



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Título: _____

**Desarrollo de una aplicación de
demostración pick&place con
un robot industrial**

Máster en Automática e Informática Industrial

Autor: León Gil, Javier

Tutor: Mellado Arteché, Martín

Valencia, enero 2017

Agradecimientos

A mis padres, por todo su tiempo y esfuerzo invertido en mí para que yo haya llegado a donde estoy ahora. Por todo su apoyo en cada proceso de mi vida y sus consejos sobre cómo afrontar las situaciones a las que me he enfrentado. Por su dedicación y educación, que ha hecho que sea la persona que soy hoy en día.

A mi hermano, porque desde nuestro inicio nuestros caminos han transcurrido paralelos el uno del otro y aunque por un tiempo se hayan separado, sabemos que más adelante siempre volverá a unirse. Porque nuestra complicidad y entendimiento, aunque en muchas ocasiones seamos polos opuestos, siempre sale en los momentos más indicados.

A mis abuelos, mis tíos/as y primos/as, por ser mis segundos padres y hermanos, porque de una manera u otra todos ustedes me han educado y enseñado en el proceso de la vida y han aportado en mí lo mejor de cada uno. Porque la familia que lucha unida permanece unida, y nosotros lo hemos hecho y así continuaremos. Mención especial a mi tía Bea, sé que allá donde estés estarás orgullosa de este día y probablemente la más alegre del mundo. Tú me demostraste que se debe luchar hasta el final por conseguir lo que se quiere, por encima de todas las cosas, y es algo que llevaré siempre en mí.

A Alba, porque le das sentido a las cosas, porque sin ti no sería la persona que soy, porque sé que tanto en la distancia como en la cercanía te tengo a mi lado para lo que necesite, por tu apoyo incondicional en las adversidades y tu compañía en las alegrías, por construir tu camino junto al mío.

A mis amigos, que por fortuna son muchos por lo que no podré nombrarlos a todos. Edu, Zeben, Jorge Y., Jesús,... ustedes son la familia que uno puede elegir y cada uno sabe que los considero como tales. Me dan ese apoyo y punto de vista que en ocasiones puede faltar y que es esencial para completarme como persona. El hecho de estar a mi lado en cada momento, incluso estando lejos en algunas ocasiones, es lo que hace que me sienta orgulloso de tenerlos cerca.

A mi tutor Martín, por la oportunidad de haber podido desarrollar este trabajo y por su apoyo y comprensión en todo momento. A todo el personal del AI2 que me ha ayudado en momentos puntuales: Francesc, Carlos Blanes, Pablo Beltrán, Miguel,... A todos los chicos del laboratorio mixto, por todas las horas de tertulia y trabajo conjunto y por ofrecer esa solución cuando todo parece atascado. Especialmente, a Pablo Gijón, con quien he compartido parte del desarrollo del proyecto y hemos invertido muchos de nuestros días en solucionar cada uno de los inconvenientes que nos encontrábamos.

RESUMEN

En el presente Trabajo de Fin de Máster se ha desarrollado todo el proceso de creación de una demostración de una aplicación robótica industrial, diseñada específicamente para el subsector de bollería y pastelería industrial, dentro del ámbito agroalimentario, pero que podría extrapolarse a múltiples sectores industriales en los que sea necesaria realizar una clasificación de los objetos que entran en las líneas de producción disponibles aguas abajo desde el punto de localización del robot empleado.

Con esta aplicación se pretende enfocar y demostrar las grandes posibilidades que incorporan el uso de la robótica y la automatización en el sector de la manipulación industrial, actualmente desempeñado en una gran proporción por trabajadores humanos, lo que implica un alto riesgo de posibilidad de contaminación alimentaria por contacto. La introducción de la robótica no solo corrige este aspecto sino que posibilita una producción más eficiente y flexible, pues se pueden obtener muchos más datos sobre el estado de los productos gracias a los sensores incorporados en la cadena de producción. Incluso el mismo sistema constituye un método de control de la calidad, pues al hacer uso de cámaras de visión artificial se puede detectar el estado del producto individualizado, haciendo que la trazabilidad alimentaria sea un aspecto sencillo dentro de la cadena de producción. Así mismo, permite reducir considerablemente los riesgos de accidente laboral, ya que los robots pueden desempeñar acciones repetitivas y peligrosas para los operarios.

El proyecto se centra en la creación de una aplicación clasificadora de panes de hamburguesa para la marca Dulcesol (colaboradora del Instituto de Automática e Informática Industrial), permitiendo con ella la elección voluntaria, tanto instantánea como programada en el tiempo, del porcentaje de producto que pasa a cada lado de la línea de producción. Durante el transcurso del mismo se han llevado a cabo todos los trabajos necesarios para la puesta a punto de una aplicación robótica, desde el modelado de las herramientas a utilizar hasta la demostración del funcionamiento dentro de las características técnicas del equipo utilizado, pasando por la instalación de los equipos necesarios y la propia programación de la aplicación.

ABSTRACT

In this Master's Thesis, it has been developed the entire process of creating a demonstration of an industrial robotic application, specifically designed for the industrial bakery subsector, within the agro-food sector, but could be extrapolated to multiple industrial sectors where it could be necessary to make a classification of the objects that enter the production lines available downstream from the location of the robot used.

This application aims to focus and demonstrate the great possibilities that incorporate the use of robotics and automation in the industrial manipulation sector, currently performed in a large proportion by human workers, implying a high risk of possibility of food contamination by contact. The introduction of robotics not only corrects this aspect but also enables a more efficient and flexible production, since many more data on the state of the products can be obtained thanks to the sensors incorporated in the production chain. Even the same system is a method of quality control, since the use of artificial vision cameras can detect the state of the individual product, making food traceability a simple aspect of the production chain. In addition, it allows to reduce considerably the risks of work accident, since the robots can carry out repetitive actions and dangerous for the operators.

The project is focused on the creation of a hamburger breading application for the brand Dulcesol (collaborator of the Institute of Automatic and Industrial Informatics), allowing with it the voluntary choice, both instantaneous and programmed in time, of the percentage of product that passes on each side of the production line.

During the course of the project, it has been carried out all the necessary work for the implementation of a robotic application, from the modeling of the tools or grippers used to the demonstration of the application operation within the technical characteristics of the equipment used, through the installation of the necessary equipment and the own programming of the application.

Índice general

RESUMEN	III
ABSTRACT	V
Introducción	1
1.1 Objetivos del trabajo final de máster.....	2
1.2 Estructura del trabajo	3
Estado del arte	4
2.1 Robótica	4
2.1.1 Clasificación.....	6
2.1.2 Estructura y tipos de configuraciones.....	6
2.1.3 Criterios de selección	8
2.1.4 Métodos de programación de robots	9
2.1.5 Programación genérica de robots.....	10
2.1.6 Situación actual de la robótica	12
2.2 Visión por computador	17
2.2.1 Introducción	17
2.2.2 Cámaras y sensores.....	20
2.2.3 Iluminación.....	27
2.3 Transductores: Encoders.....	34
2.4 Grupo Dulcesol.....	38
Herramientas empleadas.....	43
3.1. Stäubli Robotics Suite.....	43
3.2. Robot TX60.....	47
3.3. Cognex In-Sight Explorer	51
3.4. Cámara Cognex In-Sight 5100	57
3.5. Solidworks	59

Trabajo desarrollado	62
4.1 Aplicación inicial (escritura AI2)	62
4.2 Desarrollo de aplicación clasificadora de panes	63
4.2.1 Modelado de efectores finales	65
4.2.2 Aplicación de visión.....	69
4.2.3 Instalación e inicialización de la aplicación robótica	80
4.2.4. Desarrollo de la aplicación robótica.....	90
Conclusiones y trabajos futuros.....	97
Bibliografía	99

4.2 Croquis de efector final tipo vara.....	65
4.3 Cuerpo principal del efector tipo vara	66
4.4 Croquis de agujeros.....	66
4.5 Renderizado del efector tipo vara.....	67
4.6 Base del efector final tipo pala.....	67
4.7 Base y saliente de efector final tipo pala	68
4.8 Cuerpo principal del efector final tipo pala.....	68
4.9 Renderizado del efector final tipo pala	69
4.10 Diferentes tiempos de exposición: arriba izquierda: 1,25 ms; arriba derecha: 2,25ms; abajo: 3,5 ms	70
4.11 Patrón de detección	71
4.12 Características para definir patrón de detección.....	72
4.13 Características de búsqueda de patrones.....	73
4.14 Ejemplo de patrones detectados con FindPatMaxPattern	73
4.15 Cuadrícula de detección de patrones.....	74
4.16 Cuadrícula de comparativa de patrones duplicados.....	74
4.17 Cuadrícula de eliminación de duplicidades.....	75
4.18 Plantilla de calibración	76
4.19 Resultado de análisis de calibración	76
4.20 Cuadrícula de calibración	77
4.21 Cuadrícula de ordenación de patrones	77
4.22 Dibujo de círculos en lugar del patrón detectado.....	78
4.23 Cuadrícula de envío de datos a Stäubli	79
4.24 Cuadrícula de envío de datos específico a Stäubli	80
4.25 Esquema de conexiones.....	81
4.26 Ruido observado en la señal del encoder	82
4.27 Conexionado del adaptador de encoder.....	83
4.28. A) Dirección IP de cámara Cognex 5100 B) Definición de socket de comunicación.....	84
4.29 Verificación de no errores en hardware	85
4.30 Verificación de no errores en hardware	85
4.31 Características de puntero de calibración.....	86
4.32 Dimensiones de puntero de calibración	86
4.33 Página principal del asistente.....	87
4.34 Parámetros del encoder.....	87
4.35 Parámetros de detección	88
4.36 Parámetros de cinta transportadora.....	88
4.37 Geometría de cinta transportadora	89
4.38 Esquema de conexiones de librerías.....	90
4.39 Selección de librería conveyor	91
4.40 Diagrama de flujo de pick&place	91
4.41 Diferenciación de zonas dentro del ancho de la cinta	92
4.42 Código: elección de porcentaje.....	93
4.43 Código: cambio de porcentaje y elección de prioridad	94
4.44 Código: modificación porcentaje	94
4.45 Código: desplazamiento de panes	95

Índice de tablas

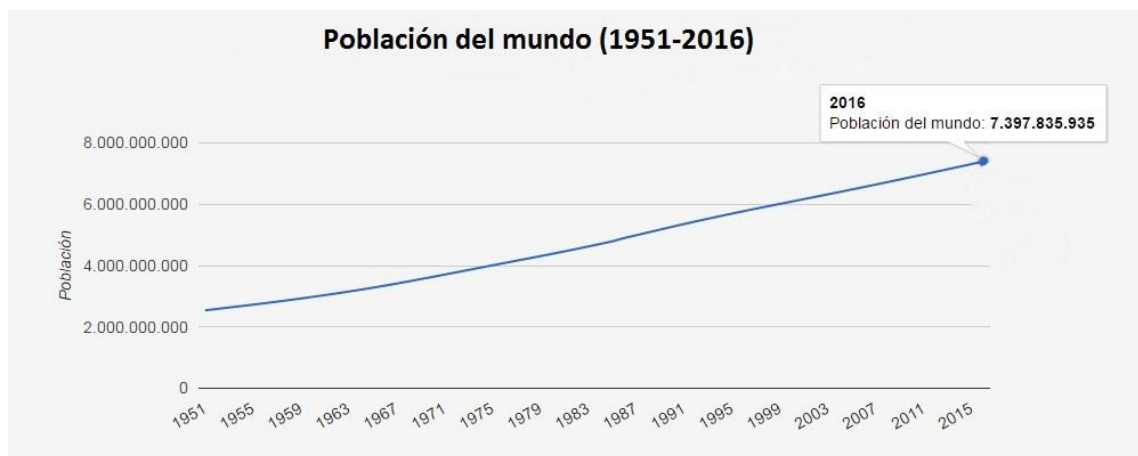
Tabla 1. Evolución del parque de robots en España	15
Tabla 2. Volumen de trabajo para brazo TX60.....	48
Tabla 3. Amplitud de ejes para brazo TX60.....	48
Tabla 4. Velocidades para brazo TX60	49
Tabla 5. Carga para brazo TX60.....	49
Tabla 6. Inercias para brazo TX60	49
Tabla 7. Pares límite para brazo TX60.....	50
Tabla 8. Numeración de cámara Cognex	58

Capítulo 1

Introducción

El sector agroalimentario ha sido eminentemente manufacturero desde que se inició la agricultura en el periodo Neolítico (hacia 8500 a.C. en Oriente Próximo, llegando posteriormente a Europa (a partir de 7000 a.C.) debido a la llegada de especies como el trigo o la cebada procedentes de las culturas de Oriente). Durante siglos la economía mundial se basó fundamentalmente en la agricultura hasta que en la Revolución Industrial de la segunda mitad de siglo XVIII se pasó a una economía más industrializada y mecanizada, existiendo un gran éxodo de población rural hacia las ciudades. De la mano de la Revolución Industrial, vino una revolución demográfica debida esencialmente a la mejora en las condiciones de higiene, sanidad y de la alimentación.

Con el crecimiento exponencial de la población mundial (se pasó de unos 2.250.000 habitantes en 1951 a casi 7.400.000 a inicios de 2016), se hizo necesaria la producción de más alimentos, pero al disponer de menor cantidad de mano de obra rural fue necesaria la mecanización progresiva del sector agrícola, el uso de productos químicos, etc. De esta manera, se llega a finales del siglo XIX donde la agricultura ya es una actividad similar a cualquiera del ámbito industrial en cuanto a su conexión con la tecnología, convirtiéndose en una agricultura especializada y enfocada a los altos rendimientos productivos. Tal es el caso, que la mecanización agraria está considerada por *la Academia Internacional de Ingeniería de Estados Unidos* como uno de los 20 mejores avances tecnológicos del siglo XX.



0.1 Crecimiento de población mundial

Con los continuos avances tecnológicos ha sido posible mecanizar no solo el proceso de siembra y recolección, sino toda la cadena de producción, como pueden ser los procesos de empaquetado, clasificación, detección de defectos, etc. para casi cualquier tipo de producto alimenticio, consiguiendo unos niveles de producción inalcanzables para un proceso completamente manufacturado.

La introducción de estas técnicas y tecnologías no sólo busca una mayor capacidad de producción sino conseguir eliminar de los procesos productivos aquellas actividades que conlleven un riesgo para las personas por lo que la tendencia global es continuar con este cambio e ir incrementando el número de procesos automatizados en el sector, pues cada vez se tienen mejores prestaciones en los equipos. Algunos de estos avances son los robots colaborativos, que permiten la interacción hombre-máquina, así como una mayor precisión y repetitividad en las nuevas generaciones de robots, lo que permite un trabajo mucho más exacto y perfeccionado, sensores de visión como las cámaras ultrarrápidas y de alta definición que permiten la detección de defectos inapreciables para un ser humano y un sinnúmero de aspectos que hacen posible la utilización de estas tecnologías en condiciones muy desfavorables para el ser humano, como pueden ser temperaturas extremas, lugares con bajas proporciones de oxígeno o sitios de muy difícil acceso para un operario.

1.1 Objetivos del trabajo final de máster

Después de lo expuesto anteriormente se definen los objetivos de este trabajo como los siguientes:

- Estudiar la problemática, las necesidades y las posibilidades que existen en la manipulación de alimentos mediante células robotizadas.
- Conocer el equipamiento y software disponible y aprender mediante sencillas aplicaciones su operación y programación, tanto simulada como experimentalmente.
- Diseñar la aplicación de demostración y programarla. En este punto entran todos los procesos necesarios para realizar en la célula robotizada la aplicación clasificadora de lotes de panes de hamburguesa. Dichos procesos pueden ser desde el estudio de la problemática al diseño de una solución eficaz ante la situación encontrada.

La aplicación en cuestión pretende ser ofrecida como posible solución para la empresa Dulcesol en sus líneas de producción de panes de hamburguesa y, como se explicará más detalladamente en el apartado 4.2 del presente proyecto, consiste en la clasificación de los productos en función del porcentaje deseado a cada lado de la cinta transportadora, de manera que pueda escogerse qué cantidad se desplaza a uno y otro lado, adaptándose a las necesidades de la línea de producción aguas abajo.

La previsión de un paro de una parte de la línea por mantenimiento preventivo y/o correctivo, la necesidad urgente de modificar el flujo de producto a cada lado ante una avería, la inclusión de nuevos equipos aguas abajo, de manera que se pueda aumentar la capacidad de producción, etc. pueden afectar al conjunto completo de la línea de producción; por lo que con esta aplicación se busca tener una flexibilidad que permita

modificar el flujo de producto que pasa a ambos lados, consiguiendo con ello adaptarse a las condiciones puntuales del proceso y por tanto la posibilidad de continuar con la producción sin la necesidad de pararla completamente.

- Seleccionar componentes necesarios y realizar su modelado 3D.
- Preparar la puesta a punto de la aplicación para su demostración.

1.2 Estructura del trabajo

El presenta trabajo de Fin de Máster se estructura de la siguiente manera:

En el apartado 2 de Estado del Arte se ha realizado una recopilación de los aspectos más destacados de la robótica a lo largo de su historia, explicando qué tipos de clasificación se realizan, sus diferentes configuraciones y los principales métodos genéricos en cuanto a su programación y finalizando con un breve resumen de la situación actual, tanto mundial como centrado en el ámbito agroalimentario que corresponde al desarrollo del proyecto. Además, se realiza otra recopilación de la visión por computador, otro de los aspectos utilizados durante el proyecto, tanto en cámaras y sensores principalmente utilizados como en los diferentes tipos de iluminación que puede utilizarse. Se finaliza este capítulo con una breve explicación de las dos tecnologías principales de encoders: HTL y TTL.

En el capítulo 3, se introducen las herramientas empleadas durante la realización del proyecto, tanto en hardware, donde se explican las características técnicas del robot Stäubli TX60 y de la cámara de visión artificial Cognex InSight 5100, como en software, donde se introduce al software de simulación Stäubli Robotics Suite, perteneciente a Stäubli y desde el cual se realiza la programación de la aplicación; al software In-Sight Explorer, proporcionado por Cognex para realizar aplicaciones de visión por computador; y el software para modelado de Solidworks.

A continuación, en el apartado 4 se expone el trabajo principal desarrollado, partiendo desde una sencilla aplicación inicial con la que se verifica que la calibración del robot es la correcta para posteriormente pasar al desarrollo principal del proyecto, explicando los pasos seguidos tanto para el modelado de los efectores finales empleados como para la realización de la aplicación de visión artificial como en la instalación y programación de la aplicación robótica.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1 Robótica

La robótica, en muchos de sus aspectos, está orientada a la creación de máquinas que guardan semejanza o que pueden realizar las mismas tareas que los seres humanos. Es con Karel Capek, en su obra *Rossum's Universal Robot* de 1921, donde se acuña el término "robot" a unos seres que realizaban tareas rutinarias y desagradables para el ser humano. En este aspecto, el término "robot" proviene de la palabra checa "robota", que significa literalmente "trabajo o labor" y figuradamente "trabajo duro". No obstante, desde mucho antes, el ser humano había estado interesado en la creación de mecanismos mecánicos que actuaran por sí solos, como son los famosos autómatas desarrollados en el siglo XVIII; y no fue hasta 1950 cuando se hizo popular la robótica gracias a Isaac Asimov y su obra literaria *Yo, Robot*. Años más tarde, en 1954, se patenta el primer robot programable por George Devol al darse cuenta que en la industria existían tareas repetitivas. El propio George Devol, junto con Josef Engelberger, crea en 1956 la primera empresa dedicada a la robótica: Unimation (Universal Automation). Tras varios años de avances lentos pero continuos, en 1978, Unimation desarrolla el robot Puma (Programmable Universal Machine for Assembly) con el apoyo de General Motors, siendo un brazo robot de características antropomórficas. A partir de ahí, los avances y utilidades en los robots se han desarrollado de manera exponencial, llegando hasta los robots colaborativos de hoy en día, los cuales interactúan con el ser humano.



Puma 560

0.1 Robot Puma 560



0.2 Robot colaborativo UR3

A medida que se iban desarrollando los robots, se han establecido diferentes definiciones de ellos que difieren entre ellas en pequeños detalles. Una de las definiciones más aceptadas y extendidas es la realizada por la RIA (Asociación de Industrias Robóticas), la cual establece que un robot industrial es un:

“Manipulador reprogramable y multifuncional diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales a lo largo de trayectorias variables para la realización de tareas variadas (multidisciplinar).”

Por otro lado, la Federación Internacional de Robótica (IFR) hace distinción entre un robot industrial de manipulación y otro tipo de robots. En esta definición además se debe entender que la reprogramabilidad y la multifunción se consiguen físicamente por parte del robot:

“Se entiende como robot industrial de manipulación 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.”

Existen muchas otras definiciones por parte de otras instituciones como AFNOR (Asociación Francesa de Normalización), teniendo en común las características de reprogramabilidad, multifuncionalidad y automatismo.

Es por ello que un sistema robótico tiene carácter multidisciplinar, englobando en él aspectos de la informática, la electrónica, la mecánica, la tecnología sensorial y de actuadores, etc.

Se suelen distinguir tres generaciones en el desarrollo de la industria robótica:

- **Primera generación:** los robots primitivos tenían capacidad para almacenar trayectorias de movimiento descritas punto a punto. Esta primera generación de robots era programable y de tipo brazo manipulador. Sólo podían memorizar movimientos repetitivos, asistidos por sensores internos que les ayudaban a moverse con precisión. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.
- **Segunda generación:** La segunda generación de robots entra en escena a finales de los años 70. Estos robots cuentan con sensores externos (tacto y visión por lo general) que dan al robot información (realimentación) limitada del mundo exterior, pudiendo actuar en consecuencia. Pueden hacer elecciones limitadas o tomar decisiones y reaccionar ante el entorno de trabajo; se les conoce por ello como robots adaptativos.
- **Tercera Generación:** La tercera generación está surgiendo en estos años, emplean la inteligencia artificial (IA) y hacen uso de los ordenadores más avanzados. Estos ordenadores no sólo trabajan con datos, sino que también lo hacen con los propios programas, realizan razonamientos lógicos y aprenden. La IA permite a los

ordenadores resolver problemas inteligentemente e interpretar información compleja procedente de avanzados sensores. Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural y poseen capacidad para la planificación automática de tareas.

2.1.1 Clasificación

Ante la variabilidad de los sistemas robotizados, existen múltiples clasificaciones dependiendo del aspecto que se quiera recalcar. De esta manera, un robot puede clasificarse según:

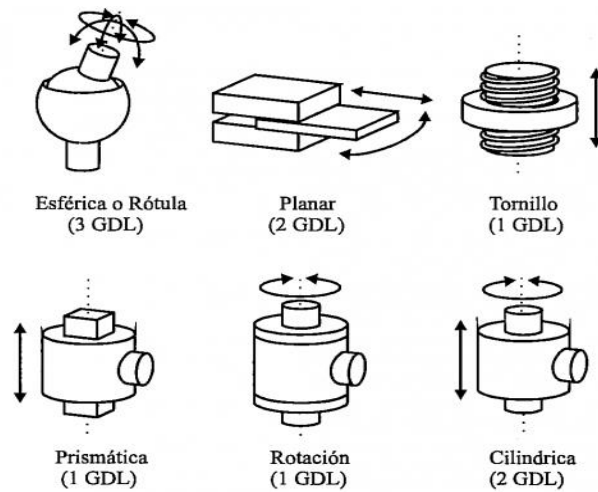
- Su **aplicación**, entre robot industrial o robot de servicios (robot que opera semi o totalmente autónomo, para realizar servicios útiles para el bienestar de los seres humanos y equipos, con exclusión de las operaciones de fabricación).
- Su **control**, diferenciando entre teleoperado, semiautónomo o autónomo.
- Su **arquitectura**, en la que caben tres posibilidades: jerárquica o funcional, basada en comportamientos e híbrida.
- Su **estructura mecánica**, pudiendo ser de cadena abierta (cada eslabón se conecta mediante articulaciones exclusivamente al anterior y al siguiente) o de cadena cerrada (manipuladores paralelos, robots con patas, manos multidedos, etc.).
- Su **movilidad**, existiendo los robots estáticos y los robots móviles (mediante ruedas, patas, orugas, etc.).

2.1.2 Estructura y tipos de configuraciones

Un brazo robot es un mecanismo de movimiento múltiple realizado por la conexión de varios cuerpos rígidos (elementos o eslabones) con articulaciones que permiten el movimiento relativo de cada dos eslabones consecutivos. Una articulación está compuesta por un motor, un sensor y una transmisión mecánica, y algunas incluyen freno mecánico para mantener la posición o para paradas de emergencias. La mayoría de los actuadores controla únicamente un grado de movilidad (GDM) o lo que es lo mismo al número de elementos que se pueden mover de forma independiente.

En este punto, habría que hacer un inciso y diferenciar entre grado de movilidad (GDM) y grado de libertad (GDL) o número de variables de posición independientes en relación a un sistema de coordenadas fijo. Si el número de GDM que tiene un robot coincide con el número de GDL se dispone de un robot holónimo (como son la mayoría de los manipuladores antropomórficos) mientras que si el número de GDM es menor a los GDL, el robot será no-holónimo (como el caso del coche). El robot no-holónimo posee ligaduras, que típicamente se deben a un contacto de un elemento con el mundo. Como último punto, cabe la posibilidad que los GDM sean mayores que los GDL, en lo que entraríamos en el ámbito de robots redundantes, lo que le da más "riqueza" al movimiento pero a su vez implica una mayor complejidad a la hora de realizar el control de los mismos.

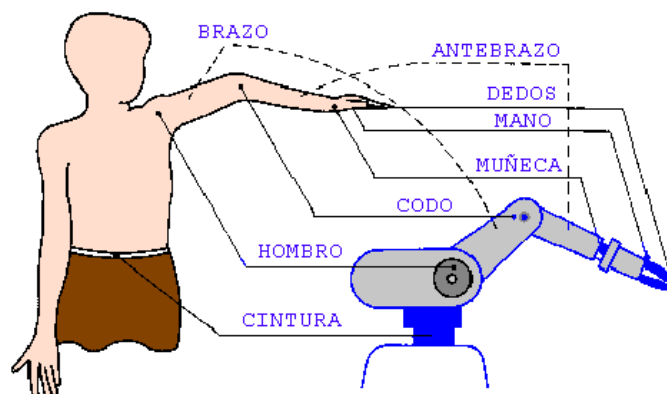
Volviendo a las articulaciones, existen diferentes tipos de articulaciones en función de los grados de libertad (GDL) que permitan:



0.3 Tipos de articulaciones

Por otra parte, las más comunes son la articulación prismática, que permite el movimiento lineal alrededor de un eje, y la de revolución, que permite la rotación con respecto a un eje.

Independientemente de las articulaciones que conformen el manipulador robótico, a estos se les suele denominar *brazo robot* por su gran similitud con el brazo humano:

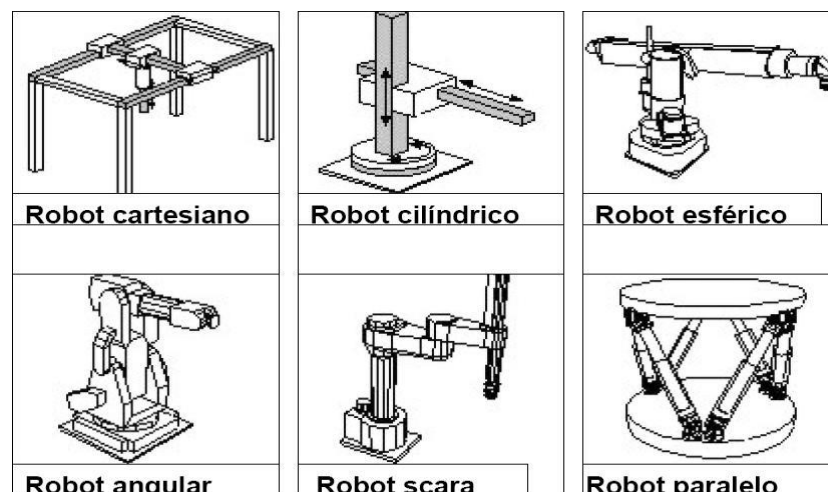


0.4 Semejanza de brazo robótico y humano

El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot da lugar a diferentes configuraciones, con características a tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicación. Las combinaciones más frecuentes son con tres articulaciones, que son las más importantes a la hora de posicionar su extremo en un punto en el espacio. A continuación se presentan las características principales de las configuraciones del brazo manipulador:

- Articulado o **antropomórfico**: El robot usa 3 articulaciones de rotación para posicionarse: una articulación con movimiento rotacional y dos angulares. Generalmente, el volumen de trabajo es esférico.

- **Esférico:** Dos articulaciones de rotación y una prismática permiten al robot apuntar en muchas direcciones, y extender la mano a un poco de distancia radial. Los movimientos son: rotacional, angular y lineal. Actualmente no se fabrican.
- **Cilíndrico:** El robot tiene un movimiento de rotación sobre una base, una articulación prismática para la altura, y una prismática para el radio. Este robot se ajusta bien a los espacios de trabajo redondos. Puede realizar dos movimientos lineales y uno rotacional. Actualmente no se fabrican.
- **Scara:** Similar al de configuración cilíndrica, pero el radio y la rotación se obtiene por uno o dos eslabones. Este brazo puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos articulaciones rotacionales. También puede hacer un movimiento lineal (mediante su tercera articulación) de subida/bajada. Permite mayores aceleraciones que la configuración de antropomórfico.
- **Cartesiano:** El posicionamiento en el espacio de trabajo se hace con las articulaciones prismáticas. Esta configuración se utiliza cuando el espacio de trabajo es grande y debe cubrirse en su totalidad, o cuando la exactitud consiste en la espera del robot. Posee tres movimientos lineales los cuales corresponden a los movimientos localizados en los ejes X, Y y Z.
- **Paralelo:** posee brazos con articulaciones prismáticas o rotacionales concurrentes.



0.5 Tipos de configuraciones de un brazo robótico

2.1.3 Criterios de selección

A la hora de realizar la elección de un brazo robótico, no solo debe tenerse en cuenta su tipo de configuración y la aplicación para la que será utilizado sino que entran en escena múltiples aspectos a considerar que hacen a uno u otro robot más acorde para el empleo que se utilizará. Los criterios de selección más extendidos son:

- Carga máxima que soporta.
- Área de trabajo que abarca (volumen espacial al que puede llegar el extremo del robot sin contar la herramienta o efector final).

- Grados de libertad.
- Resolución (mínimo incremento que acepta la unidad de control), precisión (distancia entre el punto programado textualmente y el valor medio de los puntos alcanzados al repetir el posicionamiento en condiciones nominales) y repetibilidad (radio de la esfera que abarca los puntos alcanzados al realizar muchas veces el posicionamiento del robot).
- Velocidades y aceleraciones.
- Capacidades del software de programación.
- Precio, mantenimiento, comunicación, etc.

2.1.4 Métodos de programación de robots

Durante la ejecución de una aplicación, el programa del robot debe realizar diferentes tareas como: leer y actualizar las variables que utiliza, interactuar con los sistemas de control cinemático y dinámico, interactuar con las entradas y salidas para sincronizar el robot con el resto de dispositivos de su entorno (en lo que se conoce como célula flexible), etc.

Dependiendo de todas las tareas a realizar, el rendimiento de la aplicación puede verse afectado si no se realiza una correcta programación de la misma. Según el método de programación empleado se pueden realizar dos diferentes clasificaciones en base a los criterios siguientes:

- Una primera clasificación se realiza dependiendo de si la programación se produce directamente en la línea del proceso de producción (en lo que sería una programación directa u online) o fuera de ella (indirecta u offline). Podría incluso tenerse un tipo de programación híbrida si se realizara una combinación de ambas.
- Una segunda clasificación, y el criterio más utilizado para clasificar el método de programación, es en base al sistema empleado para indicar la secuencia de acciones a seguir. De este modo, se tienen dos programaciones: moviendo físicamente el robot y registrando la configuración, lo que da lugar a una programación por guiado (también conocida por su referencia en inglés “teaching by showing”); o utilizando un lenguaje de programación (programación textual).

La **programación por guiado** es el método más antiguo y extendido. Consiste en hacer realizar al robot la tarea mientras se registran las configuraciones adoptadas para su posterior repetición de forma automática en un proceso de enseñanza-repetición.

A su vez, podemos clasificar este método en: *guiado Pasivo Directo*, donde los actuadores se encuentran desconectados y el programador aporta la energía para mover físicamente el robot; *guiado Pasivo por Maniquí*, en cuyo caso el programador utiliza un “doble” del robot, más ligero y fácil de mover, cuyos movimientos sigue el robot original al modo maestro-esclavo; y *guiado Activo*, en el cual el programador emplea un joystick o un teclado para mover las articulaciones del robot, utilizando sus propios actuadores. Este último método puede ser en dos modalidades: básico, donde el robot es guiado por los puntos de paso y durante la ejecución el programa interpola entre esos puntos para obtener las trayectorias, o extendido,

donde además, se pueden especificar otros datos como velocidad, tipo de trayectoria, precisión en puntos de paso, etc.

La **programación textual** indica la tarea al robot mediante el uso de un lenguaje de programación específico, el cual debe comprender todo tipo de datos y estructuras requeridas para la descripción de tareas, debe ser fácilmente entendible y modificable por personas diferentes y deber ser eficiente para poder trabajar en tiempo real.

Dentro de este método existen 3 niveles de programación:

1. Nivel de Robot: Órdenes se refieren a acciones a realizar por el robot. Tiene carácter explícito.
2. Nivel de Objeto: Órdenes se refieren al estado en que quedan los objetos. De carácter implícito.
3. Nivel de Tarea: Órdenes se refieren al objetivo parcial a conseguir. Implícito al igual que el nivel objeto.

A su vez, dentro de la programación a nivel de robot encontramos lenguajes a nivel estructurado y a nivel de movimientos primitivos.

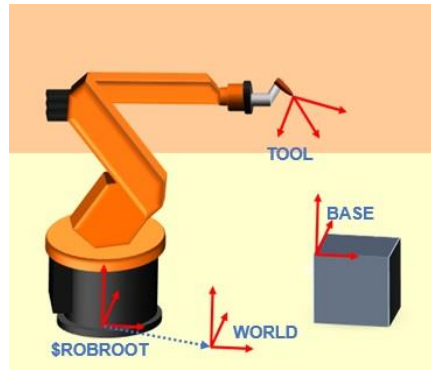
En la práctica actual, casi toda la programación textual es a nivel de robot aunque existen intentos de desarrollo de lenguajes a nivel de objeto pero que no han conseguido una implementación eficiente.

