSE1 ;close the hand
DEPARTS height1 ;Back away
APPRO place, height2 ;Go toward the put-down
MOVES place ;Move to the destination
OPEN1 ;release the part
DEPARTS height2 ;Back away
END ;loop for next part
TYPE "All done. ", /i, parts, " parts processed"
RETURN ;End of the program
  
```

Figura 5.12.- Ejemplo programación V+ de aplicación pick and place (Fuente: propia, captura de pantalla web de www1.adept.com de adept document library).

5.5.4. Presupuesto

En este caso, el único referente obtenido es una promoción, en la cual enviaron un correo de promoción sobre este robot, el cual se puede apreciar en la siguiente figura:



Figura 5.10.- Oferta promoción robot SCARA Omron serie XGL (Fuente: newsletters de Omron).

En la siguiente figura se puede apreciar el controlador para SCARA que utiliza Omron para la mayoría de sus actuales brazos.



Figura 5.11.- Controlador YRC para robot SCARA Omron serie XGL (Fuente: www.omron.es).

5.6. Comparativa

En la siguiente tabla, se puede observar un resumen de las cuatro opciones propuestas:

		Adept	Epson LS20	Epson T6	Omron XGL600
Peso		266 kg	50 kg	22 kg	18 kg
Alcance máximo		1.067 mm	1.000 mm	600 mm	600 mm
Carga máxima		25 kg	20 kg	6 kg	4 kg
Inercia máxima de eje		14.660 kg·cm ²	4.500 kg* cm ²	800 kg* cm ²	500 kg* cm ²
Recorridos	Eje 1	±150°	+/-132°	+/-132°	±140°
	Eje 2	±150°	+/-152°	+/-150°	±144°
	Eje 3	356 mm	420 mm	200 mm	150 mm
	Eje 4	±270°	+360°	+360°	±360°
Velocidades	Eje 1	540 °/s	11.250 mm /s	4.180 mm /s	4.900 mm/s
	Eje 2	820 °/s	11.250 mm /s	4.180 mm /s	4.900 mm/s
	Eje 3	1.200 mm/s	2.020 mm /s	1.000 mm /s	1.100 mm/s
	Eje 4	1.955 °/s	1.400° /s	1.800° /s	1.020° /s
Repetibilidad	Eje 1 y 2	± 0,038 mm	+0,025 mm	+/- 0,04 mm	+0,01 mm
	Eje 3	± 0,038 mm	+0,01 mm	+/- 0,02 mm	+0,01 mm
	Eje 4	± 0,05 °	+0,01 °	+/- 0,02 °	+0,004 °
Precio neto (sin I.V.A.) Solo brazo robótico	(En el Adept los componentes)	18.226,61 €	18.500 €	9.500 €	11.990 €

Se puede apreciar que sería más conveniente en este caso la adquisición de un nuevo robot de similares características, ya que la diferencia de precio no es muy alta y se tendrían todos los componentes nuevos y preparados para su funcionamiento y programación, por lo que la pequeña diferencia de precio es inapreciable con las ventajas de que todo sea nuevo y actualizado.

También se puede apreciar que, si no hace falta un robot SCARA con unos requisitos de fuerza, tamaño y robustez se puede optar por la opción más económica, ya que son casi 10.000 € menos que la siguiente opción, disponiendo de los componentes nuevos y actualizados, con sus correspondientes softwares, lo que aseguraría su puesta en marcha, además de la mayor rapidez del montaje, siendo una buena opción como material didáctico, ya que mantiene las características de un robot industrial manipulador, aunque a menor escala, siendo utilizado para emular situaciones reales, puesto que se podría fácilmente utilizar las mismas condiciones de diseño y programación que una hipotética situación real.

6. Conclusión

Entre las principales conclusiones se pueden deducir, la dificultad que presenta los equipos de los brazos robóticos industriales de carácter propietario, en dónde, las posibilidades de cambio o manipulación están muy limitados, delimitándose a la instalación de los propios equipos y al software disponible para tal fin.