2.1.5 Programación genérica de robots

Dentro de la variabilidad de las posibles aplicaciones a realizar por un robot manipulador y de los diferentes robots existentes en cuanto a características y configuraciones, existe cierta similitud en las tareas que se realizan (coger, dejar, desplazar, etc.) y el entorno de trabajo que permite establecer consideraciones y estructuras de programas genéricas.

Una de ellas es la existencia de sistemas de coordenadas, utilizándose de manera mayoritaria los siguientes cuatro sistemas de coordenadas:

- **Mundo:** único y modificable. Su función es la de referencias movimientos, robots y objetos.
- **Robot:** único al igual que el Mundo, pero no modificable. Referencia movimientos y localizaciones del robot con respecto al Mundo.
- **Herramienta (tool):** en el origen de la brida y definible con respecto a él. Referencia movimientos y localizaciones de la brida con respecto al Robot.
- **Base o Auxiliar:** Múltiples, se definen con respecto al del Mundo. Referencian movimientos y localizaciones de objetos con respecto al Mundo.



0.6 Sistemas de coordenadas

Otro de los aspectos genéricos es la programación de un movimiento del robot, donde generalmente se realiza con la especificación de alguna o todas las siguientes características: velocidad, aceleración, tipo de movimiento, precisión y selección de configuración.

Dentro del tipo de movimiento existen tres movimientos típicos: movimiento libre o punto a punto (PTP); movimiento rectilíneo, en el cual la evolución de la orientación de la herramienta puede ser fija (comenzar y finalizar en la misma orientación) o seguir así mismo con una evolución lineal; y movimiento circular, para el cual la orientación de la herramienta durante el movimiento puede ser fija, fija con respecto a trayectoria, con variación lineal o con variación lineal con respecto a trayectoria.

En cuanto a la precisión a tener, se puede especificar un posicionamiento exacto, donde se establece un valor mínimo de aproximación que debe alcanzar el efector final; o un movimiento continuo donde no se especifica ningún tipo de aproximación.

En relación a la selección de la configuración, se debe a que, normalmente, existen 4 configuraciones posibles para que el efector final alcance una posición con una orientación. Estas configuraciones vienen dadas por el cálculo de la cinemática inversa en un robot de 6 articulaciones de rotación (el más habitual). Por tanto, al especificar una trayectoria también es posible indicar (sobre todo si no se hace automáticamente) cuál de las cuatro configuraciones se utiliza, asegurándose que se mantiene dicha configuración para toda la trayectoria (para evitar graves problemas en el control dinámico del robot).

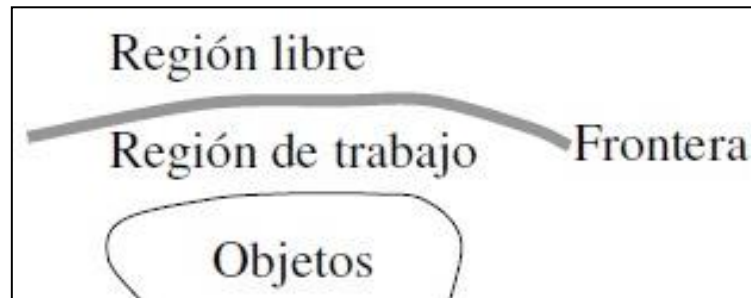
Por otra parte, existen tareas básicas que los robots realizan dentro de una aplicación las cuales pueden agruparse en dos grupos: las que están basadas en una única localización de trabajo, como puede ser la manipulación (coger o dejar un objeto), taladro, soldadura por punto, etc.; y las que están basadas en una trayectoria a partir de una secuencia de localizaciones, como puede ser una trayectoria de soldadura, de fresado, pintura, lijado, control de calidad, etc.

Por último, se pueden distinguir dos regiones en el espacio de trabajo dependiendo de la proximidad a los objetos:

- Región libre: Alejada de los objetos del entorno. Los movimientos pueden ser libres con velocidades altas y sin precisión.

- Región de trabajo: Próxima a los objetos del entorno. Debe existir control en movimiento (no libre), precisión y velocidad.

Ambas regiones se encuentran separadas por una frontera muy poco definida.



0.7 Regiones en el espacio de trabajo

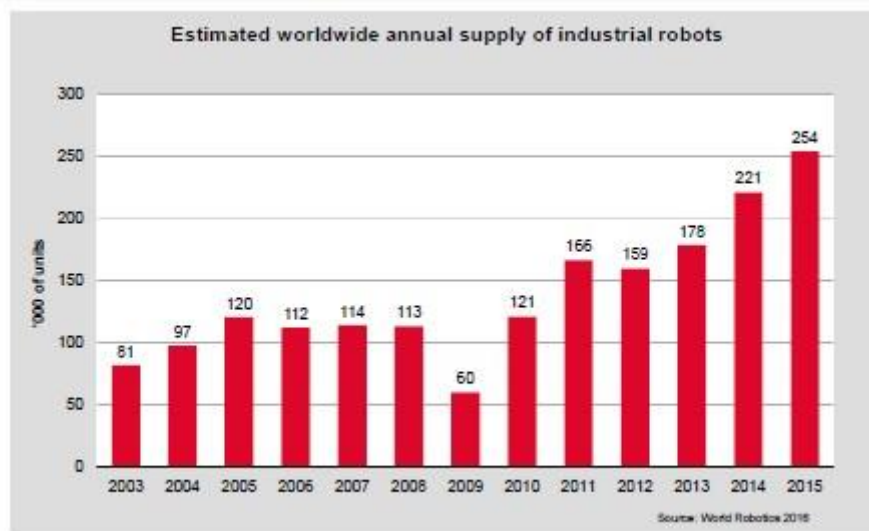
Como consecuencia de las regiones definidas anteriormente, se caracterizan tres tipos de localizaciones:

- Localización de ataque: Sirve para pasar de la región libre a la de trabajo, pasando el movimiento a ser controlado (en velocidad, precisión y forma).
- Localización de retirada: Sirve para pasar de la región de trabajo a la libre, dejando de controlarse el movimiento.
- Localización de trabajo: Localización intermedia ubicada en la región de trabajo, necesitándose controlar el movimiento en velocidad, precisión y forma.

2.1.6 Situación actual de la robótica

En base a los datos aportados por la IFR (International Federation of Robotics), en el año 2015 aumentaron las ventas de robots en un 15% (aproximadamente 254.000 unidades a nivel mundial) con respecto al año anterior, el mayor nivel registrado durante un año desde que se hace seguimiento de estos datos. Para entender el enorme crecimiento que está teniendo el sector de la robótica se puede hacer la siguiente comparativa: entre los años 2005 y 2008, la media de unidades vendidas se establece en unos 115.000. Si se descarta el año 2009 debido a la crisis mundial, que hizo que la economía decayera en todos los ámbitos, y se coge el rango entre 2010 y 2015, la media de unidades vendidas sube hasta las 183.000 unidades, dando un incremento cercano al 60% y dejando clara la demanda de robots industriales a nivel mundial.

El principal motor del crecimiento fue la industria general, con un incremento del 33% con respecto al año 2014, en especial la industria electrónica (+ 41%), industria metalúrgica (+ 39%), productos químicos, plásticos y la industria del caucho (+ 16%). Las ventas de robots en la industria de automoción, líder en relación al número de robots utilizados, aumentaron moderadamente en 2015 tras un período de cinco años de considerables incrementos.



0.8 Cantidad de robots industriales a nivel mundial

Según las previsiones de la IFR, el parque de robots mundial continuará incrementándose en los próximos años. El desarrollo de la industria 4.0, que une la vida real de la fábrica con la realidad virtual y que jugará un papel cada vez más importante en la fabricación global; el desarrollo de los robots colaborativos compactos, permitiendo un gran avance en el trabajo conjunto humano-robot; la competencia global y los crecientes mercados de consumo, que hace que disminuya el ciclo de vida de los productos, exigen una modernización de las instalaciones y la expansión de la capacidad de producción flexibilizada, sin olvidarse de la eficiencia energética de la misma; la mejora continua de la calidad requiere sistemas de alta tecnología, lo que también lleva a una mejora de la calidad del trabajo, al hacerse cargo los robots de trabajos peligrosos o tediosos para el ser humano.

Se estima que las pequeñas y medianas empresas empezarán cada vez más a utilizar de una u otra manera robots industriales para su producción, con el propósito de poder continuar con los servicios que prestan. El aumento de la demanda en la industria electrónica, metalúrgica y de maquinaria, industria de plásticos, la industria de alimentos y bebidas será cada vez mayor, pues son sectores en los que existen múltiples tareas que son susceptibles de automatizar y robotizar.

Country	2014	2015	2016*	2019*
America	32,616	38,134	40,200	50,700
Brazil	1,266	1,407	1,800	3,500
North America	31,029	36,444	38,000	46,000
Rest of South America	321	283	400	1,200
Asia/Australia	134,444	160,558	190,200	285,700
China	57,096	68,556	90,000	160,000
India	2,126	2,065	2,600	6,000
Japan	29,297	35,023	38,000	43,000
Republic of Korea	24,721	36,285	40,000	46,000
Taiwan	6,912	7,200	9,000	13,000
Thailand	3,657	2,556	3,000	4,500
other Asia/Australia	10,635	6,873	7,600	13,200
Europe	45,559	50,073	54,200	68,800
Central/Eastern Europe	4,643	5,976	7,550	11,300
France	2,944	3,045	3,300	4,500
Germany	20,051	20,105	21,000	25,000
Italy	6,215	6,657	7,200	9,000
Spain	2,312	3,766	4,100	5,100
United Kingdom	2,094	1,645	1,800	2,500
other Europe	7,300	8,879	9,250	11,400
Africa	428	348	400	800
not specified by countries**	7,524	4,635	5,000	8,000
Total	220,571	253,748	290,000	414,000

Sources: IFR, national robot associations.
 *forecast
 ** reported and estimated sales which could not be specified by countries

0.9 Ventas anuales estimadas de robots industriales

En el ámbito nacional y según datos de Asociación Española de Robótica y Automatización de Tecnologías de la Producción (AER-ATP), que se ajusta a la clasificación y a las normas establecidas por la IFR, el número de unidades totales instaladas asciende a 3.710 unidades en el año 2015, lo que significa en valor absoluto un récord histórico de robots vendidos en España. Ésta cifra representa casi un 16% más que el ejercicio anterior y cerca del 11% de incremento de unidades en el mercado, estando por encima de las previsiones que la IFR estimaba en relación a Europa, entre el 5 y el 7% aproximadamente.

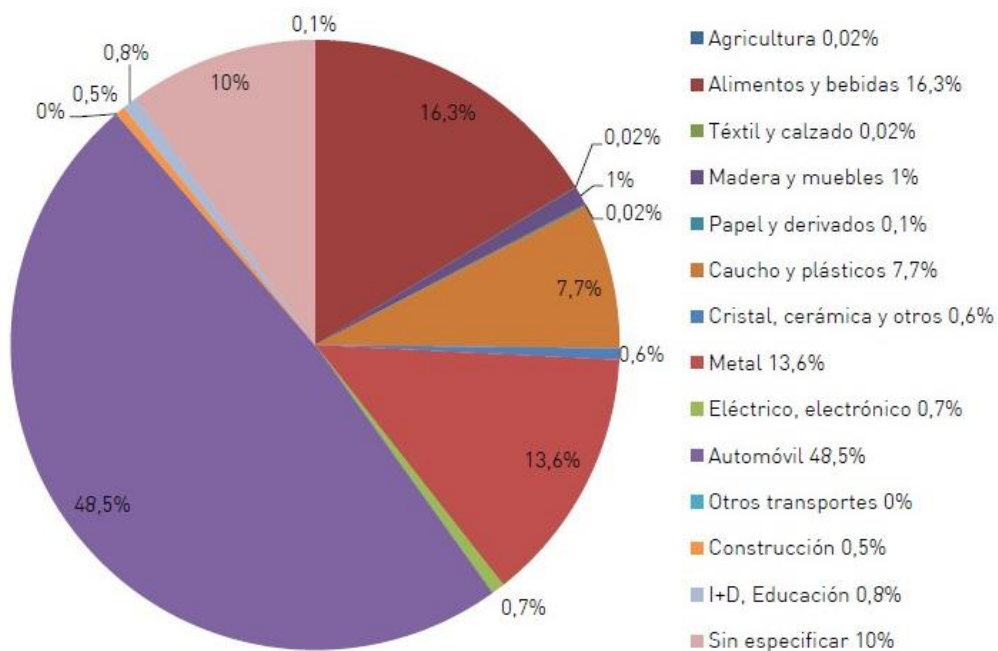
En la siguiente tabla puede observarse la evolución que ha tenido el parque de robots en España en los últimos 12 años, con un crecimiento continuo del número de robots empleados en la industria. También es importante recordar que la IFR contabiliza el número de robots acumulados en los últimos 12 años, entendiéndose este periodo como la vida útil de un robot industrial.

Tabla 1. Evolución del parque de robots en España

AÑOS	Nº de unidades	Total acumulado histórico	% >	TOTAL REAL (*)
2003	2.031	16.101	11,1	19.847
2004	2.826	18.927	14,2	22.212
2005	2.599	21.526	11,7	24.031
2006	2.527	24.053	10,5	26.016
2007	2.515	33.047	9,7	27.701
2008	2.461	35.508	8,9	29.029
2009	1.833	37.341	6,3	29.729
2010	2.019	39.360	6,8	30.545
2011	3.006	42.366	9,9	31.741
2012	2.355	44.721	7,8	31.984
2013	2.850	47.571	8,9	31.893
2014	2.129	49.700	6,6	32.048
2015	3.710	53.410	11,1	33.338

(*) Acumulado ejercicio anterior + incremento del ejercicio - incremento año número 12 anterior

En cuanto a la distribución por sectores, señalar que sigue el liderazgo del sector de automoción con cerca del 48,5% de los robots incorporados (cifras previsibles dadas las inversiones que se han realizado en dicho sector), pero cabe destacar que continúa el aumento en el sector de alimentación y bebidas, alcanzado un 16,3% del total, y también el importante aumento en relación con el año anterior del sector del metal.



0.10 Gráfico de la distribución de robots por sectores. Año 2015.

2.1.6.1 Robotización del sector agroalimentario

El sector industrial de alimentación y bebidas y la industria agroalimentaria son líderes en empleos en Europa dentro del área de manufactura, constituyendo uno de los sectores clave

en las economías de los países, pero tienen una de las productividades más bajas en relación con otros sectores manufactureros.

El sector agroalimentario tiene un enorme potencial para automatizar procesos con robots pero no existen soluciones específicas desarrolladas para él ya que los proveedores de robots han desarrollado productos específicos para determinadas necesidades del sector automovilístico, que es el que tradicionalmente más ha empleado la robótica para la automatización de su producción. La falta de conocimiento de posibles aplicaciones, la limitada funcionalidad del robot y su coste dificulta el uso de la robótica en el sector agroalimentario, si bien cada vez más se va incrementando los procesos automatizados. Dentro del sector de alimentación y bebidas los subsectores de procesado de frutas y vegetales y, bollería y pastelería, son los que mayor potencial tienen para automatizar sus procesos productivos con robots.

Las regulaciones impuestas por los organismos gubernamentales impulsan la trazabilidad alimentaria a lo largo de todo el proceso de la cadena alimentaria obligando a las compañías a automatizar sus procesos, lo que llevará a una mayor facilidad para el control de las líneas de producción, mejorar la eficiencia y la productividad.

Con el empleo de robots se consigue aumentar la productividad siendo está más constante y controlada. La robótica además de permitir automatizar procesos puede al mismo tiempo conseguir una gran cantidad de información del proceso productivo logrando con ello información útil para el control y mejora del producto y del proceso. El uso de la visión artificial, ligado en gran medida con la utilización de robots, permite obtener datos de la cantidad de producto y/o el aspecto que tienen, por lo que este mismo sistema constituye un método de control de la calidad, descartando aquellos casos que no cumplen los requisitos.

Los robots facilitan un proceso productivo más flexible y con mayor facilidad a la realización de cambios. Por ejemplo, con la integración de paneles táctiles en la línea de producción, se posibilita realizar rápidos y sencillos ajustes para poder cambiar de un modo a otro de fabricación al cambiar algún parámetro específico del producto, el cual previamente ha sido programado y está guardado en las características del controlador. Así mismo, al automatizar el proceso productivo se disminuyen los riesgos laborales por la eliminación de trabajos repetitivos en ambientes poco saludables, como pueden ser cámaras frigoríficas muy habituales en el sector. Por otra parte, la ausencia de personal en contacto con el producto reduce la posibilidad de contaminación alimentaria logrando mejorar la higiene del proceso.

El conjunto de la automatización con robots se realiza con el objetivo final económico de lograr un menor coste del producto pudiendo lograrse rápidos retornos de la inversión.

2.2 Visión por computador

2.2.1 Introducción

Se puede definir la “Visión Artificial” o “Visión por computador” como un campo de la Inteligencia Artificial que, mediante la utilización de las técnicas adecuadas, permite la obtención, procesamiento y análisis de cualquier tipo de información especial obtenida a través de imágenes digitales. Al igual que los seres humanos usamos nuestros ojos y cerebros para comprender el mundo que nos rodea, la visión por computador trata de producir el mismo efecto para que las computadoras puedan percibir y comprender una imagen o una secuencia de imágenes y actuar según convenga en una determinada situación.

Dentro de la visión por computador, se pueden definir dos conceptos sobre ella: una disciplina científica, que se encarga de investigar y desarrollar teorías, métodos y algoritmos computacionales para construir sistemas artificiales que obtienen información de las imágenes; y una disciplina tecnológica, que se encarga de la aplicación de las teorías y métodos anteriores para la construcción de sistemas de visión por computador para resolver problemas reales. Entre estos problemas se engloban las siguientes propiedades de los objetos: propiedades geométricas (forma, tamaño, etc.), propiedades de los materiales (color, textura), propiedades espaciales (localización y orientación), propiedades cinemáticas (velocidad, aceleración).

La visión por computador aplicada a la industria abarca múltiples campos como pueden ser la informática, la óptica, la ingeniería mecánica o la automatización industrial. Las aplicaciones desarrolladas en un sistema de visión por computador integran sistemas de captura de imágenes digitales, dispositivos de entrada/salida y redes de ordenador para el control de equipos destinados a la fabricación, tales como brazos robóticos. Pero las aplicaciones de la visión por computador no quedan sólo aquí, sino que puede extrapolarse a otros diferentes ámbitos como puede ser la medicina, restauración de imágenes, aplicaciones militares, vehículos autónomos, etc. Con la visión artificial se puede automatizar tareas repetitivas de inspección (antes realizadas por operadores), realizar controles de calidad de productos que no era posible verificar por métodos tradicionales, realizar inspecciones de objetos sin contacto físico (por lo que no se deforma el material), realizar la inspección del 100% de la producción (calidad total) a una gran velocidad, reducir el tiempo de ciclo al automatizar el proceso, realizar inspecciones en procesos donde existe diversidad de piezas con cambios frecuentes de producción, etc. Con todas estas utilidades, es incuestionable que la utilización de un sistema de visión por computador para realizar el control de un proceso industrial conlleva múltiples ventajas frente al control visual de un operario, aunque como contrapartida tiene que este sistema es menos flexible frente a imprevistos, en los que la experiencia del operario puede ser de gran utilidad.

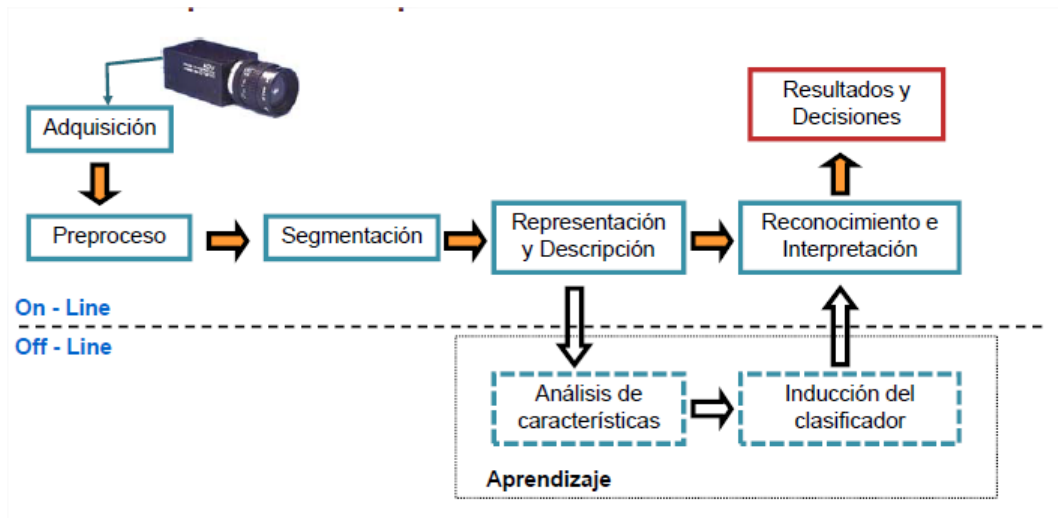
Más allá de las utilidades que puede tener un sistema de visión, este puede entenderse como un compromiso entre dos tipos de componentes: por un lado estaría el hardware del sistema, que comprende al sistema de adquisición de la imagen, al computador con la tarjeta digitalizadora y al sistema de visualización, y por otro lado estaría el software del sistema,

donde está incluido el software para controlar la adquisición y el almacenamiento de las imágenes, el necesario para la manipulación de las imágenes y para procesarlas e interpretarlas. Dentro de los componentes que puede tener un sistema de visión, se establecen como sus componentes básicos los siguientes: el sistema de iluminación, que comprende a las fuentes de luz y las relaciones espaciales (distancia y ángulos) entre sensores, superficies y fuentes; cámara y óptica con la que se realiza la adquisición de las imágenes; computador, en el que se realiza el tratamiento y análisis de la imagen; y tarjeta de adquisición.

La secuencia que se sigue en todos los sistemas de visión se puede establecer en los siguientes pasos: adquisición, digitalización, procesamiento y actuación. Para ello, se tienen diferentes alternativas en cuanto a hardware se refiere. Estas alternativas van desde una cámara analógica con tarjeta digitalizadora y un computador hasta una cámara inteligente que lleva incorporada una CPU en ella pasando por una cámara digital normal que se comunica con un computador. En la etapa de adquisición se requiere de la disponibilidad de una cámara, la cual lleva incorporada la óptica (objetivos), sensor e interfaz. La digitalización es el proceso de conversión de la señal eléctrica obtenida por el sensor a valores discretos (muestreo y cuantificación) y la construcción de una matriz bidimensional de valores que constituyen la imagen digital. Esta digitalización se puede producir en la misma cámara (cámaras digitales e inteligentes) o en una tarjeta digitalizadora (cámaras analógicas). Las etapas de procesamiento se realizan en la propia cámara (cámaras inteligentes) o en el computador. El resultado del procesamiento puede ser: detección (presencia o ausencia de algún objeto o característica), clasificación (determinar si algún objeto de interés pertenece a alguna categoría o clase), medición (cálculo de algún parámetro dimensional o físico), interpretación (cualquier decisión compleja). Posteriormente al procesamiento, se lleva a cabo la actuación en función de los resultados obtenidos, la cual puede ser la activación de elementos electromecánicos de algún tipo, la gestión de los movimientos de un robot, la regulación de algún proceso, la visualización de un resultado numérico, el seguimiento de algún objeto (por trayectoria), etc.

Las aplicaciones de visión siguen un esquema típico de etapas de procesamiento bien definidas, las cuales pueden diferenciarse si se realizan *on-line* (con el sistema de visión en funcionamiento) u *off-line* (sin la necesidad de realizarse con el sistema de visión funcionando). Después de la adquisición de la imagen, se realiza un preprocesamiento de la misma, en el cual se aplican diferentes procesos de modificación a la imagen con el fin de mejorarla en algún sentido. Obtenida la imagen con las condiciones deseadas, se realiza la segmentación de la misma. La segmentación consiste en un proceso que divide la imagen en un conjunto de objetos y fondo, y cuya finalidad es conseguir una detección más sencilla de los objetos. Con la segmentación hecha, se realiza la descripción de la imagen, que consiste en un proceso que etiqueta los objetos obtenidos en la segmentación teniendo en cuenta información tal como su textura, forma, tamaño, etc. Llegado a este punto, se puede realizar la etapa *off-line* del proceso, la cual consiste en el aprendizaje y abarca dos etapas en sí misma. La primera etapa del aprendizaje es el análisis de las características de todas las etiquetas obtenidas en la descripción, con el cual se pretende encontrar los patrones de similitud entre las diferentes etiquetas con el fin de poder llegar, en la segunda etapa del aprendizaje, a una

conclusión en función de la aplicación que se desarrolle. Volviendo a las etapas on-line, después de la descripción está el reconocimiento, proceso que identifica o clasifica los objetos etiquetados y en el cual se utilizan los datos obtenidos en el aprendizaje off-line para poder clasificarlos, e interpretación, proceso que coloca los objetos reconocidos en el contexto del mundo real. Y como paso final se encuentra el resultado final y la decisión, la cual se tomará en función de la interpretación que se realiza.



0.11 Etapas de procesamiento de imagen

Hasta ahora se ha hablado en varias ocasiones de la imagen, pero no se ha definido qué es la imagen y cómo se componen las imágenes. Una imagen se define como una pintura, una fotografía o cualquier otra forma de representación visual de un objeto o escena, siendo una proyección del mundo 3D en un plano 2D (plano de la imagen). Pero la imagen debe digitalizarse, por lo que se define una imagen digital como una matriz bidimensional de números enteros representados por un número finito de bits (comúnmente se utiliza un número de 8 bits para realizar las representaciones de la imagen). Esta matriz bidimensional está compuesta por píxeles, que viene a ser cada pequeña área a la cual se asigna un único número en una imagen digital. En el espacio de la imagen se designa a cada uno de los píxeles que la componen mediante un par de coordenadas (x, y) o (fila, columna). Para nombrar la cantidad de píxeles que se utilizan para representar una imagen se define la resolución espacial de la misma, según el número de píxeles por alto y ancho.

En una definición más formal de lo que es una imagen, se puede expresar como una función bivariada de intensidad luminosa $f(x, y)$ cuyo valor en el espacio de coordenadas (x, y) indica la intensidad de la luz en ese punto:

$$f(x, y) = i(x, y) r(x, y)$$

Donde $i(x, y)$ corresponde a la irradiación y $r(x, y)$ con la reflectancia.

La irradiación o cantidad de luz que incide en la escena, se determina por la fuente de luz y se mide en candelas. Puede tomar valores desde cero a infinito, aunque en la práctica no se conoce ninguna fuente de luz capaz de producir una irradiación infinita por lo que suele estar acotada entre un valor mínimo y un valor máximo que reciben el nombre de escala o niveles de gris. Estos niveles dependen del número de bits utilizados en la cuantificación de la imagen y anteriormente se menciona que lo más común es utilizar 8 bits para ello, por lo que comúnmente se tendrán 256 niveles de grises (de 0 a 255).

La reflectancia es la cantidad de luz que reflejan los objetos de la escena y que viene determinada por las características del objeto, ya que es un factor que nos indica la capacidad del objeto de reflejar la luz. Es una magnitud a-dimensional y está limitada entre cero y uno.

2.2.2 Cámaras y sensores

En los sistemas de visión artificial, el éxito de las fases de procesamiento y análisis depende altamente de la calidad de la información en las imágenes. Es sabido que la cámara es el dispositivo que, utilizando un juego de lentes (objetivo) reconstruye una imagen sobre un elemento sensible (sensor) y la transmite al sistema de adquisición del computador. Por tanto, la calidad de la imagen depende de la iluminación, de la óptica de la cámara y de los sensores utilizados para capturar la imagen.

Dentro de la óptica de la cámara se incluyen las lentes o conjunto de lentes (objetivo). Para la adquisición de una imagen, ésta debe proyectarse sobre una pantalla o superficie fotosensible (el sensor), y para poder conseguir esto se utilizan conjuntos de lentes que refractan la luz hasta situarla deseada sobre este elemento fotosensible. Una lente se compone de dos dióptricos sucesivos convexos (usualmente esféricos). En un dióptico esférico, todos los rayos que parten de un punto e inciden con el mismo ángulo, son proyectados en un punto del eje óptico denominado punto imagen. De igual manera, un punto que tiene su imagen en el infinito se dice que está a la distancia focal objeto y todos los puntos en el infinito se proyectan en un punto a la distancia focal imagen. A estos puntos se les conoce como punto focal objeto y punto focal imagen respectivamente y son básicos para definir el resto de parámetros de las lentes.

Entre los parámetros más destacados se encuentran:

- **Abertura relativa o número f:** Es la relación entre la longitud focal de la lente y su apertura (diámetro de la lente). La cantidad de luz que viene de un objeto y entra en el sensor a través de la lente está relacionada con dicha apertura.

Los objetivos vienen marcados con una serie de números f. en la que el primero es el valor de apertura máximo y los sucesivos pasos representan el cierre del iris para dividir por dos la cantidad de luz que entra por el objetivo, generando lo que se conoce como Escala estándar de números f.

- **Enfoque:** Un punto del objeto se proyecta como un pequeño círculo en el plano de la imagen y dicho punto estará bien enfocado si el círculo en la imagen es menor que un tamaño mínimo denominado círculo de confusión (o Blurr circle en inglés).
- **Profundidad de campo** (DOF en sus siglas en inglés, depth of field): Rango de distancias en las que un objeto está bien enfocado, sin perder nitidez, sobre el sensor.
Al utilizar aberturas más pequeñas (aumentar el número f) se aumenta la profundidad de campo, pero se requiere más iluminación para obtener un buen enfoque. La profundidad de campo es pequeña para objetos cercanos, por lo que se puede aumentar alejando el objeto o disminuyendo la longitud focal.
- **Aberraciones:** Debido al proceso de construcción de las lentes (que no es posible actualmente construirlas perfectamente esféricas) y a la variación del índice de refracción con la longitud de onda, las lentes no producen imágenes perfectas. Aparecen en las imágenes ciertas deformaciones o distorsiones denominadas aberraciones, las cuales pueden ser de dos tipos: monocromáticas (entre las que se pueden mencionar las aberraciones esféricas, de coma, astigmatismo o distorsión barril) y cromáticas (los distintos colores de onda se refractan en diferentes ángulos).

Para corregir este último parámetro y poder obtener una imagen nítida, se suele hacer uso de los objetivos, que consisten en un conjunto de lentes dispuestos de manera que proyecten la imagen libre de deformaciones y aberraciones sobre el plano donde reside el sensor. Existen distintos tipos de objetivos dependiendo del campo de vista, la longitud focal y el tamaño del sensor, pero pueden clasificarse en tres grandes grupos: estándar (con longitud focal similar al tamaño del sensor), gran angular (con longitud focal menor al tamaño del sensor) y teleobjetivo (con longitud focal mucho mayor que el tamaño del sensor).

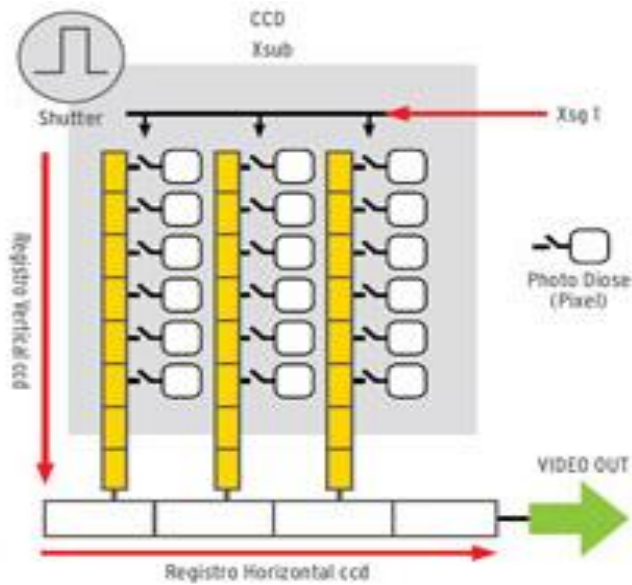
2.2.2.1 Tipo de sensores

Otro de los aspectos a tener en cuenta para la calidad de la imagen era el tipo de sensor que dispone la cámara. Esta puede ser de tubo (no muy utilizadas actualmente) o de sensor de estado sólido (CCD/CMOS). En estas últimas, debe diferenciarse así mismo entre una distribución lineal o matricial.

El funcionamiento de la tecnología CCD se debe a los dispositivos fotosensibles (fotosites) utilizados para la construcción del sensor, los cuales pueden ser fotodiodos, fotopuertas, generalmente de semiconductores de metal-óxido (MOS), o fototransistores FET. Cuando una fotopuerta se ve expuesta a la luz se generan pares electrón-hueco en el sustrato de silicio, de manera que al aplicar un potencial positivo al electrodo (puerta), éste atrae a los electrones que, al no poder atravesar el aislante (SiO₂), se acumulan en una zona debajo del mismo. A esta zona cargada se le denomina pozo de potencial, donde la carga obtenida es proporcional a la cantidad de luz incidente.

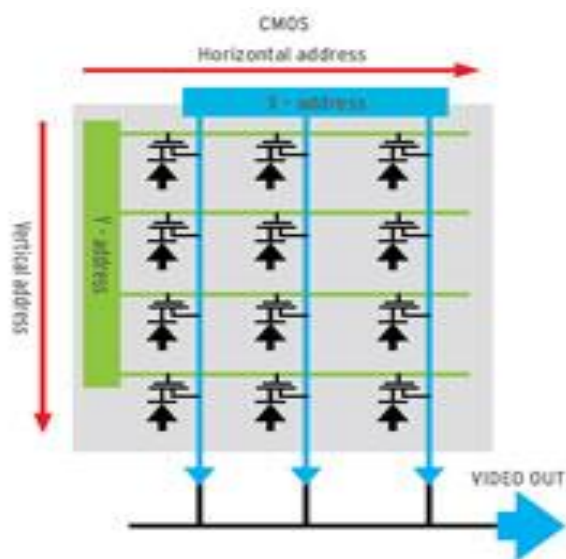
El sensor CCD se compone de registros de desplazamiento horizontal y vertical conectados entre ellos formando una matriz. Los registros verticales (VCCD) componen el área del CCD y se

emplean para la adquisición y el transporte vertical de las filas y los registros horizontales (HCCD) se emplean para la lectura de los pixeles de cada fila.



0.12 Arquitectura de CCD

La tecnología CMOS es una alternativa al CCD que surge a mediados de los 90. Tiene una arquitectura en la que cada celda es independiente de sus contiguas, por lo que no dependerán de ellas y se consigue evitar con ello la posibilidad de tener *blooming*, fenómeno que se produce cuando un pixel alcanza la saturación por la luz que incide sobre él y empieza a contagiar (saturar) los que están a su alrededor (algo que sí podría suceder en el caso de CCD al estar las celdas interconectadas entre sí). El fotosite está formado por un circuito de transistores y fotodiodos CMOS, es más barato y de más densidad de integración (resolución) que el CCD y tiene una lectura no destructiva.



0.13 Arquitectura CMOS

El CCD se encarga de recuperar la imagen a través de la lectura de las cargas por medio del desplazamiento sucesivo y de forma secuencial, convirtiéndolas en voltajes y entregando una señal analógica en la salida, que será posteriormente digitalizada por la cámara. Su estructura interna es muy simple, pero ello tiene como inconveniente la necesidad de un chip adicional que se encargue del tratamiento de la información proporcionada por el sensor, lo que se traduce en un gasto mayor en cuanto a equipos y tamaño ocupado. El CMOS por el contrario realiza la digitalización de los píxeles internamente en unos transistores que lleva cada celda, por lo que todo el trabajo se lleva a cabo dentro del propio sensor y no es necesario un chip externo encargado de esta función, con lo que se consigue reducir costes y disponer de equipos más pequeños.

En el aspecto del rango dinámico (coeficiente entre la saturación de los píxeles y el umbral por debajo del cual no captan señal) el CCD, al ser menos sensible que la tecnología CMOS, tolera mucho mejor los extremos de luz. Sin embargo, la menor sensibilidad conlleva una ventaja en condiciones pobres de iluminación, donde los CMOS se comportan mucho mejor. Esto se debe principalmente a que los amplificadores de señal se encuentran en la propia celda, de manera que hay un menor consumo en condiciones de igualdad de alimentación.

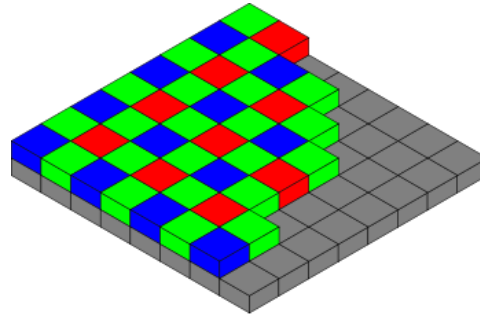
En cuanto al tratamiento del ruido, los CCD son superiores a los CMOS debido a que el procesamiento de la señal se lleva a cabo en un chip externo, el cual puede optimizarse mejor para realizar esta función aprovechando los convertidores A/D más rápidos y mejor procesados. En el CMOS en cambio, al realizarse todo el proceso de la señal dentro del mismo sensor, los resultados serán peores pues hay un menor espacio para colocar los fotodiodos encargados de recoger la luz.

Otro aspecto a tener en cuenta es la respuesta uniforme, que no es otra cosa que el resultado que se espera de un píxel sometido al mismo nivel de excitación que los demás y que dicho píxel no presente cambios apreciables en la señal obtenida. En este aspecto, el que un sensor CMOS esté constituido por píxeles individuales le hace más propenso a sufrir fallos que el CCD, que al ser toda la matriz de píxeles uniforme tiene un mejor comportamiento.

Y como último aspecto a comparar entre ambas tecnologías, se trata de la velocidad con la que permite trabajar cada uno de los sensores. En este caso, el CMOS es claramente superior al CCD debido a que todo el procesamiento se realiza dentro del propio sensor, ofreciendo mayor velocidad que al tener que realizar todas las conversiones A/D en un chip externo como es el caso del CCD.

Teniendo las características de cada uno de los tipos de tecnología empleados para la construcción de los sensores, habría que diferenciar entre si el sensor es monocromo (las imágenes serán detectadas en niveles de grises) o por el contrario se dispone de una cámara a color. Aunque el proceso de las imágenes color es más complejo, este tipo de cámaras pueden proporcionar más información que las cámaras monocromo y son por tanto para determinadas aplicaciones tanto industriales como científicas. Existen dos tipos de cámaras a color: las compuestas por un único CCD y las que disponen de 3 CCD.

Las cámaras de color de 1 CCD incorporan un sensor con un filtro en forma de mosaico que incluye los colores primarios RGB. De hecho, el sensor es un sensor monocromo al que se le ha superpuesto el filtro de color, conocido como filtro Bayer el más utilizado para ello. La forma en que se disponen los colores R, G y B es como se muestra en la siguiente figura.

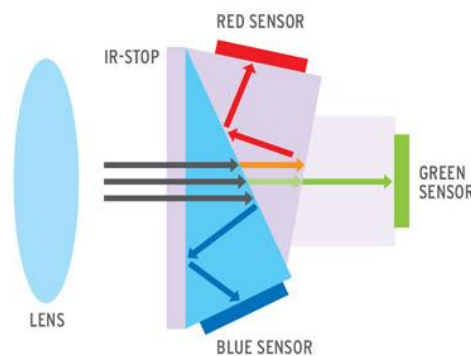


0.14 Filtro de Bayer (RGB)

Se puede observar que hay el doble de píxeles con filtro verde que con filtro azul o rojo. Esto se debe a que la visión humana es más sensible al verde y se hace para hacer más semejante la percepción del sensor a nuestra propia visión.

Debido al carácter del propio filtro, en los píxeles donde se sitúa el filtro rojo no tienen señal ni de verde ni de azul. Para solventar la falta de estos colores en estos píxeles, se construye una señal RGB a partir de los píxeles adyacentes de cada color. Este cálculo se puede realizar en el interior de la cámara mediante un circuito DSP específico, que permite realizar la operación en tiempo real, y dependiendo de la cámara se obtiene una señal analógica o digital en RGB; o bien en el propio PC, al que algunas cámaras transmiten la señal del sensor de forma digital y donde mediante un programa apropiado se realiza la transformación y permite visualizar la imagen en color.

Las cámaras de color de 3 CCD incorporan un prisma (separador de haz) y tres sensores monocromos independientes. La luz procedente del objeto pasa a través de la óptica y se divide en tres direcciones al llegar al prisma, donde en cada uno de sus tres extremos se encuentra un filtro de color (rojo, verde y azul) y un sensor que captura la luz de cada color que viene del exterior. Internamente la cámara combina los colores y genera una señal RGB similar a la que ve el ojo humano.

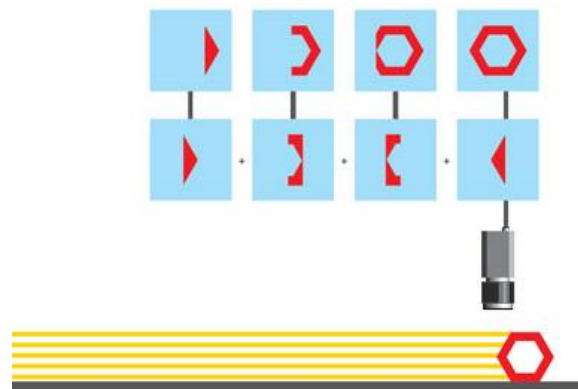


0.15 Cámara de color de 3 CCD

La fidelidad de las imágenes de las cámaras de 3CCD es muy superior a las de las cámaras de 1 CCD, pero existen algunos inconvenientes inherentes al sistema de visión que deben tenerse en cuenta. Por una parte, este tipo de cámaras requieren más luz debido a que el prisma hace que sea menor la cantidad de iluminación que incide sobre los sensores; y por otra parte, se genera un efecto de aberración cromática debida a la propia estructura del prisma, aunque este efecto puede ser subsanado colocando ópticas diseñadas específicamente para este tipo de cámaras.

En cuanto a la disposición física de los sensores, estos pueden estar distribuidos linealmente o matricialmente como se dijo con anterioridad.

Las cámaras lineales construyen la imagen línea a línea realizando un barrido del objeto junto con un desplazamiento longitudinal del mismo. Utilizan sensores lineales que acostumbran a tener entre los 512 y 16.000 píxeles, con una longitud lo más corta posible y con una gran calidad con el fin de obtener la mejor sensibilidad y prestaciones. El hecho de construir una imagen de alta calidad a partir de líneas individuales independientes requiere un alto grado de precisión, por lo que la alineación y el sincronismo del sistema son críticos para obtener una imagen correcta del objeto a analizar. Fue desarrollada para aplicaciones de inspección de materiales fabricados en continuo, como telas, papel, vidrio, planchas de metal, etc. Este tipo de materiales no tienen un inicio y un fin definido (son de una longitud indeterminada), por lo que las cámaras lineales pueden capturar una imagen de una anchura conocida (el tamaño del sensor) y de una longitud ilimitada y desconocida.



0.16 Imagen de barrido con cámara lineal

Se clasifican habitualmente en términos de número de elementos del sensor y en velocidad, de modo que cuanto mayor es el número de elementos mayor será el tamaño del sensor y mayor será por tanto el tamaño de la óptica que se necesita. En cuanto a la velocidad, se refiere al número de píxeles capaces de ser leídos por unidad de tiempo, que en las cámaras lineales acostumbra a ser mucho más alto que en las cámaras matriciales (en los últimos modelos de cámaras se puede llegar a velocidades superiores a los 1.100MHz.). En la mayoría de aplicaciones que se utiliza una cámara lineal la velocidad de los objetos que pasan frente a la cámara varía entre uno y otro, y por tanto es necesario sincronizar la velocidad de lectura de la cámara con la velocidad de movimiento del objeto. Esto se hace enviando una señal de trigger externo generado a intervalos de espacio regulares de forma que las líneas se

sincronicen con el movimiento (generalmente se hace mediante un encoder de modo que la máxima velocidad de lectura de líneas vendrá dado por la velocidad de la cámara, es decir en líneas por segundo).

En cuanto a las cámaras matriciales se refiere a que el sensor de la cámara cubre un área o que está formado por una matriz de píxeles. Una cámara matricial produce una imagen de un área, normalmente con una relación de aspecto de 4:3 (aunque esta relación viene de los tiempos de las cámaras Vidicón y de los formatos de cine y televisión y actualmente existen muchas cámaras que ya no la mantienen y se adaptan a los nuevos formatos de alta definición 16:9). Las principales características de estas cámaras son: el factor de relleno o porcentaje del área de píxel que es sensible a la luz (el ideal es el 100%, aunque este porcentaje es imposible de obtener por la separación entre los registros) y el tipo de transferencia, que puede ser de varias maneras: transferencia Inter-línea (ITL), son los más comunes y utilizan registros de desplazamiento situados entre las líneas de píxel para almacenar y transferir los datos de la imagen lo que permite una alta velocidad de obturación; transferencia de cuadro, que disponen de un área dedicada al almacenamiento de la luz, la cual está separada del área activa, permitiendo un mayor factor de relleno aunque se pierde velocidad de obturación con ello; y cuadro entero, son los de arquitectura más simple, emplean un registro paralelo para exposición de los fotones, integración de la carga y transporte de la misma, alcanzando con este sistema factores de relleno del 100%.

2.2.2.2 Parámetros de la cámara

Definidas las características físicas de una cámara, es necesario remarcar algunos de sus parámetros más importantes, entre los que destacan:

- Resolución del sensor: Viene determinada por el número de píxeles y el tamaño de los mismos.
- Tamaño del sensor: A mayor tamaño, se podrán obtener mejores imágenes.
- Sensibilidad y respuesta: Dan una idea de la respuesta del sensor en relación a la cantidad de luz incidente sobre el mismo.
- Curva de respuesta espectral: Gráfica con la respuesta relativa a diferentes longitudes de onda
- Linealidad: Rango del flujo luminoso de entrada sobre el que la señal de salida es una función lineal de la entrada. La no linealidad del sensor puede producir problemas en las aplicaciones de procesamiento de imágenes, sobre todo cuando se utilizan varias imágenes tomadas bajo condiciones luminosas diferentes.
- Relación señal/ruido: Mide la proporción de ruido de una cámara en relación al nivel de señal obtenido. Un valor SNR mínimo recomendado es de 45 dB (señal 316 veces mayor que el ruido).
- Rango dinámico: Es el Intervalo útil de la señal de salida del sensor y depende en gran medida de la sensibilidad del propio sensor.
- Frame rate: es la velocidad de captura de imagen. Se mide en cuadros por segundo o fps (frames per second).

2.2.3 Iluminación

Explicada la óptica de la cámara y los sensores utilizados para capturar la imagen, queda el tercer elemento de mayor importancia a la hora de una buena calidad de la imagen, y no es otro que la iluminación, que es así mismo la parte más crítica dentro de un sistema de visión.

El éxito de un sistema de visión industrial depende más del buen diseño del sistema de iluminación que de un análisis sofisticado de la imagen. Las características de la fuente luminosa tienen una gran repercusión sobre las prestaciones y el coste de un sistema de visión. La imagen (representación de la información de la escena) es una función de: las fuentes de luz (tipo de iluminación), la forma de aplicar la luz sobre la escena (técnica de iluminación), las características de la superficie (capacidad de reflexión, rugosidad, etc.) y las relaciones espaciales (distancia y ángulos) entre sensores, superficies y fuentes.

Las cámaras, por el momento, son mucho menos sensibles y versátiles que la visión humana y las condiciones de iluminación deben optimizarse al máximo para que una cámara pueda capturar una imagen que el ojo humano podría distinguir sin necesidad de una iluminación tan especializada. Esto se hace mucho más evidente cuando el objeto a iluminar presenta formas complejas o superficies muy reflectantes, de modo que un buen sistema de iluminación reduce la complejidad de la imagen a analizar y debe resaltar características de la escena u objetos de interés, o suprimir aquellos detalles que no sean relevantes para el problema a tratar. Si se utiliza una iluminación adecuada, la aplicación se resolverá más fácilmente, mientras que si la misma aplicación recibe una iluminación incorrecta puede que sea imposible de resolver.

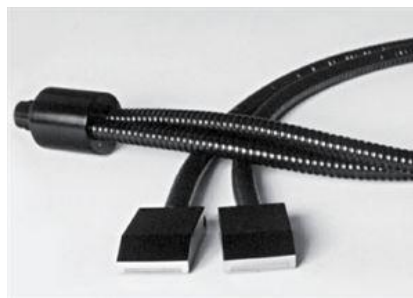
Las cámaras de visión artificial capturan la luz reflejada de los objetos. El propósito de la iluminación utilizada en las aplicaciones de visión es controlar la forma en que la cámara va a ver el objeto. Hay un cierto número de consideraciones a tener en cuenta para determinar la mejor iluminación para una aplicación de visión tales como si es de color o monocromo, si la aplicación es de alta velocidad, cuál es el campo de visión que debe iluminarse, las características materiales y físicas del objeto, qué fondo tiene la aplicación, qué duración debe tener el sistema de iluminación, etc.

2.2.3.1 Tipos de iluminación

La respuesta a estas preguntas dará el tipo y la técnica de iluminación a utilizar en el sistema de visión. Entre ellos hay varias opciones que se enumeran a continuación.

Básicamente se pueden definir 4 tipos de iluminación utilizables en los sistemas de visión: iluminación por fibra óptica, iluminación por fluorescentes, iluminación por diodos LED e iluminación por láser. Los factores más importantes para escoger el tipo de iluminación son su intensidad lumínica, su duración, su tiempo de respuesta, sus requerimientos de refrigeración, su coste y la flexibilidad de diseño.

La iluminación por fibra óptica es la que puede proporcionar la luz más intensa de todos los tipos de iluminación que se utilizan en el campo de la visión artificial. La idea básica es conducir la luz procedente de una lámpara halógena o de xenón que se encuentra conectada a una fuente de iluminación a través de un haz de fibras ópticas que termina en un adaptador específico para cada tipo de aplicación. Estos adaptadores pueden tener forma circular, lineal, puntual, de panel, difusores axiales, etc. y pueden ser de distintas dimensiones. En los haces de fibra óptica hay cierta pérdida de intensidad con relación a la longitud, por lo que normalmente se desaconseja utilizar haces de fibra óptica de una longitud superior a 5 metros, ya que por una parte se pierde intensidad y por otra el precio aumenta considerablemente. Una de las principales ventajas de la fibra óptica es que proporciona luz fría (el calor se genera en la fuente de iluminación), por lo que es ideal en aplicaciones donde los sistemas que puedan emitir calor sean un inconveniente o también en entornos deflagrantes.



0.17 Iluminación por fibra óptica

El tubo fluorescente es una lámpara de vapor de mercurio a baja presión, utilizada para la iluminación industrial. Está formada por un tubo de vidrio revestido interiormente con una sustancia que contiene fósforo y otros elementos que emiten luz al recibir una radiación ultravioleta de onda corta. El tubo contiene una pequeña cantidad de vapor de mercurio y un gas inerte, habitualmente argón o neón, sometidos a una presión ligeramente inferior a la presión atmosférica. Asimismo, en los extremos del tubo se encuentran dos filamentos hechos de tungsteno. Su gran ventaja frente a otro tipo de lámparas, como las incandescentes, es su eficiencia energética.

Los tubos fluorescentes se usan en muchas ocasiones en aplicaciones de visión artificial, aunque debido a su limitada variedad de formas (existen tan solo fluorescentes circulares, paneles y lineales, que son lo más comunes), también es restringida su utilización. En aplicaciones de visión no pueden utilizarse fluorescentes estándar debido a su efecto de parpadeo, que dependiendo de la velocidad a la que funcione la cámara puede verse reflejado en la intensidad de la imagen capturada, y a que no presentan un balance de color uniforme, incorporando longitudes de onda mayoritariamente azules. Es por ello que para las aplicaciones industriales es necesario que los fluorescentes funcionen a alta frecuencia, al menos a 25kHz., con el fin de evitar el mencionado parpadeo y que funcionen con un espectro conocido (es habitual utilizar fluorescentes casi monocromáticos: ultravioletas, amarillos, verdes, azules, etc.).

Para aplicaciones donde se requiere una gran intensidad de iluminación y una larga longitud, se utilizan fluorescentes de apertura, en estos fluorescentes la luz se emite sólo en una dirección y con un ángulo muy estrecho, lo que permite que la intensidad lumínica pueda ser hasta 10 veces superior a la de un fluorescente estándar.

Las fuentes de alimentación que proporcionan electricidad a los fluorescentes pueden venir equipadas con fotodiodos que permiten controlar y regular automáticamente la estabilidad de la luz en todo momento, de manera que cuando la intensidad de la luz del fluorescente disminuye, la fuente hace que se compense la potencia hasta volver a la intensidad anterior. Los fluorescentes tienen una vida media suficientemente extensa (de unas 10.000 horas) y la ventaja con respecto a los sistemas basados en LEDs es que no debe substituirse todo el sistema sino sólo el fluorescente.



0.18 Iluminación por fluorescente

Un LED (Light-Emitting Diode), es un dispositivo semiconductor que emite luz de espectro reducido cuando se polariza de forma directa la unión P-N del mismo y circula por él una corriente eléctrica. Este fenómeno es una forma de electroluminiscencia. El color (longitud de onda) de la luz emitida depende del material semiconductor empleado en la construcción del diodo y puede variar desde el ultravioleta, pasando por el visible, hasta el infrarrojo.

Actualmente, en la mayoría de aplicaciones de visión artificial se utilizan los LED debido a su reducido tamaño, su eficiencia energética y su bajo precio. Proporcionan una intensidad de iluminación media, que en relación a su coste resulta una característica muy interesante. Asimismo, actualmente se están introduciendo los LED de alta intensidad, que incrementan el rendimiento lumínico de estos sistemas. Tienen además una larga vida, de aproximadamente 100.000 horas, y una de sus principales ventajas es que pueden diseñarse sistemas de iluminación de todo tipo tales como anillos, paneles, iluminadores puntuales, lineales, rectangulares, chip on board, etc.

La facilidad de utilizar los sistemas LED en modo estroboscópico (efecto óptico que se produce al iluminar mediante destellos, un objeto que se mueve en forma rápida y periódica. Cuando la frecuencia de los destellos se aproxima a la frecuencia de paso del objeto ante el observador, éste lo vera moverse lentamente, adelante o atrás dependiendo que la frecuencia de los destellos sea, respectivamente, inferior o superior a la de paso del objeto), permite su

utilización con todo tipo de cámaras y se utiliza, además, para incrementar la potencia lumínica, respetando la vida media de estos sistemas.

Los primeros sistemas basados en LED emitían únicamente luz de color rojo, pero actualmente se está extendiendo el uso de otros colores como infrarrojo, verde, azul, ultravioleta y blanco. Sin embargo, los LED rojos siguen siendo los más utilizados en los sistemas de visión porque son los más fáciles de encontrar, los de más bajo coste y también porque la mayoría de cámaras son especialmente sensibles al espectro rojo.

La iluminación infrarroja está dando muy buenos resultados en aplicaciones en monocromo, especialmente ahora que se disponen de cámaras con una alta sensibilidad al infrarrojo. Utilizando LED infrarrojos y filtros infrarrojos en la óptica de la cámara, las variaciones en la luz ambiente no afectan tanto a la aplicación, ya que la luz solar y la luz artificial no acostumbra a llevar demasiada emisión infrarroja.



0.19 Iluminación por LED

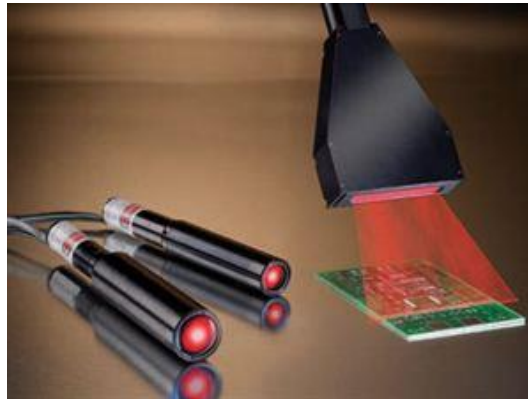
La iluminación mediante láser o luz estructurada se utiliza normalmente para resaltar o determinar la tercera dimensión de un objeto, en aplicaciones de percepción de profundidad y para inspecciones en 3D. El método utilizado se basa en colocar la fuente de luz láser en un ángulo conocido con respecto al objeto a iluminar y con respecto a la cámara, de forma que viendo la distorsión de la luz (que se traducen en variaciones de altura) puede interpretarse los cambios de profundidad o altura del objeto a medir. Por tanto, se puede también determinar la falta o exceso de material, o bien se puede llegar a hacer una reconstrucción en tres dimensiones del objeto. Las líneas láser también se utilizan en numerosas ocasiones para indicar el trazado por el que se debe ajustar un proceso, por ejemplo en aplicaciones de corte.

Para obtener la mejor reconstrucción 3D se debe obtener un tamaño de línea lo más delgada posible, sobre un fondo con muy baja o nula iluminación. La mayoría de láseres que se utilizan en visión industrial utilizan lentes cilíndricas para convertir el punto láser en un patrón. Aunque a primera vista este sistema parece correcto, la intensidad lumínica a lo largo de la línea presenta una forma gaussiana, haciendo la detección mucho más difícil a nivel de software. Es por ello que los sistemas de láser más avanzados utilizan sistemas complejos no gaussianos que proporcionan una iluminación relativamente constante a lo largo de toda la línea, facilitando las medidas en las aplicaciones de visión.

Existe un gran número de patrones disponibles, entre los que se incluyen: una línea, múltiples líneas paralelas, patrones de puntos, círculos concéntricos, mallas y cruces, que se

utilizan dependiendo de la aplicación. Los sistemas de luz estructurada láser están disponibles en distintos tipos de potencias y longitudes de onda. Dependiendo de la longitud de onda y de la potencia, los láseres se clasifican según su grado de afectación o peligrosidad. Los láseres utilizados para visión artificial acostumbran a corresponder a las Clases II, IIIA, o IIIB.

Así mismo, se han realizado diseños específicos para aplicaciones concretas tales como sistemas de líneas ultra finas o sistemas láser conectados a fibra óptica para aplicaciones en ambientes con peligro de deflagración.

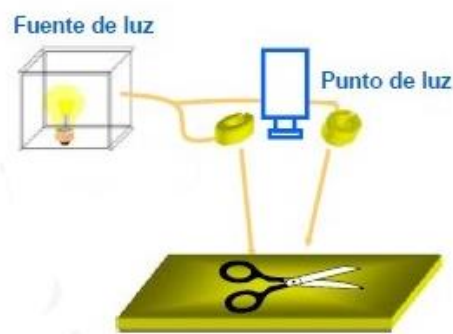


0.20 Iluminación por láser

2.2.3.2 Técnicas de iluminación

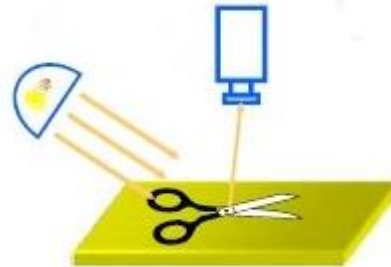
Conocidos los diferentes tipos de iluminación, para cada uno de ellos existen múltiples técnicas de utilización, las cuales se utilizan para resaltar diferentes aspectos de las piezas que se van a analizar en una aplicación de visión artificial. Las técnicas más utilizadas son las siguientes:

- **Iluminación frontal o de campo claro:** Es la técnica de iluminación más común. La cámara se posiciona mirando al objeto en la misma dirección de la luz y recibe la luz reflejada del objeto. Este tipo de iluminación se consigue mediante anillos de luz, iluminadores puntuales, de área y lineales. Es especialmente útil en superficies con pocos reflejos (papel, tela, etc.).



0.21 Iluminación frontal

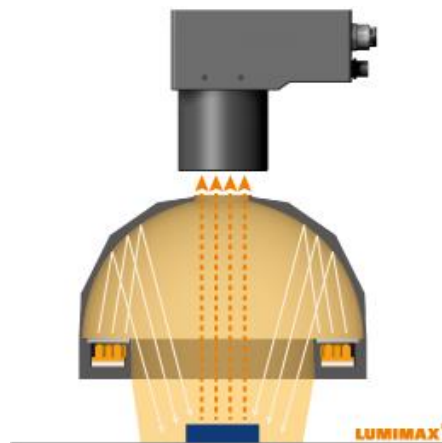
- **Iluminación lateral:** Es la técnica de iluminación que se utiliza para resaltar ciertos detalles en las piezas que sólo son visibles orientando la luz de forma lateral a la posición de la cámara. Lo que define a la iluminación lateral es que la fuente de luz se ubica a un costado del objeto que queremos fotografiar, creando un ángulo de 90° con la cámara y el objeto. Este tipo de iluminación da lugar a imágenes contrastadas con una zona altamente iluminada y otra repleta de sombras.



0.22 Iluminación lateral

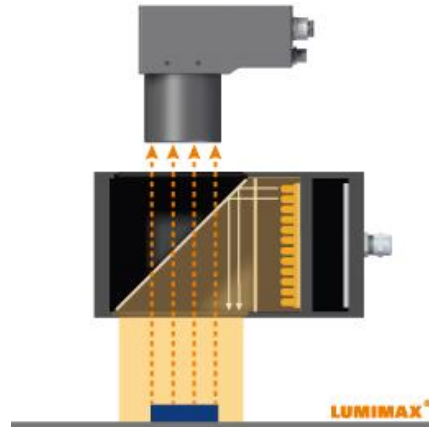
- **Iluminación difusa:** Hasta la fecha, la iluminación difusa se ha realizado con iluminación de tipo domo. La técnica denominada Difusión Continua ofrece el máximo nivel posible de rendimiento en iluminación difusa ya que combina iluminación reflectante en una cúpula esférica e iluminación coaxial en la parte superior. A esta iluminación se le denomina también “iluminación de día nublado”, pues no produce ningún tipo de sombra. Puede utilizarse para iluminar las superficies especulares más complejas, como por ejemplo instrumental médico, espejos, latas, etc.

Recientemente se han diseñado sistemas de iluminación del tipo domo con formatos planos que ocupan menos de un centímetro de espesor, al contrario que los sistemas de iluminación difusa utilizados en la actualidad que requieren un gran espacio entre la cámara y el objeto a iluminar. Este tipo de iluminación incorpora una lámina de material especial transparente que difracta la luz perpendicularmente y produce una iluminación completamente homogénea y difusa.



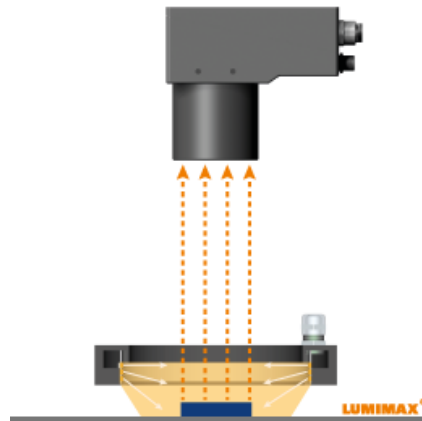
0.23 Iluminación difusa con domo

- **Iluminación coaxial o sobre el mismo eje:** Esta es una técnica que se usa para iluminar objetos reflectantes. La luz se emite de forma lateral sobre un espejo semitransparente que desvía los haces de luz en la misma dirección que el eje de la cámara, consiguiendo de esta forma una luz difusa homogénea. Esta técnica es ideal para inspección de objetos muy reflectantes, como PCB, etiquetas reflectantes, inspección de impresión sobre aluminio, etc.



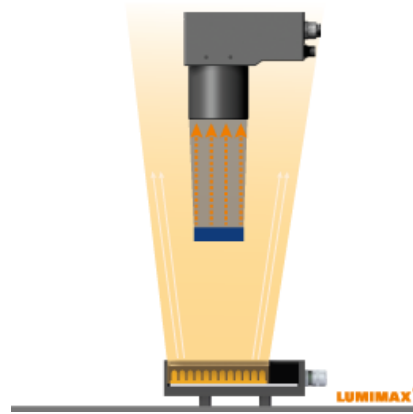
0.24 Iluminación coaxial

- **Iluminación por campo oscuro (dark field):** Esta técnica se utiliza para resaltar los defectos superficiales, grietas, surcos, etc. o para detectar, identificar y leer caracteres, códigos de matriz o barras grabadas en una superficie. Normalmente, se utilizan anillos de luz que emiten la luz en dirección perpendicular a la cámara.



0.25 Iluminación por campo oscuro o 'dark field'

- **Iluminación por contraste o retroiluminación (back light):** Esta técnica se utiliza situando el objeto entre la iluminación y la cámara. De esta manera se puede reconocer la silueta del objeto por contraste y realizar mediciones muy precisas, aunque no permite reconocer los detalles superficiales de las piezas a inspeccionar. Se utiliza también en aplicaciones con materiales translucidos o transparentes para visualizar manchas, rayas, grietas...



0.26 Iluminación por contraste o 'back light'

2.3 Transductores: Encoders

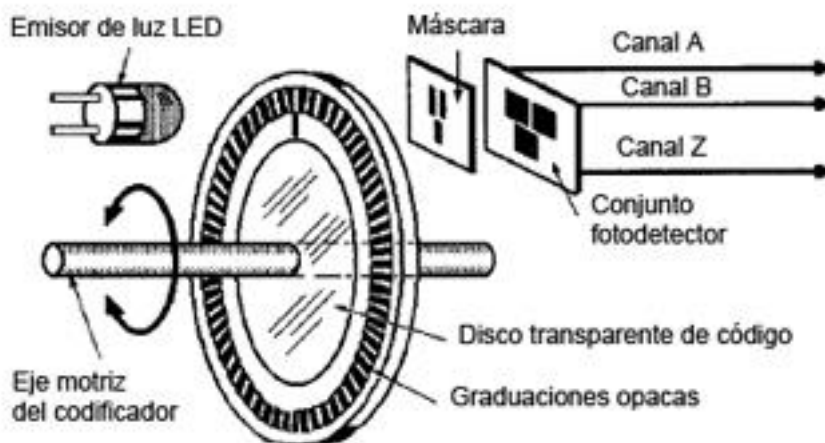
Un transductor es simplemente un dispositivo que proporciona una salida utilizable en respuesta a una magnitud física, propiedad o condición específica la cual se desea medir. Normalmente, se trata de un dispositivo que se utiliza para convertir un fenómeno físico en una señal eléctrica. Los transductores son conocidos por diferentes nombres en las distintas disciplinas, tales como sensores, detectores o captadores. Se puede distinguir en ellos de manera genérica las siguientes partes: sensor o sonda, en contacto con la magnitud física a medir; mecanismos auxiliares; captador, el cual proporciona una cierta señal eléctrica; y preamplificador o acondicionador de la señal. La descripción de un transductor se basa en las siguientes características: su magnitud (lo que se intenta medir), su principio de transducción (principio operativo por el que se genera la señal de salida), elemento sensor (el cual responde directamente a la magnitud que se mide), prestaciones y ventajas frente a otros transductores y principales características (rango de operación, sensibilidad, robustez, etc).

A partir de esta descripción surgen dos clasificaciones: según el método de transducción o según la variable que son capaces de medir. Generalmente, su clasificación se realiza en función del primer criterio, diferenciando entre transductores pasivos y activos. Los transductores pasivos o de parámetro variable se caracterizan por proporcionar una salida relacionada con la variación de un determinado parámetro eléctrico pasivo, originada a su vez por una variación del fenómeno físico que se desea medir. En este grupo se encuentran los capacitivos, resistivos e inductivos. Por otro lado, los transductores activos o autogeneradores producen una señal eléctrica (sin requerir alimentación externa) cuando son estimulados por alguna forma física de energía: electromagnéticos, piezoeléctricos, fotovoltaicos, etc.

Existen otros transductores que por su naturaleza no encajan en los dos grupos anteriormente definidos pero que por sus numerosas aplicaciones deben conocerse, como puede ser al caso de los transductores digitales, donde destacan los encoders. Siendo estrictos, este tipo de transductores debería medir una magnitud física en la entrada y producir un

código digital a la salida, aunque muy pocos dispositivos dan una salida digital en respuesta a un fenómeno natural y es muy común tener un transductor que produce un tren de pulsos digitales en respuesta a dicho fenómeno (en lo que podría considerarse un comportamiento cuasi digital). En el primer caso entran los codificadores digitales (encoders) absolutos y en el segundo caso los codificadores incrementales, siendo ambos utilizados ampliamente como codificadores de posición (para medir posiciones lineales o angulares) y para medir velocidades.