A su vez, la información disponible del brazo robot está encaminada al instalador, que prepare, conexiones los equipos tal y como se muestran, y si hay cualquier incidencia, hay que contactar con el servicio técnico, o al ingeniero que diseñe el proceso de automatización integrando el funcionamiento del brazo robótico dentro de la cadena de producción.

En el proceso de búsqueda de información se ha encontrado la dificultad añadida que el equipo estaba obsoleto y que recientemente había sido absorbido por otra empresa que había sacado al mercado nuevos equipos con características similares. Por ejemplo, se ofreció la descarga a un software que disponía de la versión equivalente pero no era del mismo equipo disponible, por lo tanto, no establecía comunicación a través del ordenador.

Para solventar el problema, se estudió la viabilidad del acceso directo a los motores de cada una de las articulaciones y a los sensores (encoders) disponibles, para realizar un control de cada una de las articulaciones mediante un servodrive de cada motor (actuador o servomotor) de forma independiente, estableciendo el control de posicionado mediante un dispositivo lógico programable (PLC). En esta etapa, la dificultad de no disponer de los esquemas (cableado) interno de la máquina y de las características particulares de los motores, dificultó la toma de datos, además de que las piezas del propio robot tienen un peso considerable imposible de mover sin elementos externos (grúa, traspale, etc.).

Finalmente, en el trabajo se propone un caso hipotético de sistema de control de dichos motores, puesto que requiere de la eliminación de toda la circuitería electrónica disponible, tanto externa como interna del propio brazo robótico. En este punto hay que comentar que hubiera sido interesante el haber realizado pruebas con los servos-mecanismos aplicados directamente con los motores de las articulaciones del brazo robótico, pero por un lado el coste podría ser considerable, y el propietario del brazo robótico ha tendido que llevárselo, por lo que ya no estaba disponible para su acceso en los laboratorios de la universidad, además de que una de las conclusiones es que el coste final podría ser mayor que el adquirir un nuevo equipo.

A pesar de todas las dificultades presentadas, me ha servido para darme cuenta las dificultades que presentaría un montaje de estas características en una empresa real, y de la importancia del acceso a la documentación técnica, y por lo tanto, el uso de equipos comerciales propietarios que facilitan la tarea de puesta en marcha, mediante el suministro de sus propias herramientas, se puede convertir en un inconveniente si no se tiene acceso a la información técnica para tareas que requieran modificaciones importantes del hardware o tareas de reparación, cosa que en parte es normal por los recursos que el propietario haya podido utilizar para su diseño y montaje, por lo tanto habrá tareas de reparación que requerirán del acceso del servicio técnico oficial.

Además, viendo cómo ha evolucionado el mercado en los 20 años que tiene el robot, se saca la conclusión de que es más rentable y segura la nueva adquisición de un nuevo robot que la

actualización del antiguo. Porque al presupuesto de los componentes hay que añadir el cableado y la instalación de cuadros y sistemas de seguridad que los brazos más modernos ya vienen incluidos, ocupan mucho menos espacio y vienen pensados para un montaje muy sencillo, como se ha podido ver en las opciones propuestos que van en kits con todos los elementos, y con la interconexión mediante el cableado que también viene suministrado, reduciendo en gran medida el tiempo de montaje. Además, de que ofrecen la posibilidad de fácil integración con el resto de los sistemas que formará parte del sistema de automatización de planta.

Se ha realizado también una comparativa de varios equipos nuevos, con sus particularidades para obtener distintas opciones.

A parte de todo lo comentado anteriormente, también podemos apreciar la gran diferencia de peso, la cual es también importante por la posibilidad de tener que cambiar el robot de lugar, ya sea por temas de espacio o cambio de trabajo.

En conclusión, no valdría la pena modernizar los equipos del Adept Three XL, sale mucho más rentable la adquisición de un nuevo equipo SCARA.

7. Bibliografía y referencias

Bibliografía sobre robótica:

- [1] Robótica industrial: fundamentos y aplicaciones. Arantxa Renteria y María Rivas. Mc. Graw Hill, 2000.
- [2] Fundamentos de robótica. Antonio Barrientos, Luis Felipe Peñín, Carlos Balaguer y Rafael Aracil. Mc. Graw Hill, 2ª edición, 2009.
- [3] Robótica: control de robots manipuladores, Fernando Reyes Cortés. Marcombo/Alfaomega, 2011.
- [4] Robótica: manipuladores y robots móviles. Aníbal Ollero Baturone. Marcombo, 2007.

Bibliografía sobre sistemas mecatrónicos:

- [5] Mecatrónica: control y automatización. Fernando Reyes Cortés, Jaime Cid Monjaraz, Emilio Vargas Sotol. Marcombo/Alfaomega, 2013.
- [6] Mecatrónica: sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. W. Bolton. Marcombo/Alfaomega, 2010.

Enlaces fabricantes de robots SCARA:

- [7] www.epson.es
- [8] www.adept.es
- [9] www.omron.es

Enlaces fabricantes/distribuidores de sistemas de automatización:

- [10] www.arizonam.com

Índice de figuras

Figura 1.1.- Robot SCARA (www.adept.com cortesía OMROM).....	7
Figura 1.2.- Brazo robótico industrial manipulador (Fuente: propia).....	8
Figura 2.1.- Tipos de articulaciones (Fuente: https://coparoman.blogspot.com/2013/05/12-grados-de-libertad-de-un-robot.html).....	10
Figura 2.2.- Tipología de brazos robots industriales manipuladores (Fuente: https://charlesandrew.wordpress.com/2010/04/13/articulaciones/).....	11
Figura 2.3.- Número de articulaciones brazo robot Adept Three XL (Fuente: www.adept.es, handbook installation).....	12
Figura 2.4.- Movimiento y zona de trabajo según articulaciones 1 y 2 (Fuente: www.adept.es, handbook installation).....	13
Figura 2.5.- Movimiento y zona de trabajo articulaciones 3 y 4 (Fuente: www.adept.es, handbook installation).....	14
Figura 2.6.- Elementos básicos del sistema robótico (Fuente: www.adept.es, handbook installation).	16
Figura 2.8.- Controlador y chasis de potencia para robot Adept Three XL (Fuente: propia).	17
Figura 2.9.- Controlador (Fuente: propia).	17
Figura 2.10.- Chasis de potencia (Fuente: propia).....	17
Figura 2.11.- Cuadro eléctrico de control del panel de seguridad (Fuente: propia).....	18
Figura 2.12.- Placa de características del chasis de potencia (Fuente: propia).	18
Figura 2.13.- Placa de características del controlador (Fuente: propia).....	19
Figura 3.1.- Anclaje y cobertura para evitar el peligro a los usuarios que manipulen el robot (Fuente: www.adept.es, handbook installation. Fuente fotografía: propia).	21
Figura 3.2.- Sistema de seguridad y bloqueo de las articulaciones (Fuente: www.adept.es, handbook installation. Fuente fotografía: propia).	22
Figura 3.3.- Electroválvulas neumáticas de frenado de las articulaciones (Fuente: propia).	22
Figura 3.4.- Mando de control manual, MCP (Fuente: propia).	23
Figura 3.5.- Sistema de control manual robot Adept Three XL (Fuente: www.adept.es, handbook installation).....	23
Figura 3.6.- Esquema básico con panel de seguridad de control Adept Three XL (Fuente: www.adept.es, handbook installation).	24
Figura 3.7.- Montaje y cableado realizado para las pruebas del esquema básico 1 (Fuente: propia).	26
Figura 3.8.- Conexiones a la parte electrónica de control del Adept Three XL (Fuente: propia).	26
Figura 3.9.- Esquema básico sin panel de seguridad de control Adept Three XL (Fuente: www.adept.es, handbook installation).	27
Figura 3.10.- Alternativa comercial actual al robot (Fuente: www.omron.es).	29
Figura 4.1.- Servomotores Adept Three XL (Fuente: propia).	30