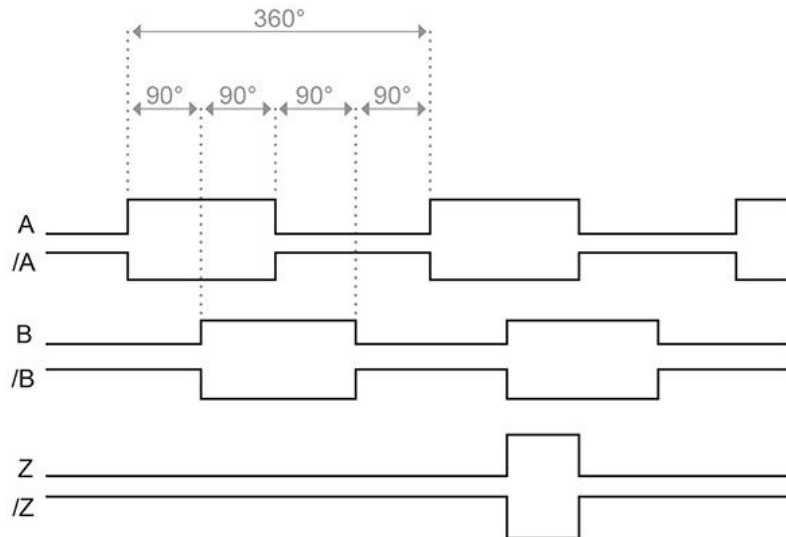
Un codificador incremental está basado en un elemento o disco que se desplaza solidario a objeto cuya posición se quiere determinar, de manera que el elemento está constituido por dos tipos de patrones con características diferentes y dispuestos de forma alternativa, detectando los incrementos de posición mediante un dispositivo sensor. Las propiedades empleadas para diferenciar los patrones pueden ser magnéticas, eléctricas u ópticas, siendo esta última la más utilizada debido a la gran exactitud que se consigue en su fabricación. En este caso, los codificadores consisten en un par de discos siendo uno de ellos fijo y el otro girando solidariamente al cuerpo cuyo desplazamiento se quiere medir. Estos discos son opacos pero con una serie de ventanas que dejan pasar la luz emitida (generalmente por un dispositivo LED): el fijo con una sola ventana y el móvil con dos pistas (A y B) de ventanas equiespaciadas a lo largo del mismo de manera que una queda desplazada media ventana con respecto a la otra. Detrás del segundo disco se encuentran dos detectores de luz, estando cada uno de ellos alineado con una de las pistas. Conforme el disco gira, la luz entra y deja de hacerlo alternativamente coincidiendo con las ventajas y regiones opacas respectivamente; obteniéndose con ello unos pulsos que se envían a un contador que proporcionará la cuenta correspondiente a la posición alcanzada relativa a una referencia inicial.



0.27 Encoder incremental con 3 canales

Con un solo canal (A) se obtiene la información referida a la magnitud de la rotación pero para disponer de la información del sentido de giro se hace necesaria la existencia de las dos pistas (A y B). De esta manera, si los pulsos en B adelantan a los de A, el disco gira en sentido horario mientras que si los pulsos de B retrasan a los de A el sentido de giro es antihorario. Así

mismo, muchos codificadores incluyen un tercer canal de salida (Z) para obtener una referencia, activada una vez por revolución y pudiendo ser alineada con una referencia mecánica como el eje del motor. También se puede disponer de las negadas de cada una de las tres señales (/A, /B y /Z), utilizadas en entornos donde hay mucho ruido y/o largas longitudes de cable con la finalidad de comprobar que no existen errores durante la transmisión (se compara la señal A con su negada /A, debiendo ser iguales en periodo y transición).



0.28 Canales de salida de encoder incremental

Hay ciertas características que definen a un encoder, entre ellas las más importantes son:

- Pulsos por revolución (PPR), cuanto mayor sean los pulsos por revolución, menor será el ángulo entre cada pulso. Es un número fijo para encoders incrementales normal.
- Drivers de salida: se diferencian en dos grupos principales hoy en día.

- o HTL (push-pull), conocidos también como Tótem-Pole, proporcionan un nivel de señal que corresponde a la tensión de alimentación aplicada, típicamente de 8 a 30 VDC.

Generalmente, una señal por encima de 3 V es un 1 lógico y una señal de menos de 1 V es una lógica 0. Debido a la mayor diferencia de tensión entre la lógica 0 y 1, la lógica de HTL es más inmune a interferencias y más resistente contra el ruido eléctrico.

- o TTL (RS422), proporcionan un nivel de señal de 5 V constante que no depende de la tensión de alimentación. Se pueden seleccionar dos rangos de tensión de alimentación: entre 4.75 y 5.5 VDC (se puede utilizar para sustituir a los controladores de salida de colector abierto) o de 8 a 30 VDC. Las salidas diferenciales que proporcionan tienen mayor capacidad de respuesta de frecuencia y mejor inmunidad al ruido.

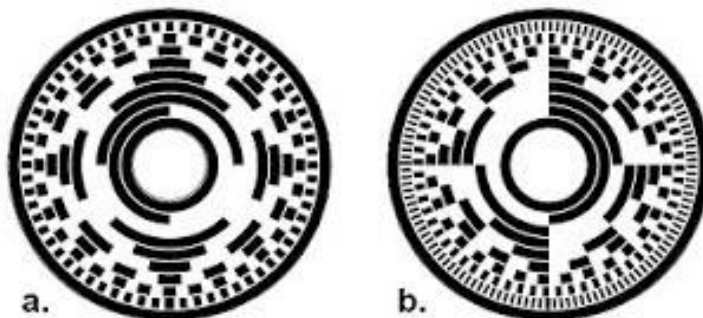
Comúnmente, una señal por encima de 2 V se interpreta como lógica 1 y una señal de menos de 0,8 V se interpreta como lógica 0.

- Ciclo de trabajo: El ciclo de trabajo describe la relación entre el tiempo de "alto" y tiempo "bajo" de un encoder incremental. Típicamente esta relación es de 50/50, lo que equivale a 180° el alto y el 180° bajo.
- Respuesta máxima en frecuencia: Es la máxima frecuencia a la cual el encoder responde eléctricamente. Se refiere al número de impulsos de salida que el encoder puede emitir por segundo y está relacionada con la velocidad de giro del eje del encoder y con el número de impulsos del mismo siguiendo la expresión:

$$Frecuencia (Hz) = \frac{Pulsos\ por\ revolucion(PPR) \times Revoluciones\ por\ minuto(RPM)}{60}$$

Los codificadores absolutos por su parte, proporcionan una salida digital de un determinado número de bits que está relacionada directamente con la posición absoluta de desplazamiento. Su apariencia es muy similar a los incrementales, cambiando el diseño de los patrones de las ventanas en el disco móvil, tanto en disposición como en número de pistas (generalmente, mayor o igual a 4). Se necesitará por tanto un mayor número de detectores (uno por pista), de manera que da un "1" cuando se detecta la luz y un "0" en caso contrario. La combinación de las salidas digitales de cada uno de los sensores dará un determinado código que se relaciona con la posición absoluta del encoder.

En la práctica, esta disposición trae problemas debido a su dificultad de fabricación (creciente con el número de pistas que se disponga), pues los límites de las ventanas deben estar perfectamente alineados entre sí para evitar conmutaciones en diferentes instantes de tiempo, lo que da lugar a códigos de salida erróneos. Como solución a ello, se implementan dos soluciones: incluir una pista externa adicional (pista anti ambigüedad) que junto con el detector correspondiente actúa como habilitador de la salida; o utilizar un patrón de ventanas siguiendo un código especial, código de Gray, que se caracteriza porque solo cambia un bit de una representación digital a la siguiente, realizándose posteriormente la traducción de código Gray a binario por lógica externa o un computador.



0.29 a) Código Gray

b) Código binario

2.4 Grupo Dulcesol

El presente proyecto se realiza enfocado para la empresa DULCESA S.L, la cual forma parte del grupo Dulcesol que es la marca comercial que distingue a un grupo de empresas de capital íntegramente valenciano, y que colabora con el Instituto de Automatización e Informática Industrial (Ai2) de la Universidad Politécnica de Valencia con la finalidad de estudiar, analizar e implementar en el sector alimentario, nuevas tecnologías que permitan el agarre de productos de bollería y panadería industrial de extrema fragilidad, y realizar su entrega a diversas líneas de producción atendiendo a criterios específicos de empaquetado y embolsado. Si bien el proyecto no está incluido dentro del propio marco de la colaboración existente, se ha realizado en función de ciertas características propias de la empresa con la finalidad de que pudiera relacionarse uno con otro.

Los orígenes del grupo Dulcesol se remontan a la década de 1950, y se inician a partir de un pequeño negocio familiar de panadería y pastelería tradicional en Villalonga (Valencia), constituyendo un ejemplo paradigmático de empresa familiar que ha consolidado su posición a la vanguardia del sector de la alimentación. La actividad más importante del Grupo DULCESOL es la fabricación y comercialización de productos de bollería, pastelería y panadería industrial. Pero esta actividad se ve complementada mediante la explotación de una granja avícola destinada a la producción de huevos para consumo, así como una planta ovo productora donde se obtiene el huevo líquido para abastecer a las fábricas.

El logro de lo que hoy en día representa el grupo Dulcesol, se encuentra cimentado bajo la perseverancia de su fundador, Antonio Juan. Las duras jornadas de trabajo en la panadería de su padre le hicieron plantearse el inicio de otro tipo de negocios pero, sin embargo, su carácter emprendedor le condujo a asociarse con los tres horneros de Villalonga para crear una panificadora a través de la cual poder suministrar el pan incluso a los pueblos colindantes. Tras unos años boyantes, dada la carestía de pan y la amplitud del mercado, hacia mediados de los años sesenta se produjo un aumento considerable de panificadoras que puso en peligro la continuidad de la empresa.

El espíritu pragmático que desde sus inicios ha caracterizado a la empresa determinó un nuevo giro que impulsaría el nacimiento de Dulcesol como compañía. La merma en ventas de pan por la elevada competencia llevó al fundador y a su mujer a realizar pruebas con otro tipo de productos, iniciando así su introducción en el mercado de la bollería y pastelería tradicional. La rápida aceptación que tuvieron estos artículos determinó que la familia Juan-Fernández fundara, a principios de los años 70, la planta de producción de Villalonga. Siete años más tarde inaugurarían una nueva planta en Gandía, dando lugar así a los dos principales centros de producción del grupo en la actualidad.

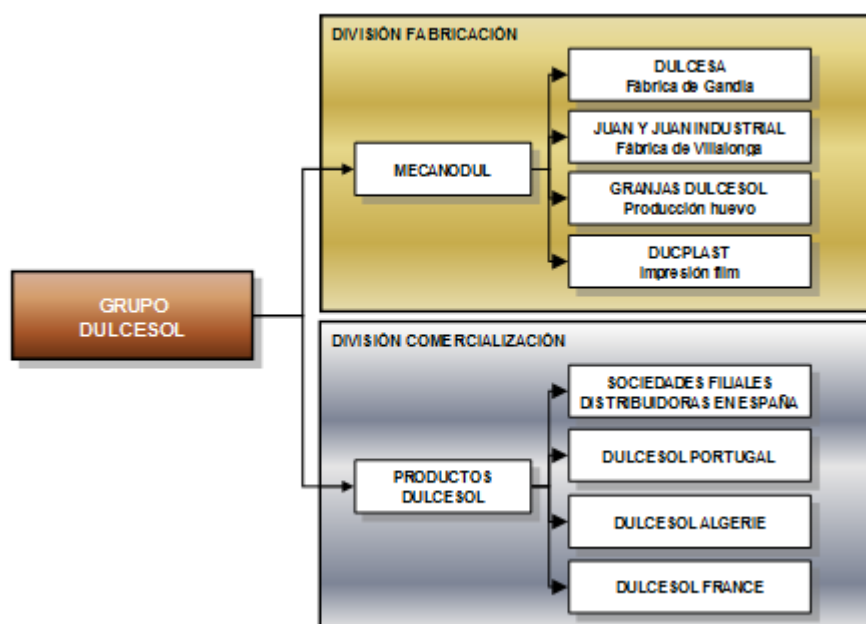
Desde entonces, el desarrollo de la compañía ha experimentado un crecimiento exponencial que siempre ha tenido como premisa el lanzamiento de productos que identificaran a Dulcesol como una insignia de calidad. Este continuo esfuerzo por llevar una dinámica ascendente se ha visto siempre plasmado en notables partidas presupuestarias destinadas a la mejora y ampliación de las instalaciones y equipos.

Hoy, el Grupo Dulcesol constituye una de las empresas más relevantes en cuanto a producción de bollería y pastelería industrial del mercado español. Una continua tendencia de superación, fruto del espíritu inconformista impulsado desde la dirección de la empresa, han situado al grupo a la vanguardia de la industria alimentaria, como así lo revelan los datos de mercado. La actividad empresarial en el marco de alimentación es muy competitiva, puesto que se sumerge en un entorno en constante dinamismo. Esta circunstancia ha llevado al Grupo Dulcesol a hacer del crecimiento, la innovación tecnológica y la calidad los pilares fundamentales sobre los que se sustenta su filosofía de trabajo. Muestra de ello es que durante el año 2015, la empresa ha realizado inversiones por valor de 43,64 millones de euros, un 34,6 % más que en el ejercicio anterior; las cuales han ido principalmente destinadas a instalaciones y maquinaria de última generación. Así, desde 2010, ha invertido un valor de 150 millones de euros. Este importe incluye, además de proyectos de I+D vinculados fundamentalmente a la alimentación saludable, otros en el ámbito de la incorporación de la última tecnología, de la ampliación de las instalaciones y del desarrollo de producto.

Actualmente, el Grupo Dulcesol continúa siendo una empresa familiar con capital 100% valenciano y está compuesto por las siguientes empresas:

- Tres fábricas de bollería y pastelería industrial: Villalonga, Gandía (Valencia) y Orán (Argelia) *(de esta última no se tienen información específica, por lo que en algunos casos del proyecto puede hacerse referencia tan solo a las dos primeras fábricas).*
- Una granja avícola, para abastecimiento propio (abastece el 85% de sus necesidades).
- Una planta para la elaboración de ovo productos, para abastecimiento propio.
- Una fábrica de manipulados del plástico, para abastecimiento propio, que ocupa la práctica totalidad (98%) de las necesidades de packaging del grupo.
- Una unidad de producción de chocolates, cremas, mermeladas y gelatinas: Villalonga.
- Tres centrales comercializadoras: Gandía, Corroios (Setúbal, Portugal) y Argelia.
- Quince sociedades distribuidoras a lo largo del territorio español.

La siguiente imagen muestra el organigrama del grupo Dulcesol, realizando una distinción entre sociedades destinadas la fabricación de los productos y sociedades destinadas a la distribución y comercialización de las mismas:



0.30 Organigrama del Grupo Dulcesol

El aparato productivo del Grupo Dulcesol se estructura principalmente en sus dos fábricas: Juan y Juan y Dulcesa, S.L., organizadas en un total de 32 líneas de producción, y que disponen de oficinas con los más modernos medios de gestión administrativa.

Las líneas de producción se subdividen en un número variable de secciones, en función de las características de los productos de cada una de ellas. Dichas secciones, por orden de ubicación a lo largo del proceso productivo, son las siguientes: Recepción y dosificación de materias primas; Amasado; Formación y moldeado de productos; Fermentación; Cocción; Enfriamiento; Envasado, paletizado y expedición, donde esta última sección cuenta con un sistema automatizado de recepción y almacenamiento de materias primas y con otro de almacenamiento y expedición de productos terminados.

La integración vertical con las empresas y unidades propias, productoras y suministradoras de determinadas materias primas y auxiliares, permite la optimización de la cadena de pedido, producción, transporte, almacenaje e incorporación de las mismas al proceso productivo, de tal modo que se alcanza una perfecta gestión *just in time*.

La comercialización de los productos de Dulcesa S.L. se efectúa a través de la estructura comercial del grupo Dulcesol, al cual pertenece. Esta estructura comercial se fundamenta en una red de distribuidores independientes con estructura de reparto propia, repartidos a lo largo de todo el territorio nacional, con la que se posibilita el acceso tanto a pequeños clientes (tiendas tradicionales) como a las cadenas de distribución de tamaño medio y grande. La estructura comercial descrita permite una distribución óptima de todos los productos que comercializa la empresa y, a su vez, garantiza una rápida y eficiente penetración de nuevos productos en el mercado nacional y también en el internacional, donde se encuentra en 39 países con una facturación en el año 2015 de alrededor de 40 millones, lo que representa el

13,2 % del negocio total del grupo Dulcesol. Los clientes más importantes de la empresa son las cadenas de distribución de tamaño medio y grande; comercializándose en la práctica totalidad de cadenas de hipermercados de nuestro país (Carrefour, Hipercor, Alcampo, etc.), mayoristas (Makro, Puntocash, etc.), cadenas de distribución (Mercadona, Caprabo, Superdiplo, Eroski - Consum, Simago, Sabeco, etc.) y grandes almacenes (El Corte Inglés).

La compañía continua creciendo con los años, de tal manera que la compañía valenciana ha cerrado el ejercicio de 2015 con una facturación global de 303 millones de euros, lo que representa un aumento del 3,6% respecto al año anterior y una producción de 139.770 toneladas. En cuanto al reparto de las ventas por áreas geográficas, se han obtenido notables ascensos tanto en el mercado nacional, donde ha subido un 14,6% en volumen, como en el exterior, siendo los principales mercados receptores, por este orden, Portugal (país al que envía referencias de todas sus familias), Argelia, Francia (bollería y pan de molde), Italia y Reino Unido, destinos donde comercializa bollería y pastelería.

La empresa participa dentro del sector de pastelería y bollería y su cuota de mercado es aproximadamente del 8%, que se eleva al 14% si se consideran las ventas consolidadas del grupo Dulcesol. Aunque esta cuota de mercado pueda parecer pequeña, lo cierto es que la gran atomización del sector, compuesto por multitud de pequeños fabricantes que confieren al sector un carácter muy competitivo, además de la fuerte competencia de fabricantes extranjeros, que poseen estructuras productivos más avanzadas, y ofrecen productos de calidad a precios muy competitivos, hace que sólo tres fabricantes nacionales (La Bella Easo, Repostería Martínez y Dulcesol) superen el 5% del consumo nacional de pastelería y bollería. Por ello, la posición del grupo es de liderazgo, dado que supera en volumen de facturación y en toneladas producidas al resto de empresas del sector

Los principales competidores en el ámbito de fabricantes con cobertura nacional son los anteriormente mencionados (La Bella Easo y Repostería Martínez), pero sin perder de vista los pequeños fabricantes que conforman un importante entorno competitivo en el comercio tradicional y los fabricantes extranjeros.

Ante dicha competencia, se manifiesta aún más la necesidad de innovación y mejora de las instalaciones, lo que sin duda dará una ventaja competitiva frente al resto. Es por ello que automatizar todos los posibles procesos dentro de la línea de producción supone un empuje para agilizar e incrementar la modernidad de las instalaciones existentes en el sector español, así como un incentivo para que las empresas reinviertan sus beneficios en mejoras continuas de sus líneas de producción.

Con ello, puede conseguirse:

- El incremento de ratios productivos y de la flexibilidad de las líneas de producción.
- La adaptabilidad a los cambios productivos.
- Reducción de ociosidad.
- Minimizar desperdicios por lotes no aceptados.

- Manejo sencillo para los trabajadores, con lo que se eliminan riesgos innecesarios para los operarios.

Todo esto conlleva una oportunidad de negocio para las empresas, pues mediante la automatización de los procesos productivos se mejora la competitividad de la empresa y permite plantear incrementos del volumen de producción y reducir los costes productivos, por lo que los productos pueden ser más atractivos para mercados exteriores. Así mismo, se puede aumentar su capacidad de adaptación a volúmenes de producción variables, mitigar tiempos de proceso excesivos e inconstantes por las necesidades de ajustarse a las demandas del mercado, así como la dedicación de recursos técnicos a tareas más productivas y que aportan mayor valor añadido a la empresa.

Incrementar la adaptabilidad de las líneas mediante sistemas de distribución de elevada eficiencia y fiabilidad es un objetivo interesante para cualquier compañía, que le permitirá continuar ofreciendo productos de elevada calidad, y dedicar sus recursos más preciados, el personal altamente cualificado que posee, a otras tareas más interesantes relacionadas con la mejora continua de los productos desarrollados en sus instalaciones, así como el lanzamiento de nuevas propuestas, abriéndose con ello a nuevos nichos de mercado y nuevas oportunidades de negocio.

Además, para empresas del tamaño de Dulcesa S.L., la inclusión de este presente proyecto puede suponer un avance significativo, ya que permitirá aplicar los conocimientos al gran número de productos y líneas de producción que disponen las fábricas del grupo. De esta forma, se asentarán las bases para poder conseguir un avance significativo en el aumento de flexibilidad, crecimiento de productividad e incremento de rendimiento económico de las empresas del grupo. Como añadido, este potencial de automatización revertirá en la sociedad y más concretamente en las empresas e ingenierías del entorno que participarán en dichos procesos de automatización y conseguirán, por tanto, conocimientos que puedan aplicar a empresas de otros sectores industriales.

Capítulo 3

Herramientas empleadas

En este apartado se describen todas las herramientas empleadas para la realización del trabajo. Dichas herramientas son el software de simulación Stäubli Robotics Suite, las características del robot proporcionado por la compañía Stäubli, el TX60; el software In-Sight Explorer, proporcionado por Cognex para realizar aplicaciones de visión por computador; las características de la cámara de visión utilizada, la cámara In-Sight de modelo 5100; y el software para modelado de Solidworks.

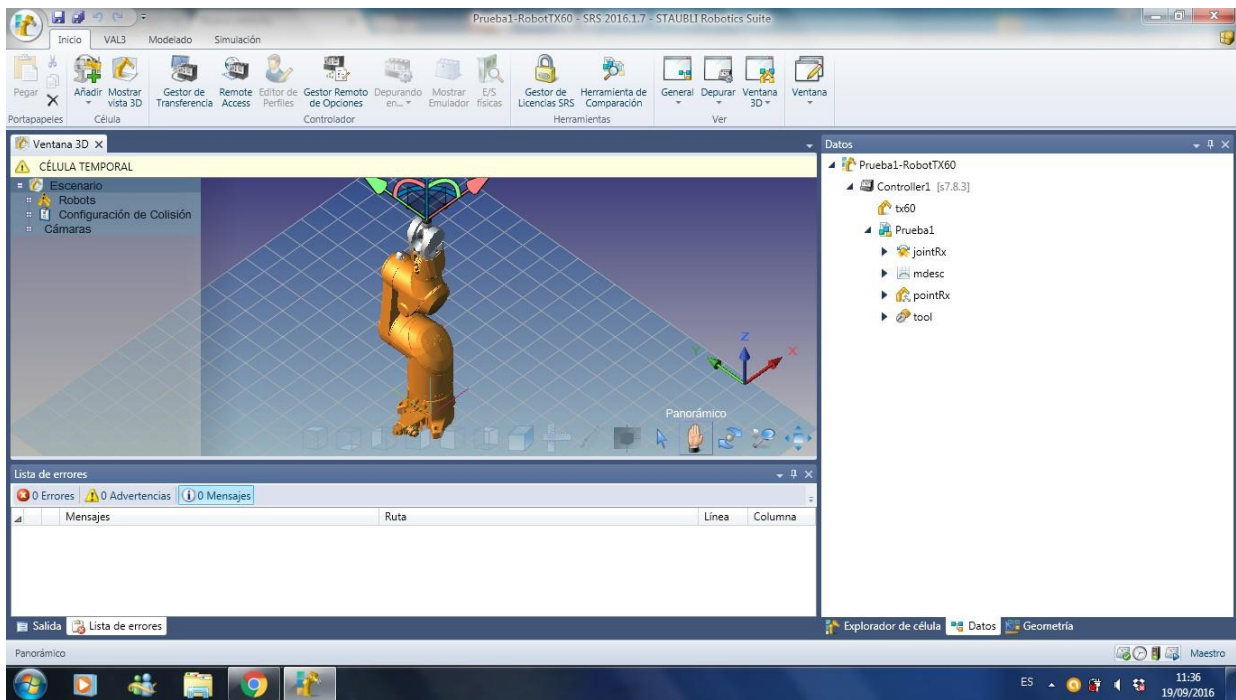
3.1. Stäubli Robotics Suite

Stäubli Robotics Suite es un paquete de software diseñado para el desarrollo, simulación y mantenimiento de aplicaciones robóticas desde un entorno Windows.

Su proveedor es la compañía Stäubli, fundada en 1892 como “Schelling & Stäubli” en Horgen/Zurich (Suiza) y siendo en un principio un taller especializado en la producción de máquinas de telares. Con el paso del tiempo fue creciendo y diversificándose, como en 1956 con la producción de conectores rápidos de la cual surgió la división de conectores, o en 1982 con la diversificación en automática y robótica (en dicho año entró en colaboración con Unimation Inc., primer fabricante de robots del mundo, adquiriéndolo posteriormente en 1989).

Con todo ello, Stäubli es un proveedor de soluciones mecatrónicas especializado en las tres divisiones mencionadas: Textile, Connectors y Robotics. Dispone de una plantilla cercana a los 4500 trabajadores y genera una facturación anual superior a 1 billón de francos Suizos. Dispone de 12 centros de producción industrial, incluyendo a las compañías del Grupo Stäubli (Multi-Contact y Schönherr) y cuenta con su presencia en 25 países a través de una red de ventas y filiales de servicio al cliente.

Aunque las divisiones de maquinaria textil y conectores fueron sus primeras y en ellas sea uno de los líderes de fabricación mundial, será la división de robótica y en especial su software Stäubli Robotics Suite el cual se enunciará en este apartado.



0.1 Ejemplo de célula robotizada en Stäubli Robotics Suite

Stäubli Robotics Suite (a partir de ahora mencionado como SRS) ha sido diseñado como complemento ideal para los diversos métodos de programar un robot Stäubli:

- **VAL 3**, es el lenguaje de programación robot de Stäubli; un entorno robótico avanzado para desarrollar aplicaciones de gama alta y personalizadas muy adaptado a las necesidades de integradores y OEMs (fabricantes de equipo original).
El lenguaje VAL 3 controla conjuntos de funciones robóticas muy potentes. Tiene un enfoque modular y muy flexible que facilita la reutilización de código y permite aprovechar el conocimiento acumulado por el usuario. Consigue una flexibilidad aún mayor mediante una amplia gama de posibilidades de conexión, que incluyen DIO, AIO y buses de campo. La posibilidad de acceder completamente al robot y al controlador desde una interfaz de consola de programación individual simplifica en gran medida la programación sofisticada del mismo.
- **VALproducts**, soluciones industriales listas para usar que han sido desarrolladas pensando en su utilización por parte de usuarios finales
- **uniVAL**, solución lista para conectar que permite el control de los robots Stäubli desde controladores de movimientos industriales genéricos. Se trata de una potente solución perfectamente adaptada a los fabricantes de maquinaria.

El paquete de software SRS cuenta con una presentación en una única ventana que incluyen las últimas funcionalidades de Windows, lo que lo hace intuitivo y potente, permitiendo un fácil acceso a todas las funciones de las que dispone. Entre sus funciones básicas destacan las siguientes:

- **Editor de aplicación VAL 3 en modo solo lectura:** Tiene la posibilidad de visualizar e imprimir aplicaciones VAL 3, así como la posibilidad de ayuda online para lenguaje VAL3.
- **Versión ligera de escenario 3D:** Permite la visualización en el PC de los movimientos de trayectoria del brazo robótico, pudiendo visualizar en 3D todos los brazos robóticos disponibles (Fast Picker, SCARA, de 4 ejes o 6 ejes).
- **Transferencia bidireccional de archivos entre el PC desarrollador y los robots:** Tiene la posibilidad de realizar la transferencia de aplicaciones VAL 3 y archivos de configuración en ambas direcciones, desde el PC al robot y a la inversa. También es posible la realización de copias de seguridad completas del sistema robótico organizado automáticamente para facilitar el archivado.
- **Gestión de perfiles de usuario:** Posibilita la gestión de derechos de acceso para diversas funcionalidades del sistema, tales como modos de trabajo, programas, puntos, etc. Tiene así mismo la posibilidad de establecer un acceso controlado a través de nombre de usuario y contraseña; y permite asignar diferentes derechos de acceso a los posibles usuarios del robot tales como operadores, programadores, personal de mantenimiento, etc.
- **Actualizaciones menores automáticas:** SRS verifica en cada arranque si hay disponibles actualizaciones menores para descargar.

SRS consta de dos módulos integrados: Development Studio y Maintenance Studio, los cuales incorporan diferentes funcionalidades que se mencionarán a continuación.

Development Studio es un software de desarrollo para la creación de aplicaciones y su simulación en 3D. Esta licencia garantiza acceso a todas las funcionalidades requeridas para realizar simulaciones realistas para uno o más robots entre las que destacan:

- Editor de programa VAL 3 con avanzadas funcionalidades inspiradas en los últimos lenguajes de programación informáticos (tales como depuración en línea, autocompletado de código de línea, fragmentos de código, comprobación de sintaxis sobre la marcha, etc.).
- Capacidades de importar modelos CAD (STEP, IGES, STL, VRML), lo que permite realizar unas simulaciones más realistas en función de los requerimientos..

- Modelado 3D basado en formas primitivas simples (cubos, esferas, cilindros).
- Integración profunda en la escena 3D con el entorno de programación.
- Simulaciones multirobot, permitiendo un análisis del diseño y mediciones de los tiempos de ciclo realistas.
- Creación simple de la herramienta de final de brazo, partes, y cargas adicionales basadas en modelos 3D.
- Cálculo automático de los parámetros de carga (momentos de inercia) para ayudar a seleccionar los mejores robots de montaje así como afinar las leyes de mando dinámicas (estimaciones de tiempos de ciclo más realistas).
- Los robots en la escena 3D se pueden conectar a los controladores reales o a un emulador.
- Alto rendimiento en la detección de colisiones, resaltando los elementos en colisión y realizando la definición de las zonas de distancia de seguridad.

Mientras, la licencia de Maintenance Studio proporciona funcionalidades avanzadas que permiten realizar tareas de diagnóstico, garantizando el acceso a todas las funciones requeridas para conectarse remotamente a los robots reales y realizar operaciones de diagnóstico, además de permitir la supervisión remota de los ciclos del robot:

- Acceso completo sobre la Ethernet de los sistemas del robot, lo que da la posibilidad de visualizar remotamente e interactuar con los controladores del robot y su mando manual desde el PC desarrollador.
- Permite que múltiples usuarios puedan actuar simultáneamente sobre el mismo robot (remotamente o in situ) y visualizar las acciones de los demás.
- Todas las características del mando manual están disponibles remotamente con excepción (por razones obvias de seguridad) de las que son susceptibles de generar movimiento en el robot.
- Posible conexión remota simultánea de todos los robots de la misma red.
- Escena 3D en modo visualización, posibilidad de cargar la célula 3D creada previamente con la licencia Development Studio.

Con todo ello, se dispone en el SRS de todas las características necesarias para la definición, creación, programación y simulación de una célula robotizada, permitiendo con ello un desarrollo más eficiente de las aplicaciones al no tener que realizar todas las modificaciones sobre el propio robot.

De esta manera, se dispone del gestor de células para la creación, definición y modificación de las células; del módulo VAL3 Studio para la creación y modificación de aplicaciones en VAL3, contando para ello con múltiples ayudas para la programación como el verificador de sintaxis o la ayuda en línea; el emulador, que permite la emulación completa de un mando manual y el controlador; el simulador 3D Studio, el cual puede conectarse a un controlador real o al emulador y permite simular los movimientos del robot y comprobar sus trayectorias y posibles colisiones; y el gestor de transferencias, que permite transferir las aplicaciones de VAL3 hacia o desde el controlador.

3.2. Robot TX60

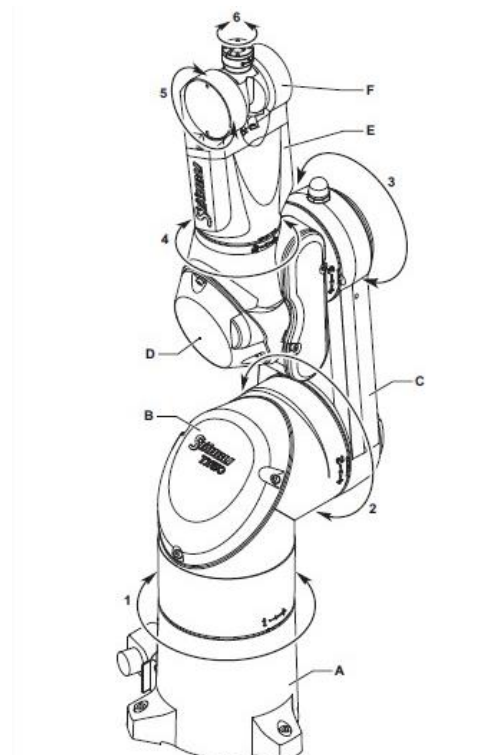
En este apartado se describen las principales características del brazo robótico utilizado en el proyecto. Este brazo pertenece a la compañía Staübli SA y se trata de un TX60, que dentro de las diferentes familias que pueden definirse para los brazos robóticos corresponde a un robot de 6 ejes de carga ligera (máximo de 10 Kg.).

El brazo está constituido como se ha mencionado por 6 segmentos unidos entre sí por articulaciones, las cuales se mueven gracias a un servomotor acoplado a un sensor de posición, lo que permite conocer permanentemente la posición absoluta del brazo.

Los elementos del brazo se nombran de la siguiente manera:

- Pie (A)
- Hombro (B)
- Brazo (C)
- Codo (D)
- Antebrazo (E)
- Puño (F)

La designación de los robots Staübli corresponde a lo siguiente: en primer lugar, el nombre de la familia (en este caso TX), en segundo



0.2 Brazo robótico TX60

lugar, un número equivalente al radio máximo de trabajo (sobre la versión estándar) entre el eje 1 y el eje 5 expresado en decímetros y en tercer lugar, otro número que indica la cantidad de ejes que están activos (un 0 equivale a los 6 ejes activos).

Ambiente de trabajo

El robot debe estar instalado en una sala que cumpla las siguientes condiciones de trabajo:

- Temperatura de funcionamiento entre +5°C y +40°C (aunque una temperatura de ambiente elevada puede provocar la limitación de las prestaciones dinámicas del brazo).
- Humedad entre 30% y 95% (sin condensación).
- Altitud máxima de 2 metros.
- Protección del brazo IP65 y del puño IP67, con tomas eléctricas o tapones conectados.

Si la instalación (y características) del brazo robótico fuese en una sala blanca, en entorno húmedo o biocontaminado deberían tenerse en consideración otros aspectos, pero no procede en este caso.

Prestaciones

Su exclusivo cierre de trabajo esférico permite maximizar el uso del espacio de trabajo de la célula, permitiendo tener un volumen de trabajo de:

Tabla 2 Volumen de trabajo para brazo TX60

Volumen de trabajo para brazo estándar	
Radio de trabajo máximo entre ejes 1 y 5	600 mm
Radio de trabajo mínimo entre ejes 1 y 5	190 mm
Radio de trabajo máximo entre ejes 2 y 5	600 mm
Radio de trabajo mínimo entre ejes 2 y 5	189 mm
Radio de trabajo entre ejes 3 y 5	310 mm

Otras ventaja adicional es la posibilidad de montaje en suelo, pared o techo, lo que permite disfrutar de una flexibilidad absoluta a la hora de realizar la integración del robot en la célula. Esta posibilidad junto a un gran rango de movimiento (especificados en la siguiente tabla) y una repetibilidad ISO 9283 de $\pm 0,02$ mm hacen que las posibilidades de este robot sean muy amplias.