Figura 4.2.- Patente sobre la que se basa el diseño del Adept Three XL (Fuente: elaboración propia a partir de la patente: https://patents.google.com/patent/US4702668A/).....	30
Figura 4.3.- Motor de la articulación 1 del Adept Three XL (Fuente: propia).	32
Figura 4.4.- Sensores de las articulaciones 1 y 2 del Adept Three XL (Fuente: propia).	32
Figura 4.5.- Servomotor en el interior de la articulación (Fuente: propia).	33
Figura 4.6.- Actuador servomotor articulaciones 3 y 4 del Adept Three XL (Fuente: propia).....	33
Figura 4.7.- Sensores de las articulaciones 3 y 4 del Adept Three XL (Fuente: propia).	34
Figura 4.8.- Diagrama de bloques conexionado propuesta de control (Fuente: propia).	35
Figura 4.9.- Controlador principal Trajexia (Fuente: www.omron.es).	36
Figura 4.10.- Esquema básico de los elementos asociados al controlador Trajexia (Fuente: www.omron.es).	37

Figura 5.11.- Esquema de robot SCARA (Fuente: Resolución del problema cinemático inverso en un robot SCARA, http://www.xixcnim.uji.es/CDActas/Documentos/ComunicacionesOrales/14-02.pdf).	38
Figura 5.12.- Ángulos ejes brazo robot SCARA (Fuente: modificación de las figuras del resolución del problema cinemático inverso en un robot SCARA, http://www.xixcnim.uji.es/CDActas/Documentos/ComunicacionesOrales/14-02.pdf).	38
Figura 5.13.- Representación gráfica (Fuente: propia).	39
Figura 5.14.- Limitaciones zona de trabajo brazo robótico Adept Three XL (Fuente: www.adept.es , handbook installation).	40
Figura 5.1.- Robot SCARA Epson LS20 (Fuente: www.epson.es).	43
Figura 5.2.- Controlador RC90 para serie LS20 (Fuente: www.epson.es).	44
Figura 5.3.- Conexión brazo robot a controlador serie LS20 (Fuente: www.epson.es).	44
Figura 5.4.- Pantalla simulador robot SCARA Epson en RC+ (Fuente: www.arizonam.com).	46
Figura 5.5.- Ejemplo programación (Fuente: www.arizonam.com).	46
Figura 5.6.- Ejemplo diseño de entorno SCADA (Fuente: www.arizonam.com).	47
Figura 5.7.- Robot SCARA Epson T6 (Fuente: www.epson.es).	49
Figura 5.8.- Diferencia controlador de la serie LS a la T (Fuente: www.epson.es).	49
Figura 5.9.- Robot SCARA Omron XGL 600 (Fuente: www.omron.es).	51
Figura 5.9.- Esquema conexión robot SCARA Omron serie XGL (Fuente: www.omron.es).	51
Figura 5.10.- Ejemplo software ACE de Omron (Fuente: propia, captura de pantalla).	52
Figura 5.11. Logo V+ (Fuente: www.omron.es).	53
Figura 5.12.- Ejemplo programación V+ de aplicación pick and place (Fuente: propia, captura de pantalla web de www1.adept.com de adept document library).	53
Figura 5.10.- Oferta promoción robot SCARA Omron serie XGL (Fuente: newsletters de Omron).	54
Figura 5.11.- Controlador YRC para robot SCARA Omron serie XGL (Fuente: www.omron.es).	54

Anexos

Anexo I: Manuales del brazo robótico Adept Three XL, de: instalación, usuario, software.

Anexo II: Manuales encoder rotativo utilizado en los servomotores del Adept Three XL

Anexo III: Patente *direct drive robotic system* de Adept technology Inc.

Anexo IV: Manuales de los servodrives y elementos de control propuestos para el control de servomotores del Adept three XL.

Anexo V: Manuales de los brazos robóticos industriales manipuladores de tipología SCARA de distribuidor Epson.

Anexo VI: Manuales de los brazos robóticos industriales manipuladores de tipología SCARA de distribuidor Omron.