Tabla 3 Amplitud de ejes para brazo TX60

	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6
Amplitud(°)	360	255	285	540	255	540
Distribución de amplitud	± 180	± 127.5	± 142.5	± 270	+133.5/-122.5	± 270

En cuanto a la velocidad nominal y velocidad máxima (para condiciones de carga e inercias reducidas) que puede alcanzar el brazo robótico en cada uno de sus ejes y la velocidad máxima del centro de gravedad de la carga, sus valores se definen en la siguiente tabla:

Tabla 4 Velocidades para brazo TX60

	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6
Velocidad nominal (°/s)	287	287	431	410	320	700
Velocidad máxima (°/s)	435	410	540	995	1065	1445
Vel. Máx. del centro de gravedad de la carga	8 m/s					

Debido a su condición de robot para cargas ligeras, tiene un peso de tan solo 51.4 kg., por lo que es relativamente fácil su desplazamiento (aunque este debe hacerse siempre bajo unas condiciones de seguridad y protección específicas). De esta manera, las cargas que puede soportar el brazo robótico, incluyendo en ella la herramienta, ya que esta no viene en el conjunto del brazo, serían las siguientes:

Tabla 5 Carga para brazo TX60

Carga transportable (kg) por brazo estándar	
Nominal	3.5
Reducida ⁽¹⁾	4.5
Máxima	9

(1) Para todas las configuraciones posibles teniendo en cuenta las inercias máximas

Dichas inercias máximas vienen definidas por la tabla siguiente:

Tabla 6 Inercias para brazo TX60

	Inercias nominales (kg.m ²)	Inercias máximas (kg.m ²) ⁽²⁾
Con respecto eje 5	0.045	0.325
Con respecto eje 6	0.009	0.1

(2) En condiciones de velocidad y aceleración reducidas (generalmente, tanto velocidad como aceleración y desaceleración a 60%)

Si bien es posible exceder los valores nominales de inercias, esto supone una limitación en las prestaciones de velocidad y aceleración del brazo, por lo que debe consultarse previamente al fabricante.

Así mismo, no pueden utilizarse las inercias máximas en los ejes 5 y 6 simultáneamente, debiendo cumplirse las siguientes condiciones:

$$I5_{carga} + I6_{carga} < I5_{max}$$

$$I6_{carga} < I6_{max}$$

Tanta aceleración y desaceleración y las inercias existentes someten al brazo robótico a unos pares que los ejes y articulaciones del mismo deben ser capaces de soportar. Los pares límites para cada uno de los ejes del robot se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7 Pares límite para brazo TX60

Par estático (Nm)	Eje de referencia						
	Eje 1 (en suelo)	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5		Eje 6
					Sin par en eje6	Con par en eje6	
TX60	126	71	38	7	10	8	2



0.3 Brazo robot Staubli TX-60

Condiciones de seguridad

Un tema a tener muy en cuenta son las condiciones de seguridad de las que dispone el brazo robótico. A la hora de realizar una parada de emergencia es de vital importancia que la reacción del brazo sea lo más rápida posible con la finalidad de evitar el riesgo detectado, al igual que a la hora de realizar una parada controlada también debe tener un buen tiempo de respuesta para no exceder de los límites permitidos por el robot.

Dentro de paradas se definen dos categorías: categoría 0 (parada inmediata de motores y activación de frenos), en la que entrarían las paradas de emergencia, y categoría 1 (parada controlada con potencia de brazo mantenida, seguida por desconexión del brazo y activación de frenos).

En el caso de categoría 1, la parada se realiza sobre trayectoria que no depende de la carga sino que los tiempos y ángulos de parada dependen del parametro de desaceleración definido en el descriptor. Aún así, se asegura que para las condiciones mas adversas (una alta velocidad y una baja desaceleración), el tiempo de parada será de un máximo de 0.5 segundos.

En el caso de categoría 0, el tiempo y ángulos de parada son del mismo orden que para las paradas de categoría 1 pero la parada se realiza eje por eje y no sobre trayectoria.

Como excepción, existe una parada por defecto excepcional (como puede ser el fallo de un amplificador). En este caso, la parada del eje defectuoso se realiza en los frenos y el resto de ejes siguen una parada de categoría 0. En este caso, la distancia y tiempo de parada en el eje defectuoso se miden con el brazo tenso, con carga nominal y a velocidad nominal. De ello se obtiene la siguiente tabla:

	Distancia de parada (grados de eje)			Tiempo de parada (segundos)		
	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 1	Eje 2	Eje 3
TX60	27	37	72	0.17	0.24	0.32

En el caso de que la parada no se realizara con la suficiente rapidez como para evitar un choque, se ha estimado en 165 J la energía máxima que genera el brazo (calculada con el brazo tendido, con carga nominal y a velocidad nominal).

3.3. Cognex In-Sight Explorer

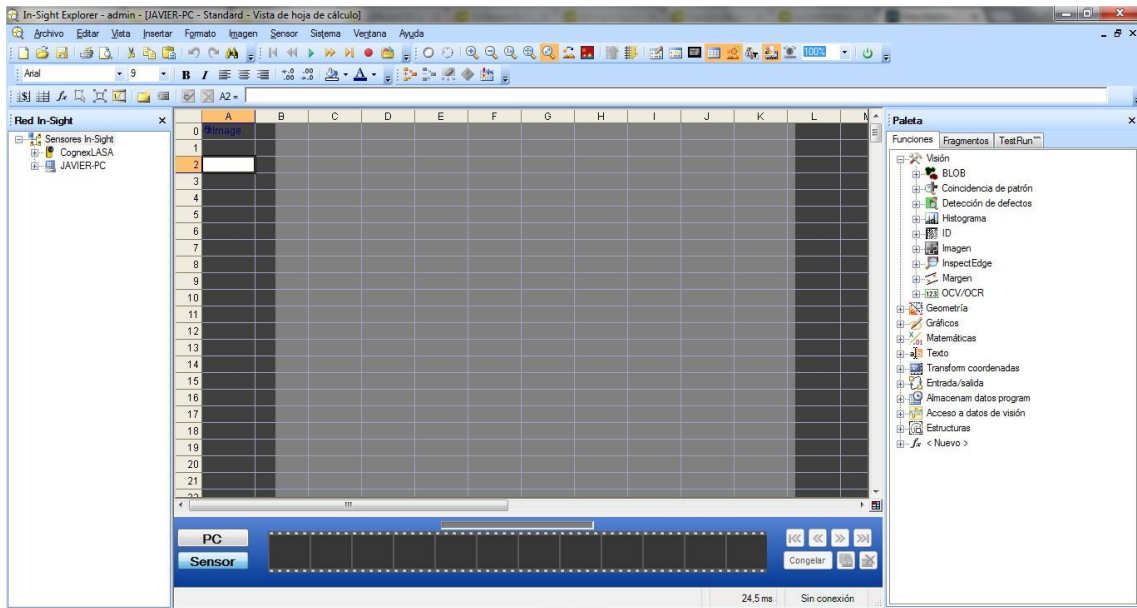
El software In-Sight Explorer (versión 4.7.3) es el utilizado en el proyecto para realizar la aplicación de visión artificial. Lo proporciona la compañía Cognex Corporation para su utilización conjunta con los sistemas de visión In-Sight.

La facilidad de uso es una de las principales características los sistemas In-Sight, desde las poderosas herramientas de visión hasta la interfaz del software In-Sight Explorer, el cual está implementado como una hoja de cálculo, que permite simplificar la experiencia del usuario y le brinda un máximo control sobre las aplicaciones de inspección óptica que implementa. El software de In-Sight Explorer también incluye EasyBuilder® que permite implementar aplicaciones confiables de forma rápida, sin la necesidad de realizar ningún tipo de programación.

Este software ayuda a los usuarios sin ningún nivel de experiencia en relación a la programación de aplicaciones de visión artificial a configurar rápidamente su aplicación, ya que no requiere de conocimientos sobre programación y el usuario puede centrarse en lo que tiene más conocimiento, la pieza a inspeccionar. Con EasyBuilder®, trabajando a partir de una imagen de la pieza a analizar, con cuatro simples pasos se completa la configuración de la aplicación:

1. **Inicio:** se elige un sistema de visión In-Sight® en la red y surge un asistente que guiará a través de la activación del sistema de visión y el ajuste de la escala y la calibración no lineal.
2. **Ajuste de las herramientas:** después de encontrar la pieza, se dispone de una biblioteca de más de 22 herramientas de visión para inspeccionarla, como pueden ser herramientas de localización, detección de defectos, lectura de códigos, medición, visión de color, etc.
3. **Configuración:** un asistente interactivo ayudará a configurar la comunicación o conectividad, lo que permite seleccionar fácilmente los datos que se deben enviar y el protocolo que se debe utilizar para comunicarse con un PLC, un robot o un dispositivo HMI con el fin de recolectar y archivar los resultados.
4. **Fin:** en el modo de implementación, los gráficos a color, una tabla de resultados y una serie de imágenes simplifican la resolución de problemas y la identificación de piezas con fallas.

La hoja de cálculo de In-Sight Explorer brinda una forma sólida, flexible y eficiente de configurar las herramientas de visión y manejar los datos creados desde una aplicación de visión. In-Sight Explorer ofrece un entorno muy potente, similar al de Microsoft Excel en cuanto a hojas de cálculo se refiere, para configurar aplicaciones más avanzadas. De esta manera, incluye diferentes funciones, opciones y operaciones especializadas que le permiten resolver complejas aplicaciones de visión artificial sin tener que escribir ni una sola línea de código.



0.4 Aspecto de hoja de cálculo de In-Sight Explorer

Así mismo, se logra una experiencia más agradable para el usuario, al incluir una barra de herramientas de visión que permite arrastrar y colocar fácilmente la configuración de los trabajos. Y como punto final, tiene el desarrollo sincronizado de la plataforma de configuración de EasyBuilder con su hoja de cálculo al estilo Excel, lo que permite combinar las ventajas de ambas y realizar las aplicaciones necesarias de una manera mucho más rápida, sencilla y eficiente.

Otro punto importante en el software es el apartado de visualización, donde In-Sight Explorer junto con la interfaz de operador VisionView ofrece diferentes opciones para una inspección visual flexible. Entre ellos, destacan los siguientes:

- **In-Sight Explorer CustomView**

Utiliza controles gráficos, como luces indicadoras, botones, salidas y entradas de datos, tablas de tendencias y cuadros de mensajes para crear la pantalla del operador, permitiendo personalizarla tal cual sea requerida por el usuario.

- **Kit de desarrollo de software (SDK) de In-Sight**

Brinda el máximo nivel de flexibilidad para entornos .NET y ActiveX. Para ello utiliza métodos de programación para visualizar datos e imágenes, cambia parámetros y carga nuevos trabajos (o recetas, como se le conoce).

- **Control de pantalla ActiveX de In-Sight**

Este control ha sido probado con los paquetes de software HMI más comunes del mercado y permite integrar datos e imágenes con el resto del control de la máquina, con tan solo arrastrar y soltar las herramientas necesarias para la aplicación.

Todo el proceso de In-Sight Explorer es en gran medida gracias a las potentes herramientas de visión de las que dispone el software, dando confianza incluso en las aplicaciones de visión más complejas. Entre todas las herramientas disponibles, destacan las siguientes:

- **Localización de piezas: PatMax**

PatMax®, el estándar de rendimiento industrial para software de localización de piezas y características, utiliza tecnología avanzada de correspondencia de patrones geométricos para localizar piezas con confiabilidad y precisión.

Incluso en las condiciones de grandes variaciones en la orientación, el tamaño y el aspecto de las piezas, lo que puede deberse a causas como: contraste de las piezas, piezas múltiples, cambios en la iluminación, enfoque de las imágenes, aspecto degradado, piezas parcialmente ocultas, etc., esta herramienta puede reducir significativamente o incluso llegar a eliminar los costos y requisitos montaje.

Para localizar piezas o características, PatMax ofrece el máximo rendimiento y confiabilidad posible de inspección en un sistema de visión.

- **Reconocimiento y Validación Ópticos de Caracteres (OCR/OCV): OCRMax**

El reconocimiento óptico de caracteres es esencial en numerosas aplicaciones de los mercados automotriz, alimentos y bebidas, farmacéutico, electrónico, etc. para el control de calidad de los productos y su trazabilidad.

La herramienta avanzada OCR/OCV de In-Sight Explorer facilita la identificación de textos con fuentes preidentificadas y ofrece un alto nivel de confianza en la lectura y la verificación de caracteres mediante un nuevo modo de precisión.

Las mejoras de los algoritmos permiten caracteres más degradados y escasos en los fondos con ruido, logra velocidades de lectura más altas en impresiones difíciles (administra caracteres de bajo contraste, así como caracteres confusos o con espaciado irregular) y maneja velocidades de las líneas de producción más rápidas (verifica hasta 600 cadenas por minuto).

- **Lectura de códigos industriales: 1DMax, 2DMax+**

El estándar en la mayoría de los modelos de In-Sight es IDMax®, un software revolucionario de lectura de códigos basado en la tecnología patentada Cognex PatMax, mediante los algoritmos 1DMax™ y 2DMax™.

IDMax puede leer simbologías de códigos 1D (como UPC, PDF, códigos apilados y postales), simbologías de códigos 2D (como Data Matrix y QR) o una mezcla de códigos de barras y códigos 2D al mismo tiempo.

1DMax es la herramienta de lectura de códigos de barras 1D para la lectura de códigos de barras omnidireccionales y puede manejar variaciones extremas de contraste, efecto borroso, daños, vacíos, reflejos, resolución, incumplimiento de zonas mudas y distorsión de la perspectiva.

La tecnología 2DMax está optimizada para la lectura de códigos QR y administra una amplia gama de degradaciones en el aspecto del código 2D Data Matrix que se presentan como consecuencia de las degradaciones en la calidad del código de Marcación Directa de Piezas (Direct Part Marking o DPM) dadas las diferentes

superficies, tipos de materiales y las técnicas de marcación y degradación de procesos, como impresión por puntos y grabado con láser.

IDMax® tiene la Capacidad para leer múltiples códigos en la misma imagen mediante un único código de identificación y es capaz de leer hasta 7200 piezas por minuto.

▪ **Inspección de color: ExtractColor y MatchColor**

Las herramientas de visión del color permiten localizar, medir, contar y verificar la presencia de productos en función de su color, pudiendo realizar la identificación de colores o de modelos de colores.

Con esta herramienta se puede ordenar, identificar y comparar los colores de los productos, identificando los colores correctos en su ubicación, clasificando y ordenando los productos en función a los colores aprendidos por el sistema y verificando la consistencia y uniformidad del color de cada producto. Permite así mismo realizar una separación por colores específicos con la que se crea una imagen a color de alto contraste que facilita la inspección.

Como principales ventajas que ofrece Cognex se encuentra que ofrece una detección de color precisa y confiable para una amplia gama de tipos de piezas y colores, que convierte imágenes a color en imágenes en escala de grises para poder realizar otros tipos de inspecciones mediante filtros de escala de grises y que muestra colores con un solo clic (sin necesidad de comprender los espacios de colores, lo cual para un usuario inexperto en el tema es de gran ayuda).

▪ **Detección de defectos: InspectEdge, Bead Finder y Bead Tracker**

Con las herramientas para detección de defectos de In-Sight, es posible encontrar separaciones, variación en el ancho de las piezas y/o defectos en los bordes de una manera sencilla. Los defectos se clasifican según el área total, la longitud o la profundidad de la pieza, puede configurarse fácilmente para diferentes tipos de bordes: rectos, circulares o no uniformes y permite determinar el ancho y la desviación mínima y máxima con precisión.

Con InspectEdge se puede verificar el correcto montaje de los componentes y piezas, detectar imperfecciones en el aspecto de las piezas, detectar desviaciones en la posición del borde, así como defectos y hendiduras en su posición y ancho. Esta herramienta proporciona resultados de inspección sólidos y fiables, independientemente de la orientación de las piezas analizadas y de su forma (trabaja tanto sobre piezas rectas como redondas) y permite clasificar con facilidad los defectos según el tipo del que se trate.

La herramienta de detección flexibles de imperfecciones combina en una sola herramienta la inspección basada en los bordes y en el área de la pieza, pudiendo detectar defectos en los bordes y las superficies de manera general, defectos en los límites (defecto de forma), defectos en la superficie (manchas) o realizar la inspección de impresiones (como los logotipos en serigrafía). Como su propio nombre indica, es una herramienta flexible que permite variaciones de procesos reduciendo los falsos defectos, pudiendo ignorarse estos e incorporarse a la máscara de detección. Permite

flexibilidad a su vez a la hora de seleccionar los requisitos de velocidad frente a precisión, pudiendo seleccionar una resolución fina, media o gruesa de la cual dependerán los factores anteriormente mencionados (con una resolución más pequeña, se obtendrá una mayor precisión pero el tiempo de cómputo será mayor).

- **Detección de fallas: Detección flexible de fallas (FFD) y detección de fallas superficiales (SFD)**

Con esta herramienta se puede encontrar defectos en los bordes y la superficie de los productos. Está disponible la detección flexible de fallas (flexible failures detection o FFD) y a detección de fallas superficiales (surface failures detection o SFD).

Permite detectar fallas en la superficie y defectos en la impresión, compensar la variación del proceso y los cambios en la intensidad de la luz y detectar la decoloración y los defectos en las imágenes a color.

- **Medición: Herramientas de geometría, detección de bordes y calibre**

Existen una gran variedad de herramientas geométricas que pueden utilizarse para las mediciones de alta precisión, pudiendo escoger entre todas ellas para realizar una configuración rápida del sistema.

Con estas herramientas se puede medir distancias entre características, verificar tolerancias y localizar bordes, todo ellos mediante una medición de alta precisión de las dimensiones de las piezas críticas, independientemente de las variaciones en la orientación de las piezas y la iluminación del ambiente.

- **Optimización de imágenes: Calibración, herramientas de filtrado de imágenes y orientación de la escena**

Cognex proporciona estas herramientas con las que es posible eliminar defectos no deseados del entorno y lograr una inspección sistemática.

La calibración avanzada elimina los efectos de distorsión debidos a la perspectiva (inclinación de la lente) y a la lente en sí (redondeo de las esquinas exteriores de la imagen).

Permite corregir la iluminación no uniforme de la imagen y lograr una imagen mucho más nítida con la cual trabajar, filtra los fondos confusos o no deseados para resaltar la pieza que se debe inspeccionar, filtra todos los colores excepto los que desea para facilitar la detección y la inspección.

Con todas las herramientas que proporciona el software In-Sight, el abanico de posibilidades a la hora de diseñar e implementar una aplicación es casi infinito, aunque los principales usos para los que se destina una cámara de visión artificial son los siguientes, diferenciando según la finalidad de la aplicación final:

- **Inspección:** Se realiza una inspección para detectar errores de montaje, defectos en las superficies, piezas dañadas y/o características faltantes. Se identifica la orientación, la forma y la posición de los objetos y sus características principales.

- **Medición:** Se miden las piezas o partes más críticas para verificar las dimensiones y medir los componentes del producto para los procesos posteriores de clasificación y separación.
- **Orientación y alineación:** Se realiza el guiado de dispositivos robóticos y el equipo de automatización. También entran dentro de este tipo el alineado de las piezas para las operaciones de montaje que requieren alta precisión.
- **Reconocimiento y Validación Ópticos de Caracteres (OCR/OCV):** Con esta aplicación se pueden leer y verificar los caracteres alfanuméricos marcados directamente sobre las piezas e impresos en las etiquetas.
- **Lectura de códigos de barra:** Leer códigos de barras en 1D y códigos DataMatrix 2D como parte de una inspección total de las piezas.

Como último aspecto a destacar del software In-Sight Explorer se encuentra la manera de validación de la aplicación diseñada que tiene disponible. El método en cuestión se conoce como TestRun y permite refinar, probar y verificar los sistemas implementados de manera automática. Se ofrece un método simple para garantizar que la configuración de la inspección sea la correcta, analizando los cambios de parámetros con una biblioteca de piezas buenas y malas que ha sido definida por el usuario previamente e identificando los parámetros que están fuera de los rangos establecidos.

De este método de validación se pueden beneficiar tanto los operadores de las máquinas, ya que pueden probar de una manera fácil y automática que el sistema de visión funciona correctamente, como los diseñadores o integradores de las aplicaciones, pues les permite mostrar de una manera más cómoda que el sistema de visión diseñado cumple con los criterios que se le han solicitado, y los gerentes de calidad de las empresas clientes, pues pueden refinar cuales son los criterios de aceptación o rechazo en base a imágenes reales de producción que se incluyen en las bibliotecas de piezas.

3.4. Cámara Cognex In-Sight 5100

El modelo de cámara utilizado para realizar la aplicación de visión artificial pertenece a la compañía Cognex, el principal proveedor mundial de sistemas, software, sensores de visión y lectores industriales de ID utilizados para la automatización de los procesos de fabricación.

Concretamente, se ha realizado la instalación de un modelo de la serie In-Sight 5000. A esta serie pertenecen más de 15 modelos de cámaras, siendo las únicas cámaras inteligentes con características de calidad industrial como pueden ser su carcasa resistente de aluminio fundido a presión con una protección IP67 (es decir, protección total frente a partículas de polvo y la

posibilidad de estar sumergida a 1 metro durante 30 minutos), conectores M12 sellados y cubierta protectora para la lente.

Los modelos de Cognex se nombran en función de la siguiente secuencia: ABCD, donde A equivale a la serie a la que pertenece (en este caso A=5, serie 5000), la B equivale a la velocidad de la CPU (el número 1 indica un 4x en comparación con el modelo In-Sight Micro 1020 y sin incluir la velocidad de adquisición de imágenes), la C indica si lleva un conjunto de herramientas de identificación específico (y el número 0 indica que no lo tiene) y a D indica la resolución en píxeles de la imagen y la velocidad aproximada de adquisición de imágenes, basándose en la exposición mínima y en la captura completa de la imagen (en este caso, resolución de 640x480 y 60 fps). Como resumen de esta explicación se incluye la siguiente tabla:

Tabla 8 Numeración de cámara Cognex

A	B	C	D
5	1	0	0
Serie 5000	Velocidad de 4x	No ID específico	640x480, 60 fps

En cuando a la interfaz de usuario de la cámara, dispone del entorno de programación para hojas de cálculo de In-Sight Explorer, explicado en el apartado anterior de este proyecto, y la interfaz EasyBuilder, con la que desarrollar las aplicaciones de visión se convierte en una tarea mucho más sencilla incluso para usuarios poco experimentados.



0.5 Cámara In-Sight 5100

El modelo 5100 tiene compatibilidad con las siguientes herramientas:

- Herramientas esenciales, que incluye localización de líneas, blobs, bordes y curvas, herramientas geométricas, filtros de imagen, correspondencia de patrones y calibrado estándar.
- Herramientas extendido, que incluye el calibrado no lineal, detección de imperfecciones, herramientas de InspectEdge y herramientas de calibrado extra, así como la opción de PatMax, tecnología de correspondencia de patrones geométricos desarrollada por Cognex.

- Herramientas de identificación, en la que están incluidas la lectura e identificación de código de barras 1D y 2D, lectura y verificación de textos (OCR/OCV) y filtros de imagen.

Sin embargo, no tiene compatibilidad con el modelo de color, por lo que no podrá ser utilizado para aplicaciones en las que sea necesario la identificación o clasificación mediante el color de los objetos. Como en este caso se realiza identificación por forma, este aspecto no afecta a la hora del desarrollo de la aplicación.

3.5. Solidworks

El software Solidworks Premium 2015 es la solución completa para el modelado en 3D que ofrece la compañía Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, cubriendo todos los aspectos del desarrollo de productos como son las etapas de diseño, validación, diseño sostenible, comunicación y gestión de datos.

Hasta 1993, año de fundación de la compañía Solidworks, la industria no disponía de un software que combinara el diseño de sólidos en tres dimensiones con la facilidad de utilización de un programa en PC. Por ello, Jon Hirschtick (fundador) y un grupo de ingenieros se marcaron el objetivo de hacer la tecnología de CAD más accesible para los usuarios, sin la obligación de utilizar los costosos sistemas de hardware y software necesarios hasta la fecha. De esta manera, lanzaron en 1995 la primera versión de SolidWorks®. Tal fue su aceptación que en 1997 es adquirida por Dassault Systèmes S.A., empresa francesa de programación que es líder mundial en soluciones de administración de ciclo de vida de productos, por la cantidad de 310 millones de USD.

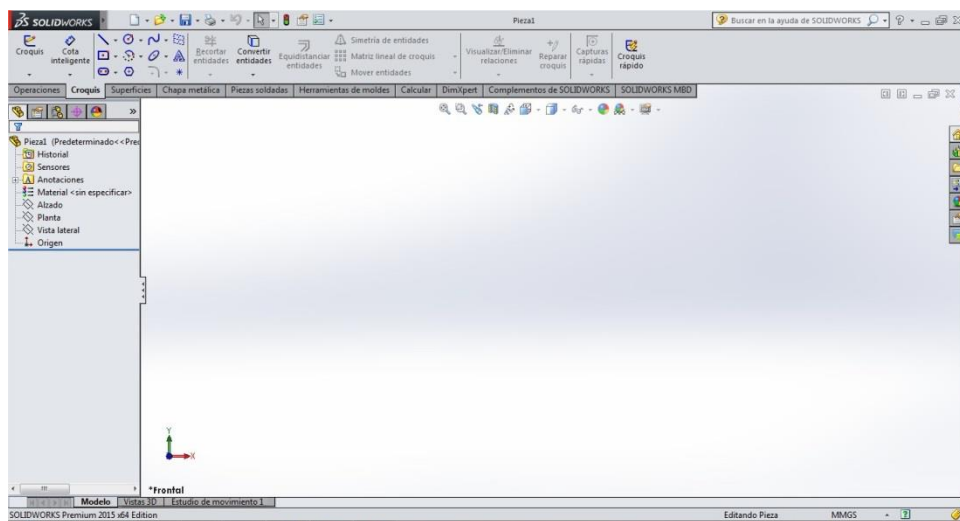
DS SolidWorks Corp. no ha dejado de aplicar su lema de "facilidad de uso" a las nuevas ampliaciones de sus productos, haciendo que sean fáciles de aprender y utilizar, por lo que se obtendrán mejores diseños, más rentables y de una forma más rápida que frente a otras opciones de diseño 3D; permitiendo a los usuarios centrarse en las ventajas del diseño.

El software Solidworks Premium 2015 ofrece soluciones potentes y fáciles de usar para el diseño de CAD en 3D, las cuales buscan acelerar el desarrollo de los productos, reducir los costes de fabricación y calidad final y fiabilidad de los productos diseñados. Las soluciones más destacadas son las siguientes:

- *CAD en 3D*: con una amplia gama de herramientas de dibujo, análisis de diseños, renderizado, animación, gestión de archivos, etc. que crea un sistema intuitivo de manera que puede ser más productivo y acelerar la comercialización. Destaca especialmente la facilidad con la que un nuevo usuario puede empezar a realizar trabajos productivos gracias a la sencilla experiencia de diseño que dispone.
- *Modelado de ensamblajes y piezas*.
- *Dibujos en 2D*: enlazándolo con el modelo sólido en 3D, por lo que cualquier actualización en el mismo se verá reflejada automáticamente en el dibujo en 2D. Esto reduce considerablemente los errores de producción debidos a fallos por

dibujos no actualizados o poco precisos, lo que ralentiza y encarece la distribución del producto.

- *Reutilización y automatización del diseño*: para las ocasiones en las que los nuevos productos son variaciones de diseños ya existentes o reconfiguraciones, esta solución permite reutilizar datos de dichos diseños para la creación de los nuevos.
- *Biblioteca de CAD*: se dispone de millones de modelos de CAD preconstruidos, tales como tornillos, arandelas, rodamientos, tuercas, pasadores, etc. que agilizan considerablemente el proceso de diseño.
- *Animaciones 3D y renderizados fotorrealistas*: permitiendo mostrar la funcionalidad del diseño de una forma más fácil, sin la necesidad de construir prototipos físicos.
- *Análisis de diseño*: pudiendo comprobar la funcionalidad de los diseños durante el desarrollo del producto, lo que permite comprobar, analizar y reducir los riesgos estructurales del diseño realizado.
- *Estimación de costes de fabricación*
- *Conversión de archivos CAD*: dispone de una gran variedad de conversores que hacen posible la posibilidad de importación y exportación para una amplia gama de proveedores.



0.6 Pantalla de inicio de dibujo en 3D

La aplicación de todas estas soluciones que ofrece Solidworks no es requerida en todos los procesos de diseño, pero sin lugar a dudas nos permite tener un amplio potencial a la hora de realizar los diseños de CAD en 3D. Todas estas soluciones pueden aplicarse mediante múltiples funciones que nos ofrece el programa, donde destacan las siguientes:

- *Modelado de sólidos en 3D*: agiliza el desarrollo y detalles del diseño, elimina problemas de interferencias en los modelos, permite comprobar la funcionalidad del modelo, etc. Con el modelado en 3D de Solidworks se puede crear modelos sólidos de cualquier pieza, generar superficies para cualquier geometría, editar directamente el modelo y hacer variaciones sobre el mismo, analizar el modelo para obtener sus propiedades sólidas (masa, volumen, densidad, etc.),...

- Diseño de ensamblajes, de chapa metálica, de piezas soldadas, de moldes, de piezas de plástico y fundición, de tuberías, de conductos de cables eléctricos, etc. ; permitiendo realizar cualquier modelo con los materiales y características deseados.
- Importación y exportación de CAD.
- Diseño conceptual: permite trabajar con datos conceptuales tales como croquis, imágenes, datos de escaneo en 3D, etc. Se puede realizar croquis básicos en los que definir la ubicación de los componentes y luego realizar modificaciones sobre el mismo para recolocar los elementos que estén unidos a él por relaciones de posición, se tiene la funcionalidad de trazado automático para realizar conversiones con imágenes importadas, se pueden realizar generar superficies a partir de formas orgánicas, etc.
- Actualización y creación automática de vistas de dibujo: solo es necesario arrastrar y soltar el modelo 3D para generar las vistas deseadas, sin la necesidad de actualizarlas de manera manual por lo que se elimina la posibilidad de que la información que contiene el dibujo sea antigua o errónea en relación al modelo 3D creado.
- Bibliotecas de CAD: tanto desde la toolbox de Solidworks como desde la biblioteca online se pueden importar millones de modelos 2D y 3D proporcionados por los fabricantes y de componentes estándar, agilizando considerablemente el trabajo de diseño y facilitando la creación de la lista de materiales.
- Detección de colisiones: permite comprobar antes de empezar el proceso de fabricación que no existen interferencias o colisiones entre los componentes del diseño. También permite verificar que se cumple la distancia deseada entre las diferentes partes móviles del diseño.
- Ingeniería inversa: ayuda a reducir tiempos de desarrollo, reducir riesgos y aumentar la productividad de manera que dentro de ingeniería inversa se incluyen herramientas tales como la posibilidad de generar e importar geometrías sólidas desde datos de nubes de puntos escaneados, herramientas de creación de superficies que permiten crear geometrías complejas, trazado automático al importar archivos de imagen o la conversión de datos importados a datos nativos de Solidworks.

Capítulo 4

Trabajo desarrollado

En este apartado se describe todo el trabajo realizado durante la elaboración del presente proyecto final de máster. En primer lugar se describe brevemente la pequeña aplicación realizada para calibrar y comprobar el funcionamiento del robot Stäubli TX-60. Posteriormente se muestra el desarrollo seguido para realización de la aplicación clasificadora de panes de hamburguesa, diferenciando en esta parte entre los tres procesos principales seguidos: desarrollo y modelizado de los efectores finales que se utilizan en la aplicación implementada, diseño de la aplicación de visión artificial implementada en el software In-Sight Explorer, la cual proporcionará a la célula robotizada la información sobre la disposición de los objetos; y la creación de la célula robotizada de la aplicación realizada, la clasificación de los panes de hamburguesa (dentro de esta se utilizan dos efectores finales diferentes, por lo que se deben realizar dos células diferentes, aunque a efectos finales sea la misma célula pero cambiando la herramienta utilizada).

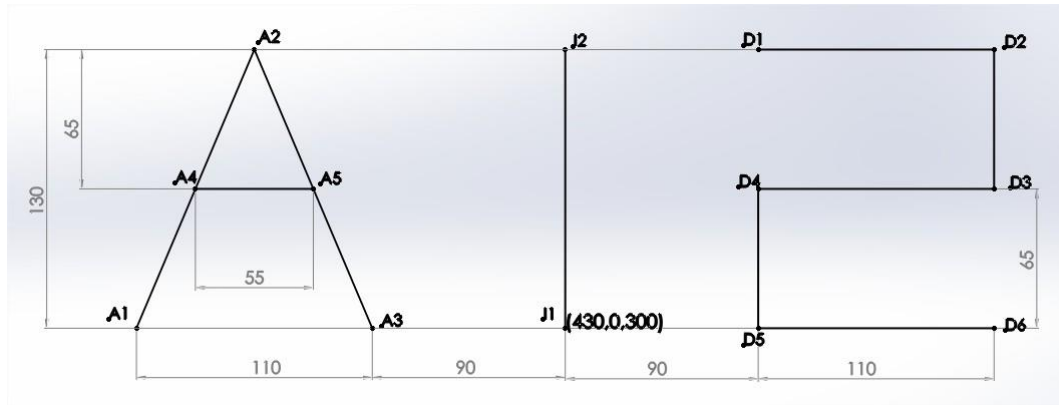
4.1 Aplicación inicial (escritura AI2)

Con la instalación del robot Stäubli TX60 no se disponía del software de VALTrack, necesario para poder realizar las tareas de seguimiento de los objetos que se desplazan por la cinta transportadora. Por ello, y para comprobar que el robot se encuentra bien calibrado después de su traslado y montaje, se realiza un primer contacto con él, creando varias aplicaciones para comprobar que sus movimientos sean correctos.

Todas estas aplicaciones son muy sencillas y no entran estrictamente dentro del desarrollo del proyecto, pero se incluye la aplicación diseñada para la escritura de las siglas AI2 por tener una mayor relación con los trabajos realizados en asignaturas cursadas durante el Máster y porque en ella se incluyen movimientos de aproximación, trabajo y alejamiento y por tanto el

control de velocidades en cada uno de los trazos. De esta manera, se definen tres tipos de velocidades: rápida, para los movimientos libres; mediana, para los movimientos de alejamiento; y lenta, para los movimientos de aproximación y trabajo.

Posteriormente, se definen los puntos importantes de las siglas a “dibujar”, siendo los siguientes y sus dimensiones:



0.1 Siglas de A12

El plano donde se realizarán los movimientos es el plano YZ, siendo por tanto la dirección X la que se utilizará como aproximación, definiéndose esta en 100mm. Los puntos de aproximación serán los correspondientes a los índices 1, con excepción de la letra A donde será necesario realizar un movimiento de alejamiento en A3 y desplazarse hasta A4 en movimiento libre para luego realizar una nueva aproximación lineal.

4.2 Desarrollo de aplicación clasificadora de panes

El desarrollo principal de este proyecto se basa en la creación de una aplicación clasificadora de panes de hamburguesa. Con esta aplicación se pretende demostrar el potencial que dispone hoy en día la robótica dentro de la cadena de producción de la industria alimentaria y concretamente en el subsector de la bollería. Actualmente, una gran parte de los trabajos requeridos dentro de este sector se realiza de forma manual por trabajadores, y estos trabajos son repetitivos y constantes, por lo que tienen un gran potencial para ser automatizados mediante una célula robotizada junto con la visión artificial.

El proyecto que se lleva a cabo consiste en la clasificación y recolocación de panes de hamburguesa dentro de una cinta transportadora de acuerdo a un porcentaje establecido dentro del total de objetos detectados. Por ejemplo, si una cinta transportadora se separa aguas abajo hacia dos líneas de producción, sería aconsejable que la distribución de los panes siguiese el orden de 50% a cada lado. Sin embargo, podría darse el caso de una distribución diferente de líneas o que en cada una de las líneas se realizase un empaquetado diferente en tamaño, por lo que en este caso sería conveniente una reordenación de porcentaje, por ejemplo 60%-40%. Otra situación donde sería interesante poder reordenar el porcentaje que se recoloca a cada lado de la cinta puede darse en caso de avería o problema técnico en alguna

de las líneas aguas abajo. Siguiendo el ejemplo de los porcentajes anteriores, pueden disponerse de tres líneas de empaquetado a un lado y dos líneas de empaquetado en otro lado (60%-40%). Si una de esas tres líneas sufriera una avería, podría recolocarse toda la producción en función de las líneas disponibles y utilizando las cuatro líneas totales al 50% en cada lado. Poniéndose en otra situación, se puede disponer de una cadena de montaje y por necesidades de producción introducir una nueva línea de empaquetado, lo cual aumentará el volumen de trabajo disponible en dicha zona, de manera que para aprovechar dicha disponibilidad se debería modificar la cantidad de panes de hamburguesa que se envía por ese lado de la cinta transportadora. Pero aún más allá, puede tenerse un periodo de inicialización donde la línea no trabaje al cien por cien de producción, por lo que puede desearse que la recolocación de los panes se realice de manera progresiva, a elección del usuario, dependiendo del tiempo de inicialización esperado.

Todos estos posibles casos se han tenido en cuenta a la hora de desarrollar la aplicación clasificadora de panes, permitiendo que el usuario establezca el porcentaje deseado de recolocación a cada lado de la cinta, y dándole la posibilidad de modificarlo sin tener que parar la aplicación. En caso de necesidad de modificación y como se ha explicado en los ejemplos mencionados, podrían darse dos condiciones: que se desee una modificación urgente por problemas técnicos u averías en alguna de las líneas aguas abajo o que se desee una modificación prolongada en el tiempo ante la modificación de las condiciones de distribución que se tiene en la instalación. Estos se ha tenido también en cuenta, permitiendo la modificación en cualquier punto de la aplicación y la completa libertad para la elección de cuan progresiva y duradera de desea la modificación del porcentaje, estableciendo el usuario el número de pasos a dar entre el porcentaje actual y el modificado final y el tiempo que transcurre entre cada uno de los pasos. Si se decidiera por una modificación urgente, el cambio sería inmediato; por lo que se adaptaría a las necesidades del cliente en cada caso.

De igual manera, este trabajo repetitivo puede ser cansado para un trabajador, llegando al punto de perder facultades a la hora de realizarlo, lo que supone un tiempo de ciclo mayor (ya que requerirá de más tiempo para realizar los mismos movimientos) e incluso puede suponer desvíos en las cantidades de producción. Con la automatización de esta tarea se elimina estos inconvenientes, ya que un robot nunca se cansará y mantendrá sus tiempos de ciclo constantes. Y como es sabido que a menor tiempo de ciclo se puede obtener una mayor producción que repercutirá en los beneficios finales obtenidos, se ha buscado desarrollar la aplicación de manera que su tiempo de ciclo sea lo más pequeño posible de acuerdo a las características técnicas del robot disponible (Stäubli TX60) y las condiciones de la célula de trabajo que se tienen.

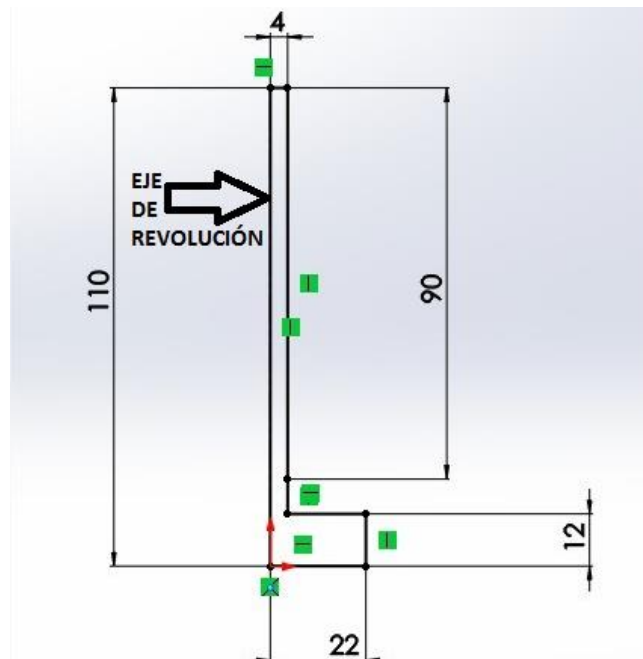
El desarrollo seguido para obtener las mejores condiciones posibles se detalla posteriormente en los apartados 4.2.3 y 4.2.4 de este proyecto, realizando una explicación pormenorizada de los pasos y acciones tomadas para la creación de la célula robotizada y la aplicación desarrollada.

4.2.1 Modelado de efectores finales

El modelado de los efectores finales que se utilizarán en la aplicación se realiza en el software de modelado Solidworks 2015, y si bien no son modelos complicados se explicará a continuación los pasos seguidos durante el proceso. Se habla de efectores finales y no de garras o pinzas pues el nombre genérico se adecúa más a lo modelado, ya que no tiene las características típicas de “dedos” para coger objetos sino que se pretende empujarlos sobre la cinta transportadora. Para tal fin, se realizan dos modelos diferentes con los cuales se realizarán demostraciones para poder comparar el comportamiento de uno y otro. De esta manera, el primero de los efectores se asemeja a un palo o vara delgada, lo que se presupone será una ventaja en condiciones donde la cantidad de objetos sea muy elevada por lo que será más sencillo desplazarse entre ellos sin desviar objetos que no se debería; mientras que el segundo de los efectores se asemeja a una pala o espátula, lo que proporciona una mayor superficie de contacto (y por tanto un desplazamiento más sencillo de los objetos) pero por otro lado la complicación del desplazamiento en situaciones de grandes cantidades de objetos.

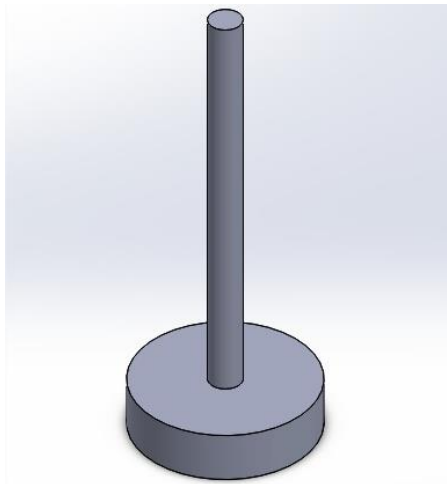
4.2.1.1 Primer efector: tipo vara delgada

Para realizar el modelado de esta pieza se toma la decisión de basarse en un eje de revolución alrededor del cual se realiza el siguiente croquis:



0.2 Croquis de efector final tipo vara

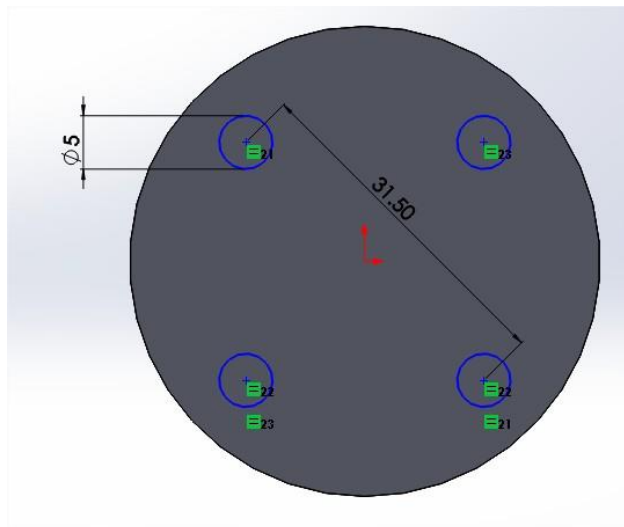
A partir de este croquis, se realiza un barrido a lo largo del eje de revolución establecido de manera que se consigue el cuerpo principal del efector.



0.3 Cuerpo principal del efector tipo vara

Obtenido el cuerpo principal, los siguientes pasos realizados tan sólo son acabados finales buscando que la pieza tenga un aspecto más agradable. Para ello, se redondea la punta del efector y la unión de la vara con la base.

El último paso a realizar es la creación de los agujeros de los taladros para poder conectar la pieza con el robot. Para ello, y siguiendo los datos de la documentación del robot Stäubli TX-60 en cuanto a sus dimensiones, se realiza el siguiente croquis en la base de la pieza:



0.4 Croquis de agujeros

Basándose en la documentación, los agujeros deben estar en una circunferencia de diámetro 31,5 mm y con 90° entre cada uno de ellos. El tamaño de los taladros es M5 (se incluyen en posteriores pasos) pero en el croquis se dibujan circunferencias de 5mm de diámetro para marcar las posiciones en las que deben realizarse.

De esta manera, quedaría el efector finalizado, quedando con el siguiente aspecto renderizado:

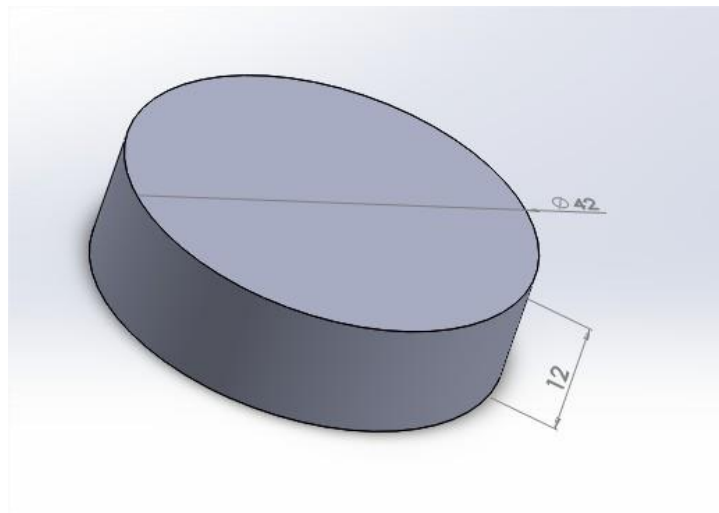


0.5 Renderizado del efector tipo vara

4.2.1.2 Segundo efecto: tipo pala

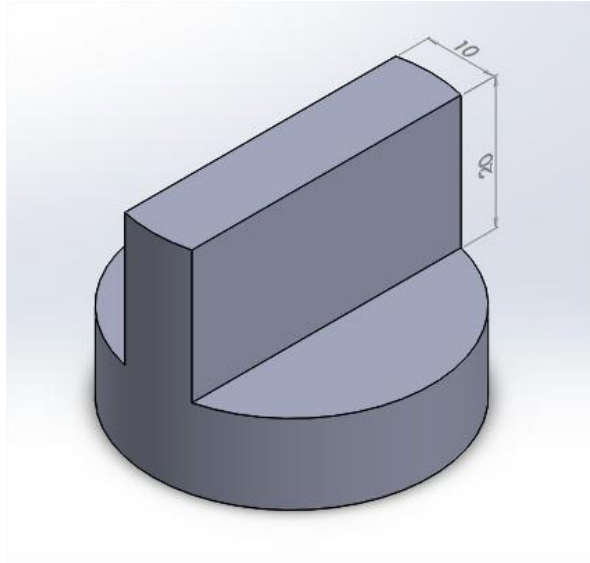
Para este efector se toma la decisión de realizar el modelado paso por paso y no basarse en una revolución como en el anterior pues se considera que el proceso será más sencillo.

Se comienza realizando un croquis de la base circular, que será de las mismas dimensiones que en el caso anterior ya que está diseñada en función de las dimensiones de la documentación del robot TX-60 con la idea de adecuarse al puño del robot.



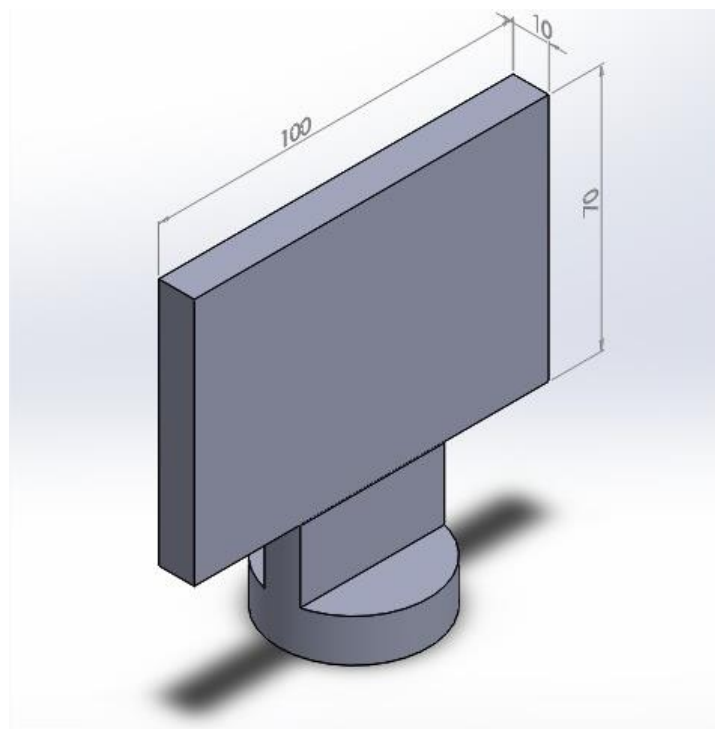
0.6 Base del efector final tipo pala

A continuación, se realizará un saliente sobre la base, en el cual se sustentará la pala propiamente dicha. Dicho saliente se adecua a la forma de circunferencia de la base y es de 20mm para poder proceder a aplicar sobre él los acabados que se explicarán posteriormente.



0.7 Base y saliente de efector final tipo pala

El siguiente paso es la creación de la pala, a la cual se le dará un mayor tamaño (100mm de longitud horizontal) y se prolongará 70mm, de manera que abarque por completo el tamaño de los panes de hamburguesa a desplazar.



0.8 Cuerpo principal del efector final tipo pala

Al igual que para el efector anterior, con este aspecto, y a falta de la realización de los taladros correspondientes, se podría llevar a cabo la aplicación deseada. Sin embargo, se procede a realizar una serie de acabados que le confieren a la pieza un mejor aspecto. En este caso, se realiza el redondeado de todas las aristas del ancho de la pala (en mayor proporción la parte inferior que la superior), se aplica un chaflán a la pala con el fin de reducir ligeramente el

material a utilizar para su posterior impresión 3D y se le añade un texto con el nombre del Instituto de Automática e Informática Industrial, en el cual se llevó a cabo la parte práctica de este proyecto.

Con todo esto, el aspecto final renderizado que tiene la pieza es:



0.9 Renderizado del efector final tipo pala

4.2.2 Aplicación de visión

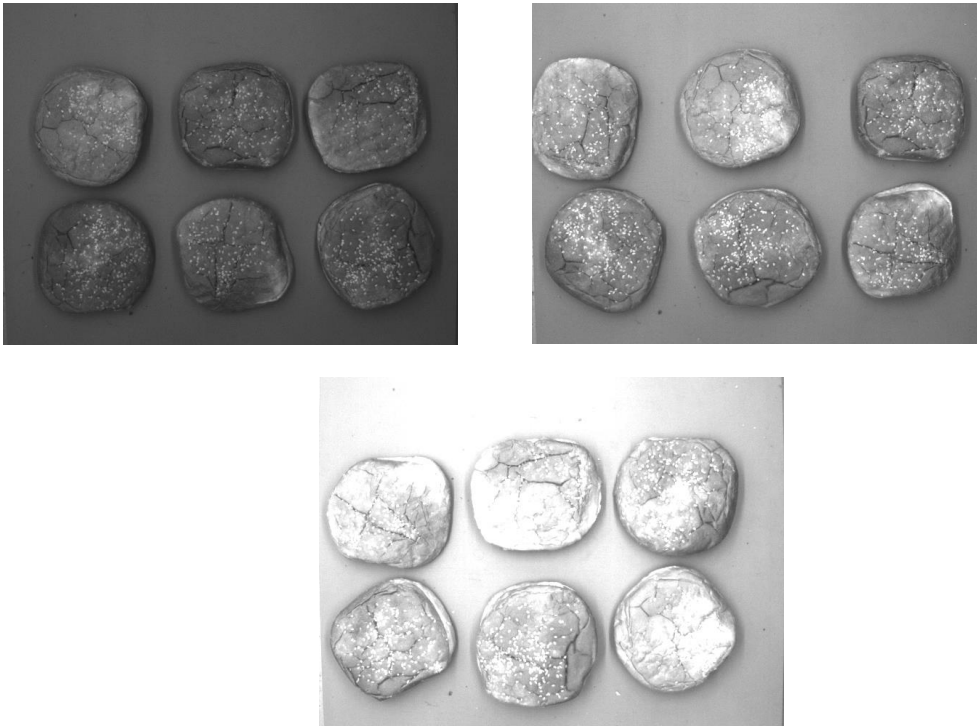
La utilización de una aplicación de visión artificial como sensor de presencia en aplicaciones robotizadas está cada vez más extendida gracias a las considerables mejoras que se han ido desarrollando en las cámaras industriales. Es por ello por lo que en este proyecto se decide utilizar la cámara Cognex IS-5100 como elemento auxiliar para la aplicación de clasificación de panes de hamburguesa.

En este subapartado se describe todo el proceso de desarrollo de la aplicación en el software In-Sight Explorer. Para ello, se ha realizado previamente el montaje del sistema de visión en el que se incluye:

- Cámara industrial Cognex IS-5100.
- Iluminación externa mediante dos tubos fluorescentes.

La altura de montaje, y con ello la distancia de trabajo, se realiza en aproximadamente 53,3 cm. Con esta altura se consigue que el largo de la resolución en píxeles de las imágenes tomadas por la cámara (recordar que es de 640x480) se adapte al ancho de la cinta transportadora. La iluminación externa se monta con la finalidad de eliminar la iluminación difusa de las imágenes tomadas, consiguiendo una iluminación uniforme en toda la imagen de manera que las imágenes obtenidas sean con mejores cualidades.

Otro punto a tener en cuenta antes de realizar la aplicación es el tiempo de exposición, tiempo en el cual la luz incide sobre el sensor digital, que se utilizará para capturar las imágenes. Según este tiempo, las imágenes obtenidas tendrán mayor o menor claridad ya que variará la cantidad de luz que llega al sensor. Con ello también se consigue reducir notablemente el movimiento, “congelando” la imagen en el momento de obtenerla. Para definirlo, se han realizado diferentes pruebas con distintos tiempos de exposición, con la finalidad de obtener experimentalmente cual será el más adecuado para la aplicación.



0.10 Diferentes tiempos de exposición: arriba izquierda: 1,25 ms; arriba derecha: 2,25ms; abajo: 3,5 ms

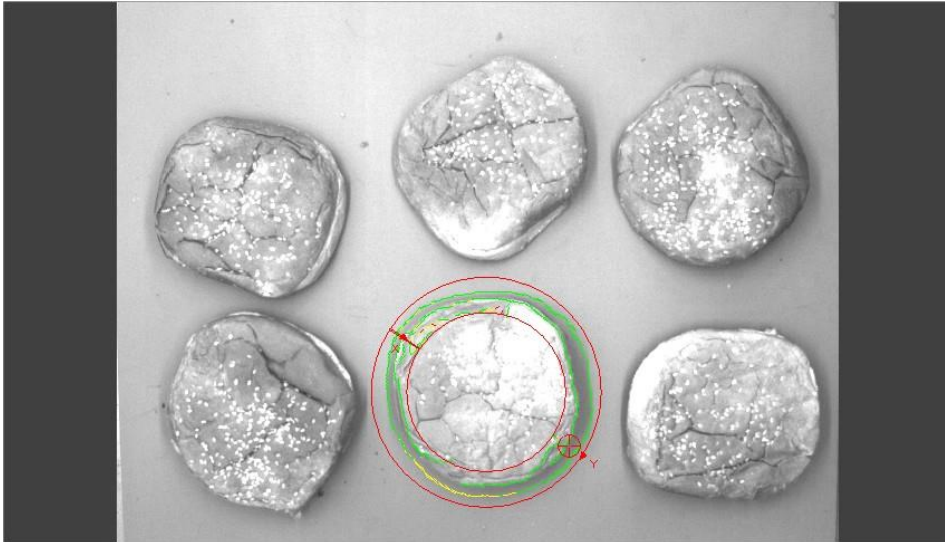
Después de diferentes pruebas, en las que se obtienen capturas con varios tiempos de exposición y se obtiene una serie de aproximadamente 20 imágenes con el fin de poder compararlas, se decide optar por un tiempo de exposición de 3 milisegundos, pues se considera que es con el que mejor cualidades de imagen se obtiene para la aplicación a desarrollar.

Definidas todas las características que tendrá la imagen, se procede a la implementación de la aplicación.

En la aplicación se busca realizar la detección de los panes de hamburguesa que se desplacen por la cinta transportadora, de manera que se le pase al controlador del robot las coordenadas de estos y se pueda realizar la clasificación de los mismos dependiendo del número de panes detectados.

Por ello, el primer paso a realizar es definir el patrón de detección que se va a utilizar, para lo que se utiliza el comando 'TrainPatMaxPattern', el cual con una serie de pasos nos permite

definir un patrón de forma sencilla. Como se desea detectar los panes de hamburguesa de forma general y no las características de cada uno de ellos (defectos, irregularidades en la cocción, huecos, etc.) se decide que el patrón de detección sea un anillo circular, con la finalidad de detectar los bordes de los panes de hamburguesa.



0.11 Patrón de detección

Pese a que los panes de hamburguesa no son exactamente circulares (especialmente después de sufrir todo el proceso de producción y venta, como es el caso de los utilizados para las pruebas de visión) se entiende que recién salidos en fábrica tendrán una forma mucho más definida y parecida, por lo que si la aplicación es viable para este caso se obtendrán buenos resultados en condiciones de mayor similitud. Ante esta deformidad en los panes de hamburguesa utilizados, se incluye en los parámetros del patrón el término de la elasticidad (con valor de un píxel), el cual permite al comando PatMax tolerar cambios geométricos en el perímetro delineado por las características establecidas.

Imagen	\$A\$0	= Image
Elemento	{0,0,0}	
Región de patrón	{288,963,242,035,31,379,545,092,56,794,-360}	
X	288,963	
Y	242,035	
Alto	31,379	
Ancho	545,092	
Ángulo	56,794	
Curva	-360,000	
Región externa	0	= 0
Origen del patrón	{87,-1}	
Fila desviada	87,000	
Columna desviada	-1,000	
Configuración del patrón	{PatQuick,1,0,0,0,0}	
Algoritmo	PatQuick	
Elasticidad	1,000	
Ignorar polaridad	<input type="checkbox"/>	
Sensibilidad	0,000	
Granularidad gruesa	0,000	
Granularidad fina	0,000	
Reutilizar imagen de entrenamiento	<input type="checkbox"/>	
Tiempo de espera	5000	
Mostrar	ocultar todo	

0.12 Características para definir patrón de detección

Definido el patrón de detección, se utiliza la función 'FindPatMaxPattern', la cual se encargará de buscar el patrón establecido en las imágenes que se vayan obteniendo. A esta función se le debe pasar el número de patrones que debe buscar en la imagen y este es un punto de conflicto con el que se debe tratar. Lo más flexible sería establecer un número elevado de patrones a buscar, de manera que la aplicación pudiera servir para cualquier volumen de trabajo, pero ello conlleva tener que tratar con los errores que surgen si no se detecta algún patrón dentro del nivel de aceptación establecido. Es por ello que se decide establecer un número relativamente pequeño, de 6 unidades, en los patrones a buscar, ya que debido al tamaño de los objetos a detectar (los panes de hamburguesa) con este número se ocupa gran parte del área de trabajo y no es probable la detección de un mayor número de patrones sin repetición.

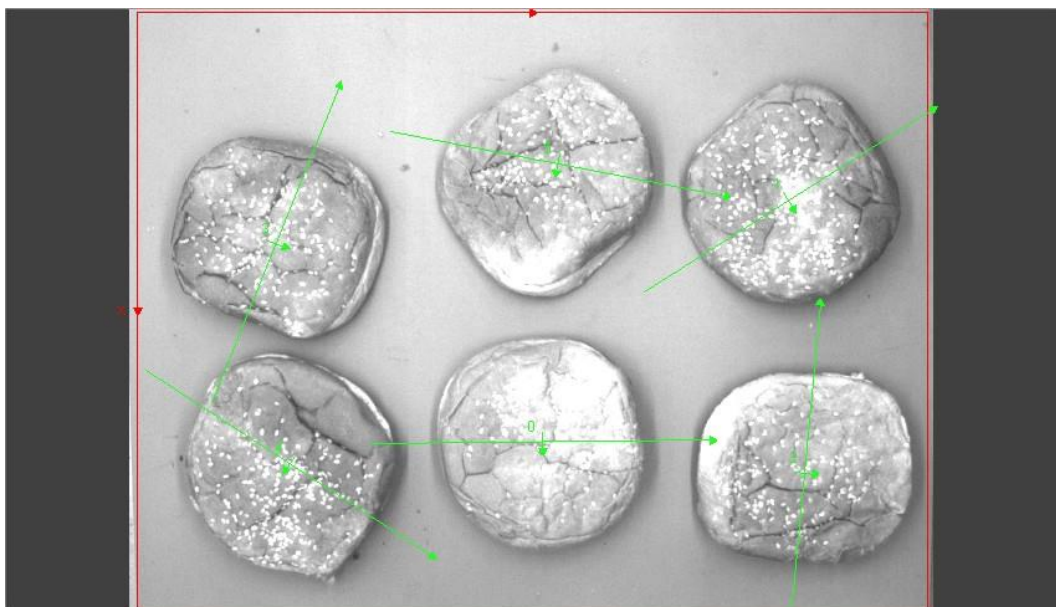
Cabe recalcar esta última expresión ("sin repetición"). Esto es porque si hubiese un número menor de objetos a detectar del número establecido para buscar (en este caso, 6) la aplicación podría encontrar un patrón que cumpla el nivel de aceptación establecido pero que corresponda a un mismo objeto detectado con un mayor nivel de similitud. Esta situación no es común que se dé, ya que las condiciones del patrón de detección establecidas limitan la duplicidad en gran medida, pero pese a ello se ha realizado un proceso de búsqueda de repeticiones para eliminarlas en caso de que se dieran.

Como último aspecto a remarcar en la función de detección de patrones, está las tolerancias establecidas en la búsqueda de los patrones, la cual abarca los 360 grados (es decir, es indiferente la orientación que tenga el patrón encontrado) y va en un rango de tamaño entre el 90% y el 110% del patrón establecido.

Imagen	\$A\$0	= Image
Elemento	{0,0,0}	
Buscar región	{1,814,6,028,477,361,629,923,0,0}	
Región externa	0	= 0
Patrón	\$A\$2	= Patterns
Número a buscar	6	
Aceptar	30	
Contraste	10	
Confusión en puntuación	<input checked="" type="checkbox"/>	
Región exterior	0	
Buscar tolerancias	{-180,180,90,110,Sólo escala uniforme,100,100}	
Inicio de ángulo	-180	
Fin de ángulo	180	
Inicio de escala	90,000	
Fin de escala	110,000	
Relación alto/ancho	Sólo escala uniforme	
Inicio de relación alto/ancho	100,000	
Fin de relación alto/ancho	100,000	
Buscar superposición	{80,360,140,140}	
Tiempo de espera	5000	
Algoritmo	Patrón entrenado	
Mostrar	ocultar todo	

0.13 Características de búsqueda de patrones

Con estas condiciones, la detección de los panes de hamburguesa se realiza de manera satisfactoria, siendo un ejemplo de los resultados obtenidos la siguiente imagen:



0.14 Ejemplo de patrones detectados con FindPatMaxPattern

La función de 'FindPatMaxPattern' devuelve una estructura que contiene toda la información de cada uno de los patrones detectados, y por defecto In-Sight Explorer extrae de ella las características de fila, columna, ángulo, escala y puntuación (estas cinco características las principales que se necesitaran: fila, columna y ángulo para saber la posición de cada uno de

los patrones y escala y puntuación para conocer la similitud del patrón detectado con el establecido).

La forma en la que se visualiza en la hoja de cálculos de In-Sight Explorer es la siguiente:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
0	Image								
1									
2	Patterns	1,000							
3		Índice	Fila	Col	Ángulo	Escala	Puntuación		Condicional
4	Pattern	0,000	271,037	236,035	2,640	101,097	65,700		1,000
5		1,000	386,559	467,389	93,704	103,874	62,746		1,000
6		2,000	120,907	523,132	14,575	95,684	54,628		1,000
7		3,000	331,432	86,478	9,453	98,838	53,722		1,000
8		4,000	145,987	103,954	-11,198	95,804	51,179		1,000
9		5,000	192,160	381,112	111,211	100,431	35,263		1,000
10									

0.15 Cuadrícula de detección de patrones

En este punto, cabe señalar la aparición de diferentes flecha conectoras entre algunas de las celdas. Esto se debe a una opción existente que permite de marcar los niveles de dependencia entre las celdas, lo que permite comprobar que para la obtención de los patrones detectados se necesita una imagen (correspondiente a la celda A0) y la definición de un patrón de búsqueda (celda A2). Las celdas correspondientes a los valores extraídos de fila, columna, ángulo, etc. pueden comprobarse que provienen de la estructura de patrones (celda A4).

El siguiente paso que se realiza es lo anteriormente comentado de eliminar los posibles patrones repetidos. Para ello se tiene en cuenta que el valor de fila y columna devuelto por la estructura de patrones detectados corresponde con el centro del patrón, el cual está centrado a su vez en el centro de los panes de hamburguesa. Con esto y con el conocimiento del ancho y alto del patrón establecido, se realiza una comparativa lógica que nos devolverá si el patrón en cuestión esta duplicado. Teniendo en cuenta que el orden de los patrones está establecido por su puntuación, siempre supondremos que los patrones con índices inferiores (es decir, con mayor puntuación) son los correctos. Establecido esto, se realiza una comparativa de cada uno de los índices con sus sucesivos, comparando si el valor, tanto de fila como de columna, del índice mayor se encuentra en el rango del valor correspondiente de fila y columna del índice previo más/menos el alto y ancho del patrón. En resumen, se comprueba que el valor de los índices posteriores no quede “dentro” del patrón previo. Si se diera este caso, la comparativa nos devolvería un valor alto (un 1), el cual se utilizaría posteriormente para conocer el número de patrones duplicados y cual debe eliminarse.

10									
11		Comparativa para eliminar duplicidades							
12		patron 0 con el resto	patron 1 con el resto	patron 2 con el resto	patron 3 con el resto	patron 4 con el resto			
13		0->1	0,000	1->2	0,000	2->3	0,000	3->4	0,000
14		0->2	0,000	1->3	0,000	2->4	0,000	3->5	0,000
15		0->3	0,000	1->4	0,000	2->5	0,000		
16		0->4	0,000	1->5	0,000				
17		0->5	0,000						

0.16 Cuadrícula de comparativa de patrones duplicados

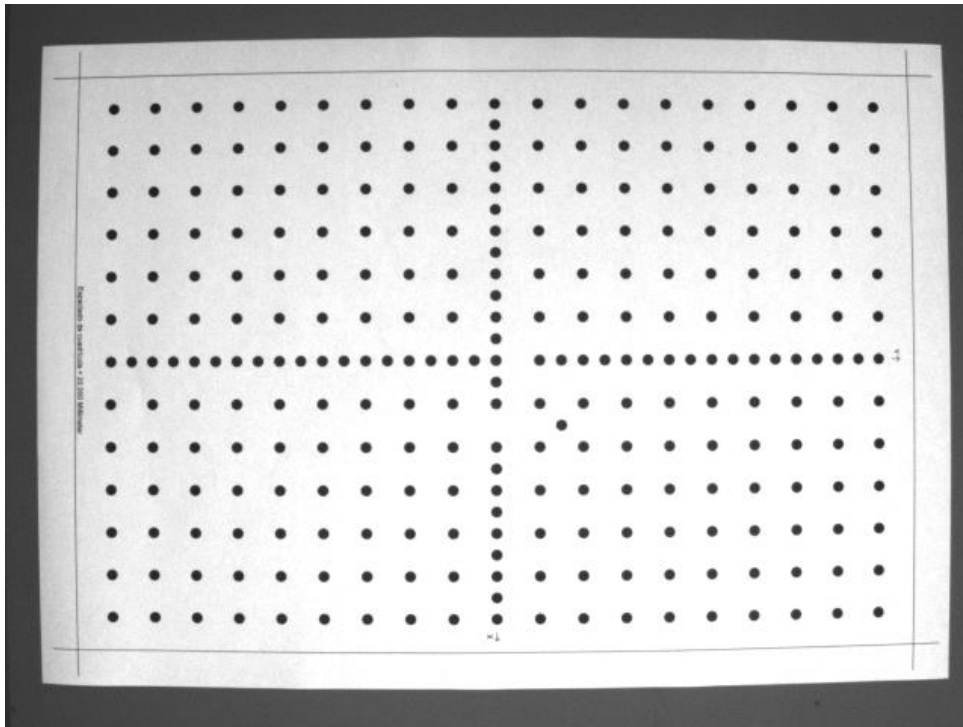
Para proceder a la eliminación, se tiene en cuenta que se haya detectado el patrón de índice relativo (esto corresponde a la flecha azul superior derecha, en donde se indica con un valor lógico de 1 si se ha realizado correctamente la detección de ese patrón). Si se da el caso en el que el patrón ha sido detectado y alguna de las comparaciones de duplicidad sale positiva, en el sector de “Eliminación de duplicidades” obtendríamos un mensaje que nos indica el índice de patrón debe eliminarse (en la imagen mostrada se obtiene para todos los caso un mensaje de “OK” debido a que no existen duplicidades) y un uno, con la finalidad de realizar un sumatorio final para calcular el número de patrones de debe eliminarse (en el caso que se diera que existe más de una duplicidad).

Así mismo, se obtiene de la estructura de patrones el número de patrones detectados mediante el comando ‘GetNFound’ (celda G20) y se calcula el número de patrones que deberían detectarse (es decir, el número teórico de objetos que hay en la imagen) restando a los patrones detectados el número de patrones duplicados.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
6		2,000	120,907	523,132	14,575	95,684	54,628		1,000		
7		3,000	331,432	86,478	9,453	98,838	53,722		1,000		
8		4,000	145,987	103,954	-11,198	95,804	51,179		1,000		
9		5,000	192,160	381,112	111,211	100,431	35,263		1,000		
10											
11	Comparativa para eliminar duplicidades										
12		patron 0 con el resto	patron 1 con el resto	patron 2 con el resto	patron 3 con el resto	patron 4 con el resto					
13	0->1	0,000	1->2	0,000	2->3	0,000	3->4	0,000	4->5	0,000	
14	0->2	0,000	1->3	0,000	2->4	0,000	3->5	0,000			
15	0->3	0,000	1->4	0,000	2->5	0,000					
16	0->4	0,000	1->5	0,000							
17	0->5	0,000									
18											
19	Eliminacion de duplicidades						PATRONES DETECTADOS				
20		0,000 OK		0,000			6,000				
21		1,000 OK		0,000							
22		2,000 OK		0,000			PATRONES QUE DEBERIA DETECTAR				
23		3,000 OK		0,000			6,000				
24		4,000 OK		0,000							
25		5,000 OK		0,000							
26			ELIMINAR	0,000							
27											

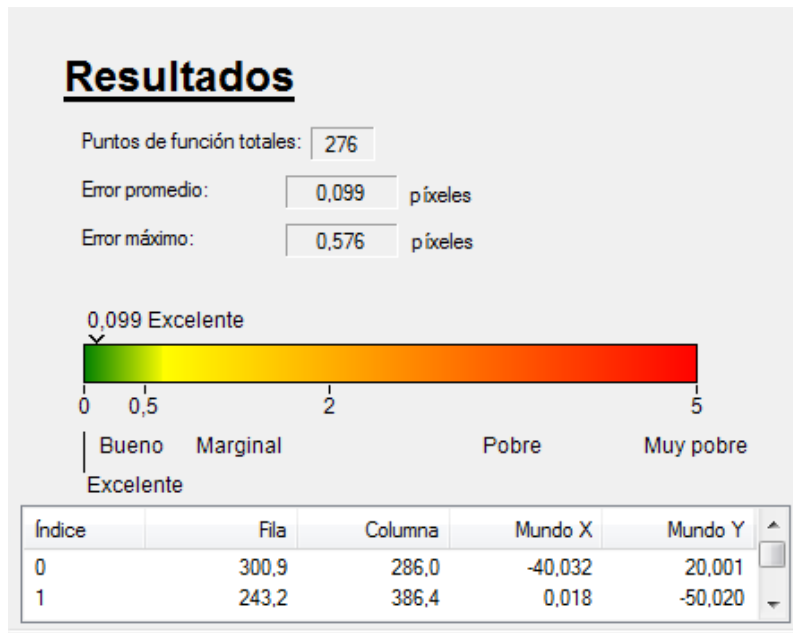
0.17 Cuadrícula de eliminación de duplicidades

Con todo el tratamiento de duplicidades hecho y marcados (si se diese el caso) los patrones que deberían eliminarse, conviene remarcar que los valores que se han ido utilizando hasta ahora corresponden a píxeles de la imagen, por lo que debe realizarse una calibración para trasladar esos píxeles a valores en el mundo real. Para realizar dicha calibración, debe establecerse en primer lugar cual será la plantilla de calibración. En este caso, dicha plantilla se realiza mediante una cuadrícula de puntos con marca fiducial de 200 mm de separación que tiene el siguiente aspecto:



0.18 Plantilla de calibración

El propio software de In-Sight Explorer nos facilita un análisis de calibración a partir de diferentes puntos de la imagen, obteniendo un resultado de “Excelente” con un error promedio inferior a 0,1 píxel.



0.19 Resultado de análisis de calibración

Con la calibración hecha, se hace uso del comando 'TransPatternToWorld' para pasar los valores de píxeles de los patrones detectados a valores en el mundo real. Con ello, ya disponemos de la información real sobre la situación de cada uno de los patrones detectados.

28									
29	CALIBRACION								
30	Calib								
31									
32	Transformacion a coordenadas mm								
33		Índice	Fila	Col	Ángulo	Escala	Puntuación		
34	Patterns	0.000	25.093	-61.660	2.391	101.097	65.700		
35		1.000	92.689	99.783	92.719	103.874	62.746		
36		2.000	-80.899	141.279	13.512	95.684	54.628		
37		3.000	67.140	-168.085	9.003	98.838	53.722		
38		4.000	-64.164	-155.442	-10.742	95.804	51.179		
39		5.000	-30.119	39.561	111.080	100.431	35.263		
40									

0.20 Cuadrícula de calibración

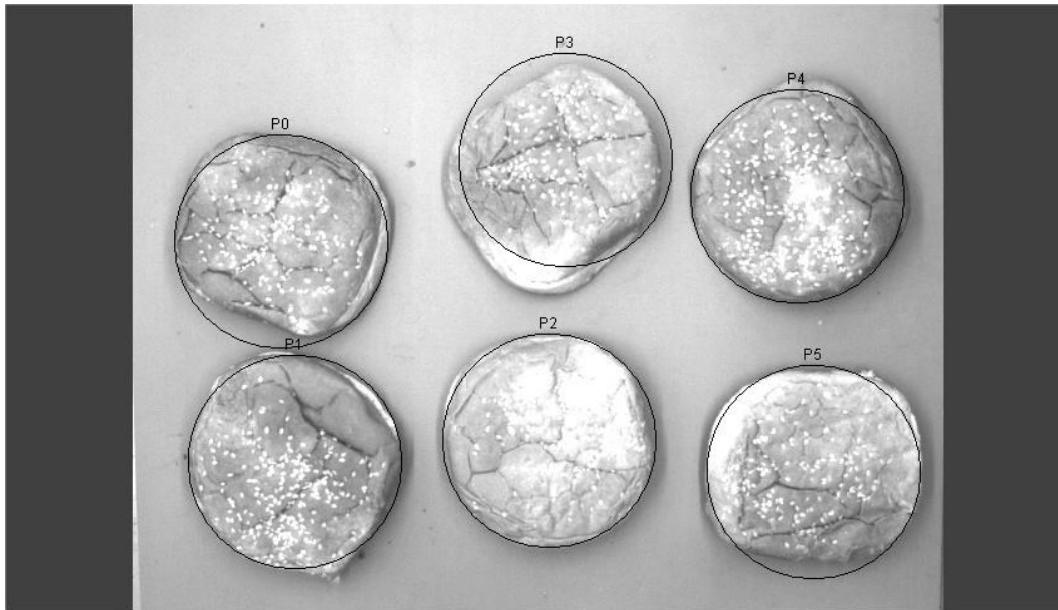
Cabe destacar que con la calibración se realiza una modificación del punto tomado como origen de la imagen. Hasta ahora, con valores de píxeles, el origen se encontraba en la esquina superior izquierda y los valores iban aumentando a medida que se descendía o se desplazaba hacia la derecha. Con la calibración, el origen se toma como el centro de la imagen y los valores positivos en X se toman hacia abajo y los valores positivos en Y hacia la derecha.

A continuación, se realiza una reordenación de los patrones detectados de manera que estos no estén según su puntuación sino de abajo a arriba (es decir, ordenados por valores X o de filas descendentes). Esto se consigue con el comando 'SortPatterns' y se realiza con la finalidad de ordenar los objetos detectados según su posición en la imagen con respecto a la proximidad al área de trabajo del robot y no por su semejanza con el patrón generado.

40													
41	Ordenar de abajo a arriba (coord mm)							Dibujo de círculos en lugares de detección					
42		Índice	Fila	Col	Ángulo	Escala	Puntuación		Fila	Col			
43	Patterns	0.000	92.689	99.783	92.719	103.874	62.746	Point	366.559	467.389	Plot		
44		1.000	67.140	-168.085	9.003	98.838	53.722	Point	331.432	86.478	Plot		
45		2.000	25.093	-61.660	2.391	101.097	65.700	Point	271.837	236.035	Plot		
46		3.000	-30.119	39.561	111.080	100.431	35.263	Point	192.160	381.112	Plot		
47		4.000	-64.164	-155.442	-10.742	95.804	51.179	Point	145.987	103.954	Plot		
48		5.000	-80.899	141.279	13.512	95.684	54.628	Point	120.907	523.132	Plot		
49													

0.21 Cuadrícula de ordenación de patrones

Así mismo, en esta parte de la aplicación se realiza el dibujo de un círculo centrado en cada uno de los patrones detectados y con un radio que corresponde al tamaño de los panes de hamburguesa. Cada dibujo irá etiquetado con el índice correspondiente del patrón. Esto se realiza no por necesidad sino con la finalidad de favorecer la visualización de los patrones detectados y la eficacia con la que se realiza. Un ejemplo de ello es la siguiente imagen:



0.22 Dibujo de círculos en lugar del patrón detectado

El siguiente paso a realizar es la aplicación de supresión de errores (en el caso que se dieran) con el fin de no propagarlos y que afecte al envío de datos al controlador del robot. Esto se consigue con el comando "ErrFree", el cual establece como cero lógico cualquier error que obtengamos en los datos, por lo que si son utilizados más adelante en alguna relación de este tipo no lo prolongaremos.

49											
50	Ordenar de arriba a abajo (CON ELIMINACION DE ERRORES)							Ver cuantos hay en cada lado del eje central			
51	índice	Fila	Col	Ángulo	Escala	Puntuación					
52	0.000	92.689	99.783	92.719	103.874	62.746	0.000				
53	1.000	67.140	-168.085	9.003	98.838	53.722	1.000				
54	2.000	25.093	-61.660	2.391	101.097	65.700	1.000	Lado IZQ		3.000	
55	3.000	-30.119	39.561	111.080	100.431	35.263	0.000				
56	4.000	-64.164	-155.442	-10.742	95.804	51.179	1.000				
57	5.000	-80.899	141.279	13.512	95.684	54.628	0.000	Lado DER		3.000	
58											

Se aprovecha también para aprovechar que después de la calibración el origen de la imagen queda en el centro de la misma. Con esta característica, es fácil diferenciar los objetos que se encuentran a la izquierda y derecha del eje central, lo que puede servir de ayuda a la hora de conocer la distribución de los objetos por la imagen. Para ello, solamente debe establecerse una condición de que el valor en Y del patrón detectado sea superior a 0, con lo cual estaría en el lado derecho de la imagen, y sumar todos los valores positivos. La diferencia entre el número de patrones detectados y el número de patrones con valores Y positivos (es decir, patrones en el lado derecho) nos dará los patrones que se encuentran en el lado izquierdo. Esto puede ser de utilidad a la hora de realizar la clasificación de los panes de hamburguesa, pues conocemos los objetos que están más en los extremos (los cuales convendría nos desplazar y sí hacerlo con los cercanos al eje central) y si están distribuidos equitativamente por la superficie.

Calculados todos los valores, tan solo quedaría realizar la comunicación con el robot Stäubli TX-60 para el envío de los puntos detectados. Para ello, el software de Cognex In-Sight Explorer dispone de una función ya implementada para los principales fabricantes de robots del mundo, entre los que se encuentra Stäubli. Por ello, tan solo debemos escoger esta opción y pasarle los parámetros de la posición (X, Y) y el ángulo de orientación del patrón (aunque en esta aplicación la orientación no sea fundamental por lo que en última instancia se establecerá como 0 para todas las orientaciones). Estos datos los incluirá en un *string* que será lo que envía al controlador del robot para su utilización.

67					
68	Staubli				
69		X	Y	Angle	
70	Coordinates:	92.689	99.783	92.719	
71	Data String:	92.6886,99.7832,92.7195			
72	Coordinates:	67.140	-168.085	9.003	
73	Data String:	67.1399,-168.0853,9.0035			
74	Coordinates:	25.093	-61.660	2.391	
75	Data String:	25.0926,-61.6595,2.3912			
76	Coordinates:	-30.119	39.561	111.080	
77	Data String:	-30.1195,39.5613,111.0803			
78	Coordinates:	-64.164	-155.442	-10.742	
79	Data String:	-64.1638,-155.4417,-10.7419			
80	Coordinates:	-80.899	141.279	13.512	
81	Data String:	-80.8993,141.2791,13.5118			
82					

0.23 Cuadrícula de envío de datos a Stäubli

Aunque este método enviaría los datos al controlador, dentro del módulo de Stäubli para realizar el tracking (ValTrack) existe un ejemplo para el uso de una cámara de visión artificial conectada con el robot TX-60, en el cual se realiza la lectura específica en unas celdas determinadas. Es por ello que el envío se realiza a partir de estas últimas, puesto que se utiliza en varias funciones ya implementadas cuya modificación sería muy engorrosa y en muchos casos de acceso restringido.

104									
105			X	Y	RZ			ID	
106			92.689	99.783	0.000			0.000	
107			67.140	-168.085	0.000			0.000	
108			25.093	-61.660	0.000			0.000	
109			-30.119	39.561	0.000			0.000	
110			-64.164	-155.442	0.000			0.000	
111			-80.899	141.279	0.000			0.000	
112									
113									
114									
115									
116		OBJ DETECT							
117		6.000							
118									
119	VALOR IMAGEN								
120	160.000								

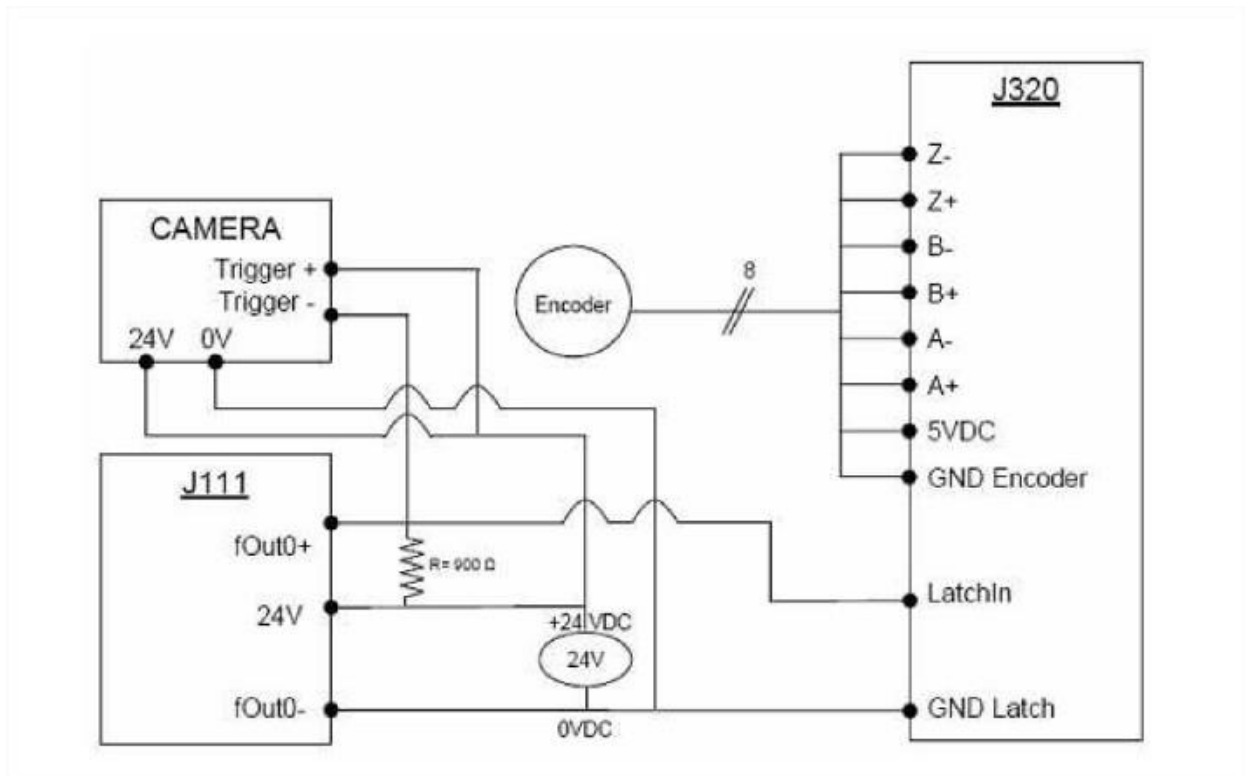
0.24 Cuadrícula de envío de datos específico a Stäubli

De esta manera, la aplicación de Stäubli necesitaría las siguientes características en las correspondientes celdas: en la celda A120 se envía el valor de la imagen, es decir, el número de imágenes tomadas; en la celda B117 se envía el número de objetos detectados en cada imagen a partir del comando 'GetNFound' explicado con anterioridad; en las celdas I106 en adelante, hasta el número de objetos detectados, se envía un identificador de objeto (esto es por si se realizara una clasificación de los objetos según sus características, pudiendo identificar los diferentes, defectuosos, etc. En este caso, como la clasificación es solo por posiciones, el identificador será el mismo para todos); y en las celdas D106, E106 y F106 en adelante, igualmente hasta el número de objetos detectados, se realiza el envío de los valores de (X, Y) y la orientación respectivamente, donde puede comprobarse cómo se ha establecido esta última en cero para todos los objetos pues al ser objetos prácticamente circulares nos es indiferente la orientación de detección del patrón.

4.2.3 Instalación e inicialización de la aplicación robótica

En este apartado se expone el proceso de montaje, conexión, programación y verificación de la aplicación clasificadora de panes propiamente en sí, pues junto con la aplicación de visión artificial es la parte fundamental del trabajo desarrollado.

Para poder llevar a la práctica la aplicación, deben estar conectados entre sí los tres equipos implicados en ella: el controlador del robot, que actuará como maestro; la cámara de visión artificial, la cual se utilizará como sensor de detección; y el encoder del motor que mueve la cinta transportadora, con cuya señal se podrá realizar el tracking de los objetos que se desplazan. Dichos tres equipos deben seguir el siguiente esquema de conexión:



0.25 Esquema de conexiones

El conector J111 corresponde a las entradas/salidas rápidas del controlador, utilizadas para generar la señal de *latch* que se envía a la cámara y al encoder; y el conector J320 corresponde con la tarjeta lectora del encoder Dual ABZ con configuración STARC2. Los codificadores utilizados con la tarjeta deben ser del tipo incremental, con señales 5V diferenciales A, B, Z (tipo RS422 o TTL). La alimentación 5V es proporcionada por la tarjeta DUAL ABZ y su intensidad está limitada a 250mA por codificador.

En este punto, surge un inconveniente de incompatibilidades, pues los encoders acoplados a los motores de las cintas transportadoras disponibles en el LASA (Laboratorio de Automatización para el Sector Alimentario) funcionan con tecnología HTL (deben estar alimentados a 24V) y no ofrecen salidas duales A, B, Z.

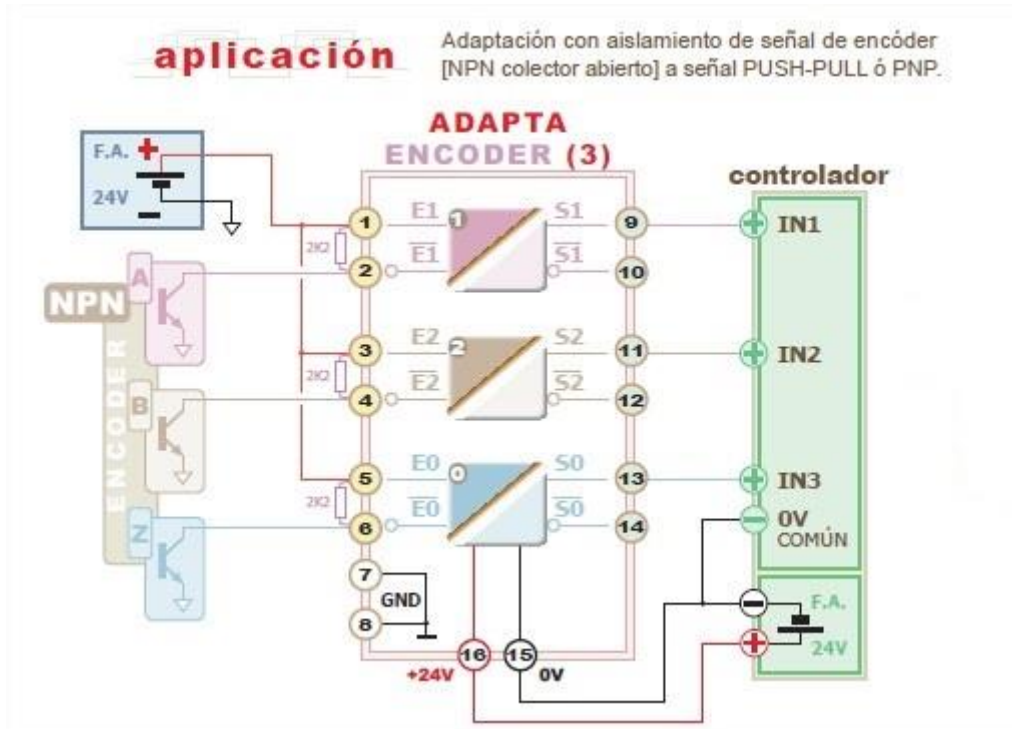
Para solucionar dicho problema, se emplea en primer lugar un divisor de tensión (24V/5V) junto con la duplicación e inversión de las señales proporcionadas por el encoder, pero esta solución no resulta efectiva pues las pérdidas existentes debilitan la señal de manera que a la llegada al controlador no se cumplen las condiciones de intensidad necesarias para que sean detectados los pulsos del encoder. Analizando mediante osciloscopio la señal obtenida, se detecta también un problema de ruido en la señal:



0.26 Ruido observado en la señal del encoder

Tal magnitud de ruido afecta considerablemente al buen funcionamiento de la aplicación, pues los picos que ocasiona pueden interpretarse como pulsos erróneamente. Esto se debía al cable que encorder que, al pasar cerca de los controladores de los robots disponibles en el LASA, le entra ruido a la señal. Para solucionarlo, se conecta a tierra el apantallamiento del cable, de manera que se consigue eliminar casi en su totalidad los picos de ruido existentes y se consigue por tanto una señal mucho más nítida y estable, adecuada para la aplicación.

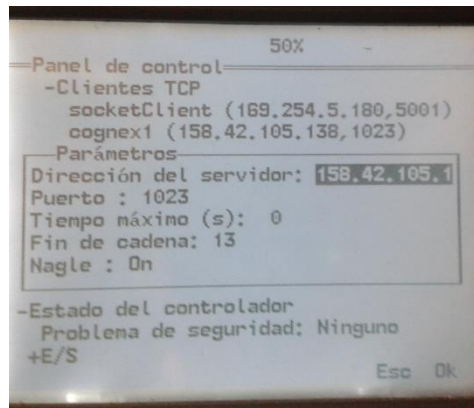
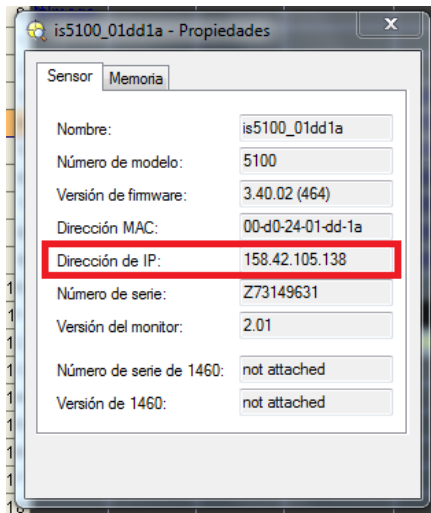
Para solucionar el problema con la señal que se tiene del encoder y su incompatibilidad con la necesitada por el controlador del robot, y ante el no funcionamiento de la primera opción planteada, se realiza la adquisición de un equipo adaptador de encoder, el cual nos ofrece garantía de un correcto desempeño tanto en intensidad como en voltaje. Dicho adaptador irá conectado entre el encoder y el conector J320 del controlador, correspondiente a la tarjeta lectora Dual ABZ, de manera que a la salida del adaptador se dispondrá de las señales A, B y Z correctamente duplicadas y adaptadas a la tecnología TTL (5V). El conexionado del adaptador sigue el siguiente esquema:



0.27 Conexión del adaptador de encoder

Para un correcto aislamiento entre entradas y salidas, es estrictamente necesario que las fuentes de alimentación sean independientes una de la otra, por lo que se hace necesaria la utilización de una fuente externa auxiliar.

Para poder realizar la tarea de seguimiento, el fabricante del robot Stäubli tiene diseñado un paquete de software, VALTrack, el cual incorpora algunas librerías que permiten y facilitan la configuración del sistema. Dentro de esas librerías se encuentra una de detección, la cual puede utilizarse como base para la comunicación entre el controlador del robot y una cámara Cognex InSight. El protocolo de comunicación está basado en TCP/IP, pero para ello previamente debe definirse un socket de comunicación desde el robot. El socket funcionará como cliente y lleva el nombre de "cognex1", definido como el utilizado en la librería de VALTrack. Se define su dirección de servidor, la cual debe coincidir con la dirección IP de la cámara Cognex InSight y que puede observarse desde el software de In-Sight Explorer.



0.28. A) Dirección IP de cámara Cognex 5100 B) Definición de socket de comunicación

Como último paso en la configuración del socket, está la definición del puerto Telnet, que debe coincidir igualmente entre cámara y controlador. Por defecto, el puerto de la cámara está definido como el 23, pero dentro del controlador CS8 los puertos por debajo de 1000 son puertos reservados para determinadas funciones, por lo que es altamente recomendable utilizar puertos superiores a 1000 para evitar posibles interferencias. Es por ello que se reconfigura el puerto hasta el 1023, de manera que se elimina la posibilidad de interferencias en la comunicación.

Dentro del paquete de software de VALTrack, también viene incluida una aplicación asistente que guía al usuario para la configuración de las siguientes propiedades de la cinta transportadora:

- La **posición y orientación** de la **cinta transportadora** dentro del marco de referencia del robot. La orientación se utiliza para definir la dirección en la que se mueve la cinta.
- El **factor de escala** entre milímetros en la superficie de la cinta transportadora y la cuenta del encoder (mm / grados en el caso de la tarjeta DUAL ABZ).
- Los **límites** del área en la que se permite que el robot trabaje dentro de la cinta transportadora (**área de seguimiento**).
- La **posición** del dispositivo de **detección** en el marco de referencia del robot.

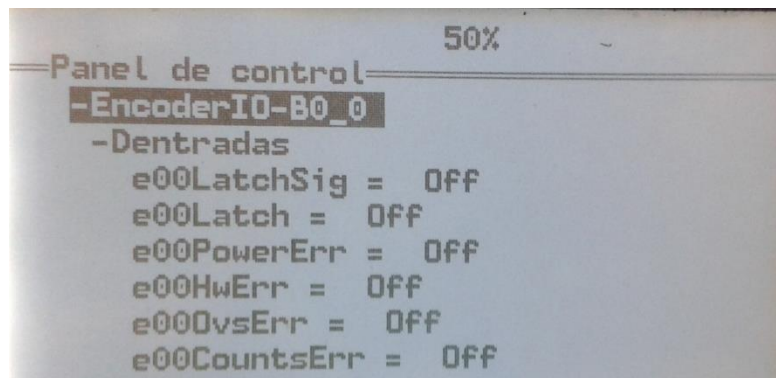
Antes de proceder a poner en marcha el asistente, deben verificarse varios puntos de hardware, de manera que se compruebe que toda la instalación está debidamente conectada. De esta manera, se debe comprobar que:

1. El cableado del encoder y el sensor están conectados correctamente.
2. El valor actual de encoder (e00CurrPos) cambia en el panel de control cuando la cinta se está moviendo.
3. El valor del encoder ha de incrementar cuando la cinta se mueva hacia adelante. Si decrementa, se debe cruzar los pares A y B.

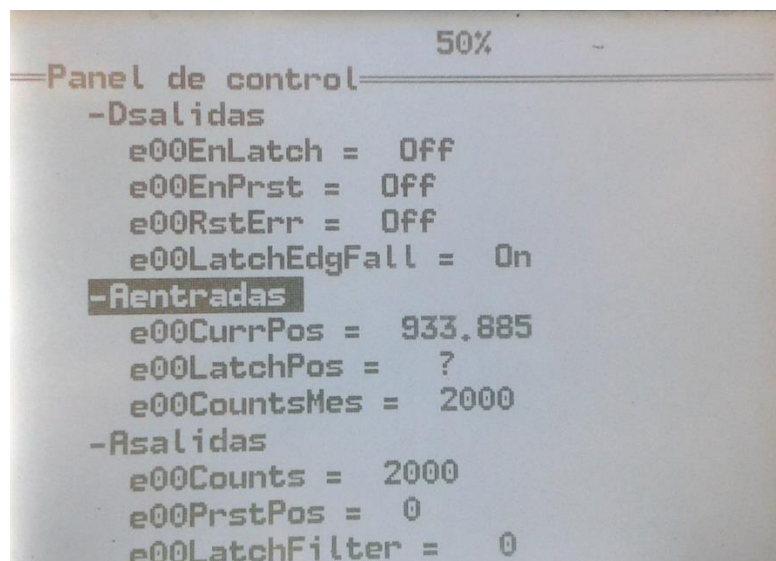
4. La señal e00LatchEdgFall está correctamente definida (esta señal permite configurar el disparo o *trigger* por flanco ascendente o descendente).
5. Simular un *trigger* y verificar que la posición del encoder es capturada.
6. Introducir el valor de pulsos de encoder en la señal e00Counts.

Al llegar al punto 5 de la verificación, se comprueba que la señal de *trigger* no se genera correctamente. Después de recomprobar que las conexiones estén realizadas correctamente, se detecta el problema dentro del conector J111 del controlador, el correspondiente a las salidas y entradas rápidas. Dichas salidas no funcionan como deberían y desde el servicio técnico del fabricante del robot Stäubli no se obtiene respuesta sobre cuál puede ser la causa. Como medida provisional, ante la espera de poder solucionar dicho problema, se decide configurar las salidas y entradas normales de manera que funcionen como generadoras de la señal de *trigger*.

Ante los cambios realizados, se comprueba nuevamente que todos los puntos se cumplan, obteniendo una verificación positiva.



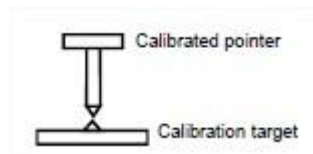
0.29 Verificación de no errores en hardware



0.30 Verificación de no errores en hardware

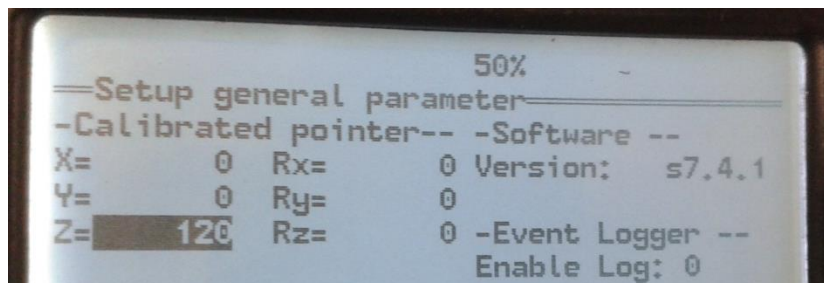
En la *figura 28*. se comprueba que no existen errores en las entradas digitales y en la *figura 29*. se puede comprobar como el valor de e00CurrPos obtiene la información del encoder y que el valor de e00CountMes coincide con el valor de e00Counts, que es el número de cuentas por vuelta que realiza el encoder.

Realizadas todas las comprobaciones, se puede iniciar el asistente y el primer paso a realizar es elegir una librería para la cinta transportadora. Como en un primer instante no existe ninguna cinta transportadora creada, se debe proceder a su creación y para ello, son necesarios los siguientes elementos: un puntero calibrador, montado en la brida del robot y cuyas dimensiones deben introducirse en el menú Ajustes (F7) del asistente de calibración; y un objetivo de calibración, al que se pueda apuntar con el puntero de calibración. Debe asegurarse que el objetivo de calibración utilizado para calibrar el sistema de visión puede ser apuntado por el robot equipado con su puntero calibrador y que el objetivo de calibración esté a la misma altura que el pick de las piezas.



0.31 Características de puntero de calibración

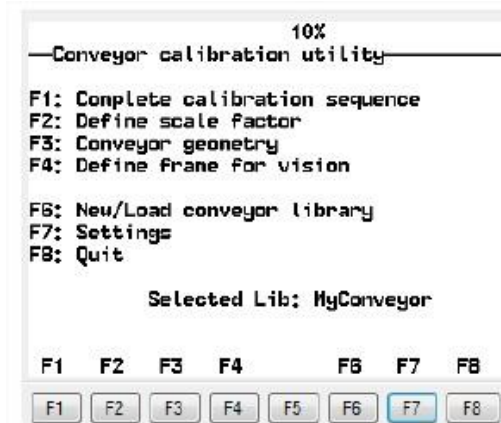
Debido a las características del efector final tipo vara diseñado, se decide utilizarlo como puntero de calibración, introduciendo sus dimensiones en el asistente (dejándole un margen de seguridad).



0.32 Dimensiones de puntero de calibración

Los siguientes pasos son elegir una librería para el encoder y para el sensor de detección. En estos casos, dentro de VALTrack vienen creadas unas librerías por defecto, las cuales son válidas para la aplicación a desarrollar, por lo que se elige la librería correspondiente a la tarjeta lectora del encoder (Starc2_00) y al sensor de detección (Cognex1) para la cual se había creado previamente el socket de comunicación.

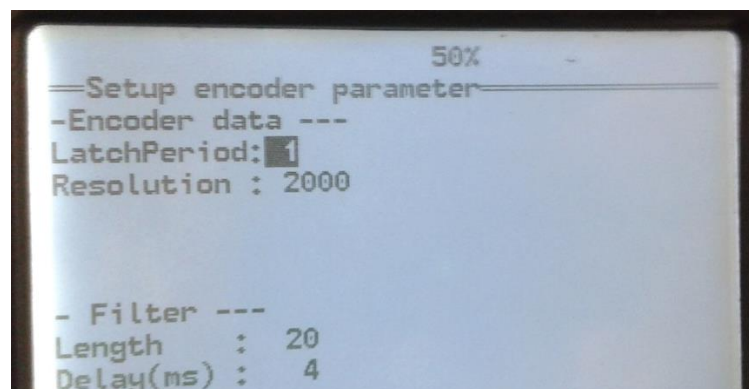
Elegidas las librerías que se van a utilizar, se llega a la pantalla principal del asistente, desde la cual se puede acceder a la configuración de todos los parámetros del sistema.



0.33 Página principal del asistente

El primer paso es entrar en el menú de ajustes y configurar las dimensiones del puntero calibrador y la distancia de aproximación, la cual se utilizará durante los diversos procedimientos para definir las propiedades de la cinta transportadora, ya que es posible mover el robot a los lugares que ya han sido enseñados. En lugar de moverse directamente a una ubicación enseñada, el robot se apartará de su posición actual y se aproximará al destino mediante una transformación correspondiente a la distancia establecida.

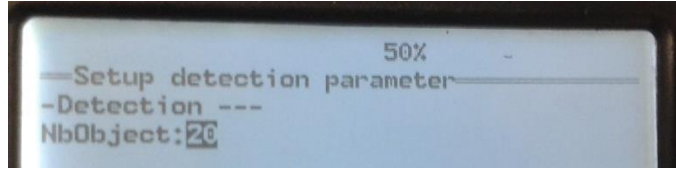
Dentro de ajustes generales, se puede acceder a los parámetros del encoder, de detección o de la cinta transportadora a través de las teclas F4, F5 y F6 respectivamente. En los parámetros del encoder se define *LatchPeriod* (número de trigger de detección de pieza que han de suceder para que se considere que se ha detectado una pieza) como 1; la resolución del encoder, en número de pulsos por vuelta; y los parámetros de filtrado de la señal del encoder, que corresponden a *Length* (con los n valores anteriores se calcula la rampa de posición para estimar la siguiente posición y tener una rampa de velocidad / posición más estable. Si se tiene un valor grande se tendrá un movimiento más homogéneo y un valor pequeño dará lugar a un movimiento más inestable o a golpes, pero una reacción más rápida a los cambios de velocidad) y a *Delay* o retardo de comunicación del valor de encoder entre las diferentes capas de software y hardware y que no es editable.



0.34 Parámetros del encoder

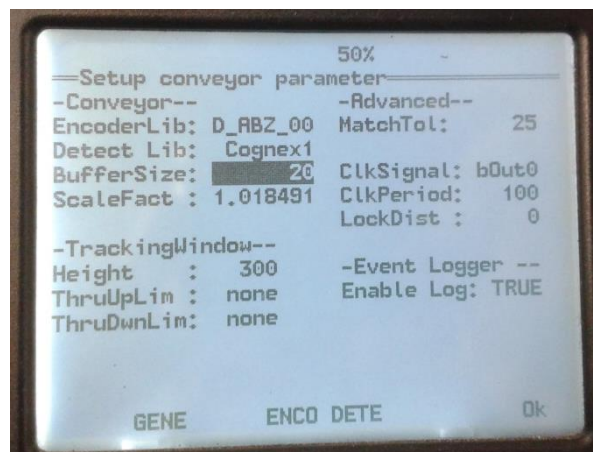
Mediante F5 se accederá a los parámetros de detección, donde se define el valor de *NbObject*, que corresponde con el número máximo de piezas que pueden ser introducidas en

la pila de detección por cada trigger o lo que es lo mismo, el número máximo de piezas que debe buscarse en una imagen. Este valor se establece en 20, aunque por las características del objeto a detectar (panes de hamburguesa) y las dimensiones del plano de detección nunca pueda alcanzarse dicho valor.



0.35 Parámetros de detección

Por último, a través de F6 se accede a los parámetros de la cinta transportadora. En este apartado se puede modificar la tarjeta lectora de encoder y el sensor de detección que se utiliza; se define el número máximo de piezas que puede haber entre el área de detección y el área de trabajo del robot y se observa el factor de escala, relación entre el desplazamiento de la cinta transportadora y los grados del encoder, que se define en posteriores apartados del asistente. Dentro de parámetros avanzados se definen *MatchTol*, o la tolerancia utilizada para evitar colocar varias veces el mismo objeto en la cola del transportador, de manera que dos objetos se consideran iguales cuando la distancia entre ellos es menor que *MatchTol*; *ClkSignal*, nombre de la salida en la que se genera una señal de disparo periódica de onda cuadrada, cuyo periodo corresponde a un desplazamiento en milímetros de la cinta transportadora, correspondiente al parámetro *ClkPeriod*. *LockDist* se utiliza en casos de que el sensor de detección sea un sensor on/off, para evitar rebotes en la señal de disparo de entrada y corresponde a la distancia mínima entre dos señales de entrada de disparo (por lo que sirve para descartar cualquier disparo que suceda antes de completar la distancia mínima después del primer disparo). Por último, en *Height* se define la altura del área de trabajo del robot, estableciéndose esta como un volumen entre los puntos definidos en el plano de la cinta transportadora (se realiza más adelante) y la correspondiente altura.



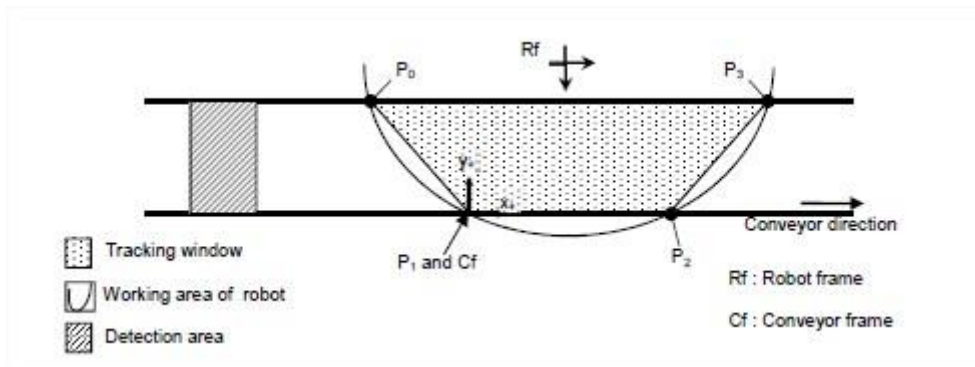
0.36 Parámetros de cinta transportadora

Definidos todos los parámetros de cada uno de los equipos empleados, debe definirse el entorno del robot, que es el propósito principal del asistente y para lo que se dispone de los

pasos necesarios dentro del mismo. Para todas las aplicaciones de seguimiento, el robot necesita saber: el factor de escala entre milímetros en la cinta transportadora y los grados del codificador (se enseña a partir de F2 dentro de la pantalla principal del asistente), dónde está la cinta transportadora y su geometría (F3), y la distancia entre el dispositivo de detección y la ventana de seguimiento del robot (F4, para visión). A continuación se detalla el procedimiento a seguir para cada una de estas definiciones.

Para el factor de escala, se utiliza un punto de calibración, el cual se define inicialmente aguas arriba del robot en la cinta transportadora. Se mueve el robot con el puntero calibrador hasta dicha posición y se registra su localización. A continuación, se enciende la cinta transportadora y se desplaza el punto hasta aguas abajo del robot, procurando que no se deslice durante el desplazamiento (por lo que si fuese necesario, deberá fijarse a la cinta transportadora de alguna manera). Se vuelve a mover el robot hasta la nueva localización del punto de calibración y se registra de nuevo su posición. Automáticamente, obtendremos el valor del factor de escala, pues se conoce cuanto ha avanzado la cinta (mediante la diferencia de posición registrada por el robot) y los grados que ha girado el encoder (por la diferencia en su posición).

En la definición de la geometría de la cinta, el procedimiento permite definir la posición y orientación de la cinta transportadora en el marco de referencia del robot, así como los límites del área en la que el robot es capaz de rastrear los objetos detectados (ventana de seguimiento). Esto se realiza mediante la definición por orden de los puntos P_0 , P_1 , P_2 y P_3 , siguiendo las pautas que se observan en la siguiente imagen:



0.37 Geometría de cinta transportadora

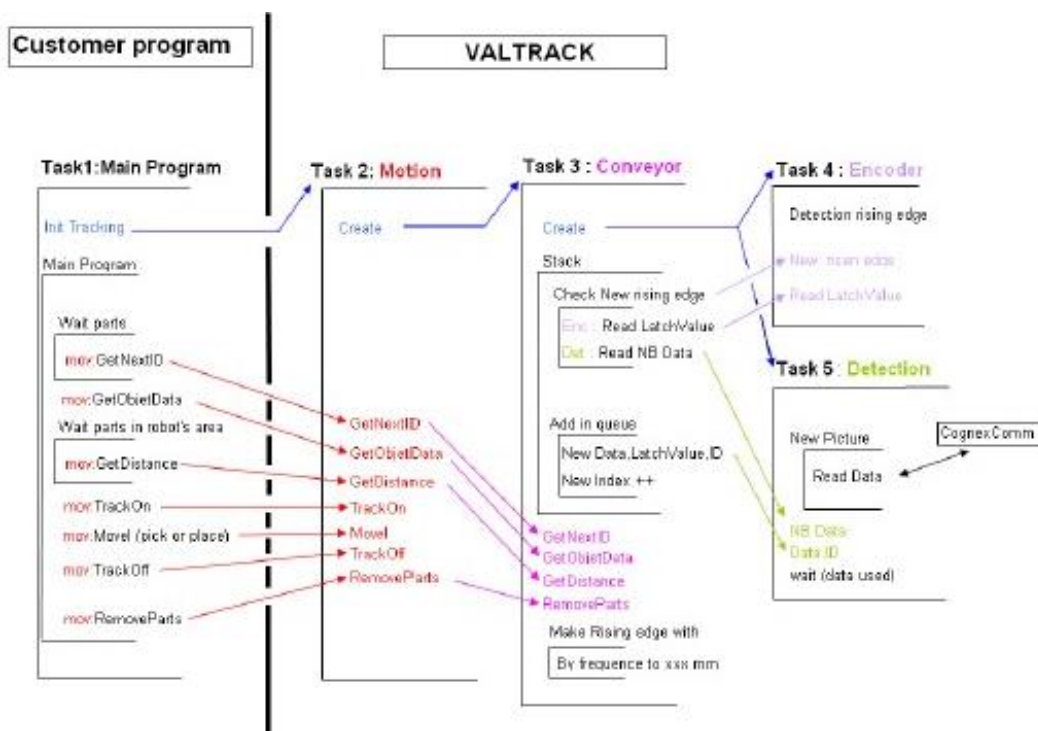
Finalmente, se define el plano de detección y su distancia hasta el robot. En este caso, se utiliza como punto de calibración el origen de la plantilla de calibración generada, pues hacer uso de ella hará más sencillo el proceso. Se coloca la plantilla debajo de la cámara utilizada y se genera un *trigger* para obtener una imagen, comprobando así mismo que el valor del encoder es igual al valor capturado en el *latch*. Si es así, se realiza la calibración del sistema de visión y se desplaza el punto de calibración (activando la cinta transportadora) hasta que se encuentre situado dentro de la zona de trabajo del robot. Una vez alcanzada, se para el movimiento de la cinta y se desplaza el puntero de calibración hasta el origen del plano de detección. Al registrar dicho punto y a través del factor de escala, se conocerá la distancia a la que se encuentra el sistema de detección del área de trabajo del robot. Además, se debe definir las direcciones X e

Y del plano de visión, moviendo en robot en la dirección correspondiente a ella, con lo que se consigue que el robot conozca sobre qué dirección debe desplazarse cuando le llegue la posición de un objeto.

4.2.4. Desarrollo de la aplicación robótica

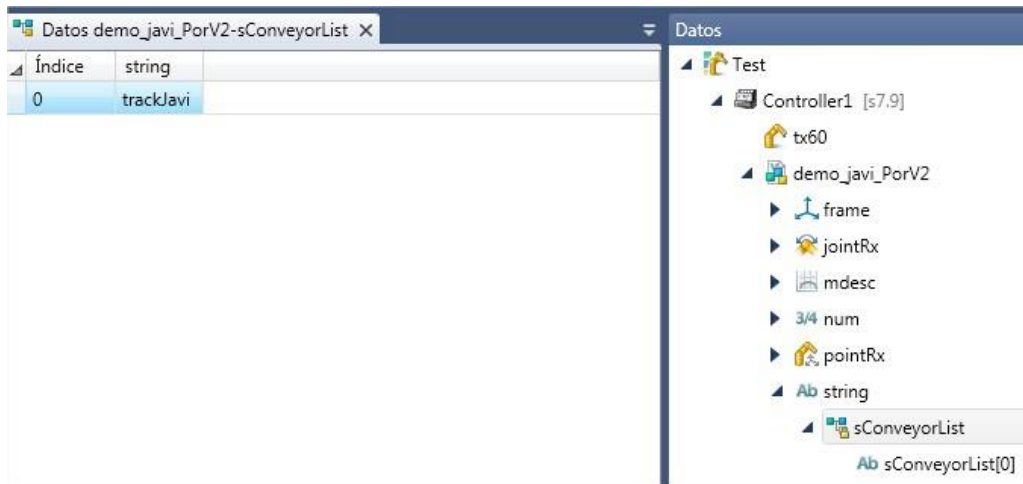
VALTrack no es una aplicación independiente, sino que es un grupo de programas destinados a ser integrados como bibliotecas de una aplicación principal y cuya finalidad es ayudar a construir la estructura (bibliotecas y datos) de la aplicación principal. Dentro de VALTrack, se proporcionan ejemplos para diferentes tipos de aplicaciones de Single Tracking (aplicación en la que el robot trabaja con una sola cinta transportadora), para robots de 4 y 6 ejes y para sensores on/off o sensores complejos como puede ser una cámara de visión artificial, por lo que se escoge el ejemplo para un robot de 6 ejes (como el Stäubli TX60 utilizado) y un sensor complejo (como la cámara Cognex 5100) y se desarrolla la aplicación a partir del mismo, realizando todas las modificaciones y añadidos necesarios para el propósito de la aplicación a implementar.

La estructura de conexiones que tienen las diferentes librerías sigue el esquema siguiente:



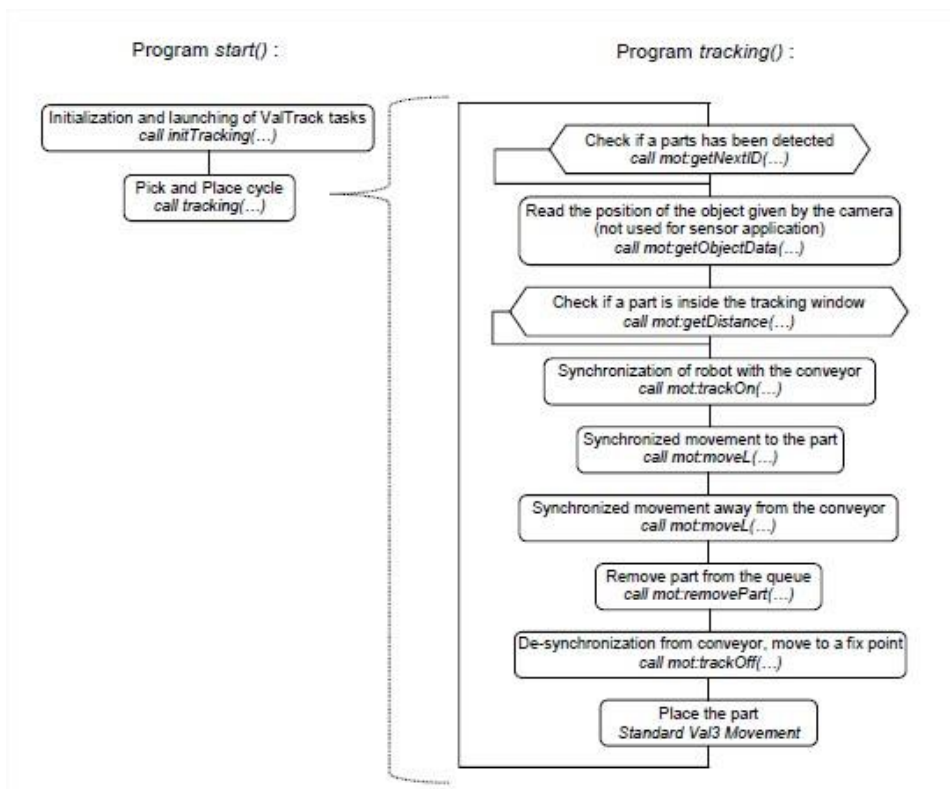
0.38 Esquema de conexiones de librerías

Donde las librerías de Conveyor, Encoder y Detection son las creadas durante la realización del asistente (Wizard) de inicialización. Para ello, es necesario establecerla como la librería a utilizar, eligiendo dentro de los datos del programa, en la variable *string*, la lista de conveyor que se ha creado.



0.39 Selección de librería conveyor

Con el ejemplo empleado, la interconexión entre librerías ya está establecida, pues el programa de *initTracking()* lanza todas las tareas de VALTrack, por lo que solamente debe modificarse el programa principal de *tracking()*, de manera que se realicen los movimientos deseados. Para una secuencia de pick and place, se tendrá un diagrama de flujo similar a:

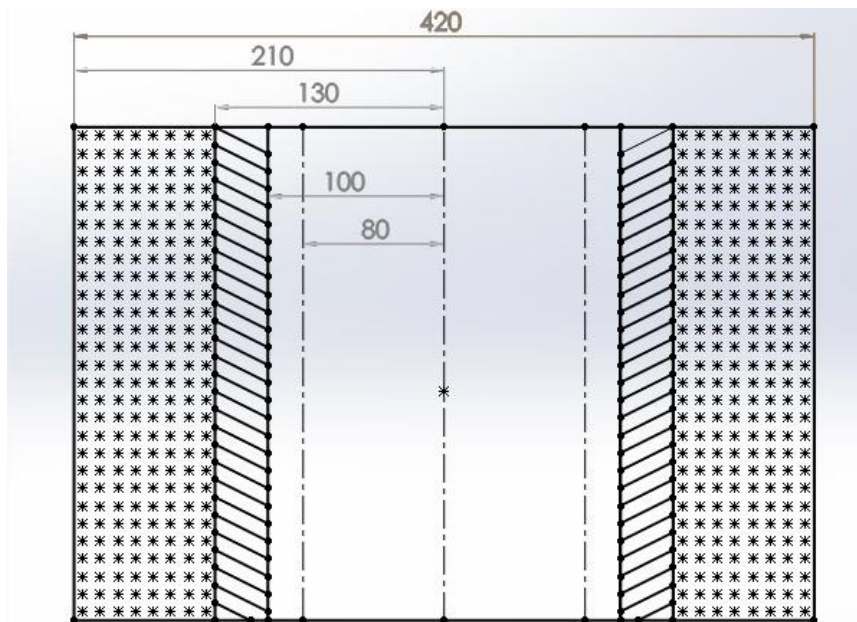


0.40 Diagrama de flujo de pick&place

El diagrama de flujo anterior se seguirá prácticamente en su totalidad en la aplicación desarrollada, aunque como no se realiza movimiento de *place* (ya que se realiza la recolocación dentro del movimiento sincronizado de tracking) el último ítem no se llevará a cabo.

Antes de comenzar con la programación de la aplicación, debe definirse claramente cómo se desea y qué tipos de movimientos se llevarán a cabo. Es por ello que en función de las zonas de la cinta transportadora en la que se encuentren los objetos detectados se les aplica uno u otro seguimiento y desplazamiento.

De manera que se divide el ancho de la cinta transportadora en las siguientes proporciones:



0.41 Diferenciación de zonas dentro del ancho de la cinta

Teniendo un ancho de 420mm, se diferencian tres zonas principales dentro de él.

La zona punteada, entre 130mm desde el centro de la cinta transportadora y el límite, corresponde a la zona donde se recolocarán los panes de hamburguesa (siempre teniendo en cuenta que el punto de detección se localiza en el centro de los mismos, por lo que ocuparán una mayor zona central en su totalidad). Si el punto de detección se encontrara dentro de esta zona, se descarta realizar movimiento alguno con el fin de reducir el tiempo de ciclo de trabajo, pero sí se contabilizará que un objeto ha pasado por ese lado.

Una segunda zona, marcada con rayas diagonales, corresponde entre los 100mm y los 130mm. A esta zona, al estar muy próxima a los extremos, se la denomina como zona desfavorable para realizar la recolocación, ya que si se tuviese que desplazar hasta el otro extremo de la cinta el tiempo empleado podría ser muy elevado. Es por ello que, independientemente del porcentaje que se desee a uno u otro lado, se desplazarán los objetos que se detecten en esta zona hacia su extremo más próximo. Dicho desplazamiento será ínfimo, tan solo girando la herramienta diseñada tipo pala unos pocos grados para aproximarlos más a los extremos.

Finalmente, la tercera parte corresponde a la zona central, entre +/- 100mm con respecto al centro de la cinta. En esta zona será donde se utilicen los panes de hamburguesa detectados para hacer la recolocación y adecuarse al porcentaje deseado a cada lado. Para realiza dicha

recolocación, se empleará tanto un giro mayor de la herramienta empleada (de 40°) como un desplazamiento en horizontal para acercarlo a uno u otro extremo. Este desplazamiento se hará desde la posición en la que se encuentre el objeto a desplazar hasta la 'línea' de los 80mm con respecto al centro (si se diese el caso que el objeto está en una posición más extrema, no se realiza desplazamiento y solamente se utiliza el giro de la pala para recolocarlo).

A continuación, se llevará a cabo una breve explicación de algunas partes del código implementado para realizar la aplicación. No consiste en una explicación línea por línea, pues existen zonas de código simple y repetitivo que no interesa explicar, sino en una aclaración de las partes del código que podrían considerarse más importantes y a partir de las cuales es sencillo comprender el código completo adjunto al presente proyecto.

En primer lugar, se explicará cómo se realiza la petición y obtención del porcentaje a utilizar:

```

7 // ELECCION DE PORCENTAJE POR EL USUARIO
8 cls()
9 do
10     gotoxy(0,5)
11     put("Introduzca % de objetos en parte izq/superior + ENTER: ")
12     gotoxy(0,7)
13     put("Para modificarlo posteriormente,pulse(1) ")
14     l_nKey=get(l_nPorcentaje)
15 until (l_nKey==270)

```

0.42 Código: elección de porcentaje

Los puntos a aclarar son el comando *gotoxy*, el cual envía el cursor a la (fila, columna) indicada dentro de la pantalla del MCP; donde se escribe por pantalla mediante el comando *put* el texto indicado en él. El comando esencial en esta parte del código es el *get*, ya que guarda en la variable local *l_nPorcentaje* el valor introducido por pantalla por el usuario y devuelve en la variable *l_nKey* el valor asignado por tabla a la última tecla pulsada. En este caso, se obliga a repetirse el bucle hasta que se pulse la tecla de Return, cuyo valor asignado es de 270.

El siguiente de los puntos que se expondrá es cómo se realiza la modificación voluntaria del porcentaje que se utiliza, y en dicho caso, la elección de la prioridad con la que se desea realizar el cambio. Este cambio debe poder realizarse en cualquier momento de la aplicación, por lo que es necesario comprobar que en todos los puntos de espera y en todos los bucles se podrá acceder a la modificación. Es por ello que el siguiente trozo de código aparece en varios puntos, de manera que se pueda acceder a él siempre que se desee.

Se hace uso nuevamente de los valores asignados por tabla para cada una de las teclas del MCP, pues existen teclas que independientemente de la pantalla en la que nos encontremos tienen el mismo valor. En este caso, se decide elegir al botón (1) como el necesario para la petición de modificación del porcentaje. El comando *isKeyPressed* comprueba si este botón ha sido pulsado en algún momento, devolviendo un valor booleano afirmativo en el caso de que así sea.

```

88 // CAMBIO DE % A CLASIFICAR EN CASO DE QUE SE DESEE
89 if(isKeyPressed(281))
90     cls()
91     do
92         gotoxy(0,5)
93         put("Introduzca % de objetos en parte izq/superior + ENTER: ")
94         gotoxy(0,7)
95         put("Para modificarlo nuevamente,pulse(1) ")
96         l_nKey=get(l_nPorcenFinal)
97     until (l_nKey==270)
98     // Eleccion de prioridad de cambio
99     cls()
100    do
101        gotoxy(0,5)
102        put("Introduzca prioridad de cambio + ENTER: ")
103        gotoxy(0,6)
104        put("1:Urgente-2:Progresiva) ")
105        l_nKey=get(l_nPrioridad)
106    until (l_nKey==270)

```

0.43 Código: cambio de porcentaje y elección de prioridad

En el caso que se entrase dentro del bucle mediante la pulsación del botón (1), se hace uso del código explicado anteriormente para volver a guardar el valor del porcentaje deseado pero en este caso en la variable `l_nPorcenFinal`, y se realiza otro bucle similar para la elección de la prioridad (se guardará en la variable `l_nPrioridad`). En el caso de que la prioridad elegida sea “Progresiva”, se incluirán dos mensajes más pidiendo el número de pasos a realizar y el tiempo de cada paso, correspondiendo a las variables `l_nNumPaso` y `l_nTiempoPaso` respectivamente. Esta parte del código no se incluye en esta explicación porque no implica ningún tipo nuevo de comando, con la excepción de la definición de la variable `l_nStart` que corresponderá al tiempo de reloj en el momento que se finalice la elección del tiempo de paso y se asigna con el comando `clock()`.

Una vez decididos todas las variables (porcentaje final y prioridad, y en caso de ser prioridad progresiva el número y tiempo de paso), se llega a la siguiente parte del código:

```

132 // cambio de porcentaje segun prioridad
133 if(l_nPorcentaje!=l_nPorcenFinal)
134     if (l_nPrioridad==1)
135         l_nPorcentaje=l_nPorcenFinal
136     elseif (l_nPrioridad==2 and ((clock()-l_nStart)>=l_nTiempoPaso))
137         l_nStart=clock()
138         l_nPorcentaje= l_nPorcentaje+(l_nDifPorcen/l_nNumPaso)
139     endif
140 endif

```

0.44 Código: modificación porcentaje

En primer lugar se comprueba que el valor de porcentaje actual sea diferente al valor seleccionado como porcentaje final. Esta comprobación se realiza para verificar que no se ha llegado al porcentaje marcado y si no se estableciera los cambios progresivos estarían realizándose continuamente cada tiempo de paso. Hecha esta comprobación, se analiza el valor de la variable `l_nPrioridad` y en caso de que sea 1 (prioridad urgente) se cambia directamente al porcentaje final mientras que si es 2 (prioridad progresiva) se incluye otra

condición. Esta condición es que el tiempo que de reloj transcurrido desde que se realizó la petición de modificación de porcentaje sea igual o superior al tiempo de paso establecido. Si se cumple, se reiniciaría el reloj en la variable `l_nStart` y se modifica el porcentaje, añadiéndole al porcentaje actual la diferencia entre porcentajes dividida por el número de pasos elegido.

Realizada toda la elección y modificación de porcentaje, solo queda comprobar en qué zona de las anteriormente mencionadas se encuentra el objeto que se detecta, para dependiendo de ello realizar uno u otro movimiento. Dichos movimientos son muy parecidos en el fondo, por lo que en esta parte del proyecto se expone solamente los pasos seguidos para uno de ellos.

```

323     put("MOV DERECHA-POR BAJO")
324     l_pAppro=appro(pPick,{70,30,-10,0,0,-40})
325     call mot:trackOn(0,l_pAppro,tGripper,mTrackOnOff,l_nMoveID,l_nError)
326     // calculo de desplazamiento vertical
327     l_pVertical=appro(pPick,{70,30,-5,0,0,-40})
328     call mot:moveL(l_pVertical,tGripper,mTracking,l_nMoveID,l_nError)
329     waitEndMove()
330     // PARO DE TRACKING PARA QUE PALA Y OBJETO CHOQUEN
331     delay(0.1)
332     if (pPick.trsf.y<80)
333         // calculo de desplazamiento lateral
334         l_nDistancia= 80 - pPick.trsf.y
335         l_pLateral=appro(pPick,{20,40,-5,0,0,-40})
336         call mot:moveL(l_pLateral,tGripper,mTracking,l_nMoveID,l_nError)
337         delay(0.1)
338         l_pLateral=appro(l_pLateral,{0,(0-l_nDistancia),0,0,0,0})
339         l_pAppro=appro(l_pLateral,{10,70,-10,0,0,40})
340         call mot:moveL(l_pLateral,tGripper,mTracking,l_nMoveID,l_nError)
341         waitEndMove()
342         resetMotion()
343         delay(1)
344     else
345         resetMotion()
346         delay(1.4)
347     endif
348     // mov a derecha

```

0.45 Código: desplazamiento de panes

Dentro de la zona central de recolocación, se utilizan los contadores para comprobar el porcentaje existente a cada uno de los lados, desplazando el pan hacia el lado que se encuentre con un porcentaje inferior al que debería tener. El caso de la figura 4.45 será cuando un pan de hamburguesa venga por la zona central y el porcentaje de panes en la zona derecha de la cinta sea menor al establecido. En dicho caso, se calcula un punto de aproximación con respecto a `pPick`, que es el punto central del pan, detectado por el programa de visión artificial implementado. Dicha aproximación se realizará aguas abajo hacia un lateral del pan, y ligeramente desplazada (30 mm) de su centro, hacia el extremo de la cinta contrario al que se va a desplazar el pan. Así mismo, se coloca el efector final con un ángulo de $\pm 40^\circ$ dependiendo del extremo al que se desplace. Con este punto de aproximación se realiza la llamada a la función `trackOn` de la librería Motion (implementada dentro del software de VALTrack) con la que se comienza el tracking del objeto.

Luego, se realiza un pequeño desplazamiento vertical, con el fin de que el efecto final pueda tener un mejor contacto con la superficie de los panes y evitar que pueda dañarlos en los desplazamientos.

A continuación, se entra en un bucle condicional donde se comprueba el valor en y (ancho de la cinta transportadora) del pan detectado. Si este es inferior a la "línea" de los 80mm que se comentó anteriormente que será hasta donde se desplacen los objetos, se calcula la distancia existente entre esa "línea" y el punto central y se realiza una transformación de manera que el efector se mueva hacia el pan, entrando en contacto con él, para posteriormente realizar un desplazamiento en lo ancho de la cinta, correspondiente a la distancia anteriormente calculada (línea 338 y 340 de la figura 4.45). Así mismo, en la línea 339, se realiza la definición de la variable I_pAppro , que se utilizará posteriormente para realizar el *trackOff* del objeto. Esta variable se define como una aproximación a partir del punto final de desplazamiento, realizando un desplazamiento aguas abajo, hacia el centro de la cinta transportadora y colocando el efector final en cero grados nuevamente. Se decide definir este punto porque al desplazar ligeramente aguas abajo y hacia el centro se consigue ganar espacio con respecto al siguiente objeto en la cola, de manera que el siguiente movimiento no conllevará grandes desplazamientos, además de dejarle suficiente espacio al pan desplazado para que continúe su trayectoria. Pero antes de realizar el *trackOff* del objeto, es necesario hacer una parada de los movimientos con el comando *resetMotion()* y realizar una espera, de manera que el efector final utilizado quede en una posición fija y el pan de hamburguesa, con su propio avance en la cinta transportadora, se desplace hasta el punto final en el que se desea recolocar. Dependiendo del extremo de la cinta hacia el que se desplace el pan de hamburguesa, se incrementará un contador correspondiente, además de un contador global para el total de panes tratados. Con estos contadores se realizará el cálculo del porcentaje a cada extremo de la cinta para realizar la siguiente recolocación del pan que se aproxime por el centro de la cinta transportadora.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

El presente trabajo muestra una pequeña revisión del estado del arte de los sistemas empleados en la creación de la célula robotizada necesaria para desempeñar la aplicación propuesta, tales como la robótica, la visión artificial y los transductores. Muestra así mismo las posibilidades de uso de la robótica y la automatización en procesos de manipulación industrial, específicamente dentro del subsector de la bollería y panadería industrial pero extrapolable a otros sectores.

Para caso de productos hortofrutícolas, el bajo costo y reducido peso del producto hace imprescindible el uso de un bajo tiempo ciclo por lo que los robots de cadena cerrada se adaptan mejor a estas necesidades que los de cadena abierta (como el Stäubli TX60 utilizado en el proyecto). En este aspecto, esto podría ser una de las modificaciones futuras a realizar, pues con ello se podría conseguir reducir el tiempo de ciclo considerablemente lo que repercutirá en una mayor capacidad de producción y por tanto mayores beneficios empresariales.

Independientemente del robot empleado para realizar la aplicación, con ella se demuestra que el proceso de automatización y robotización tiene muchas opciones para ser utilizado tanto en el ámbito de la manipulación como en el sector de agroalimentación. No solo por el hecho de emplear un robot industrial que nos ofrece considerables mejoras en cuanto a protección y seguridad, sino la utilización de la visión artificial, que es un elemento imprescindible pues es la encargada de proporcionar la posición y forma de los productos y mandar las coordenadas al robot para el punto de ataque y orientación del sistema de agarre. En el plano de la investigación se trabaja con la visión para la identificación de la manera más adecuada de manipular los productos con la garra de un robot. Estos sistemas analizan las distintas posibilidades de agarre del producto generando una estrategia que busca la consecución exitosa de la manipulación de los productos.

Otro aspecto muy importante es el proceso de abaratamiento de los robots y sus controles junto con la simplificación de su uso, ya que los nuevos sistemas de programación de robots son más sencillos de realizar y tienen mayores posibilidades de integrarse y comunicarse con otros sistemas periféricos. Estos factores son muy necesarios para facilitar la implementación de la robótica en las empresas del sector agroalimentario que no disponen de un avanzado dominio de la tecnología robótica, por lo que los elevados costes de equipos y software suponen una clara limitación a la robotización del sector, limitación que se ha ido y continuará

reduciéndose de manera que las mejoras en la producción que se introducen con la inclusión de la automatización en el proceso pasan a tener un peso aún mayor en la decisión.

El incremento de productos envasados en el mercado, el aumento del rigor de la normativa higiénica, la necesidad de reducir riesgos laborales evitando la realización de trabajos peligrosos y repetitivos, la necesidad de reducir costes y obtener mayor productividad y la necesidad de controlar la calidad del producto, invitan a desarrollar tecnologías que permitan el uso de robots y de sensores de última generación para la realización de estas tareas, ya que con ellos existe la posibilidad de obtener mucha más información del proceso productivo y permiten optimizarlo.

De esta manera, como posibles trabajos futuros se establecen:

- **Mejora en el diseño de las herramientas empleadas:** Durante el transcurso del proyecto se detectó una posible mejora en el efector final tipo pala empleado. Al realizar los giros para el desplazamiento de los panes de hamburguesa es aconsejable realizarlos a partir del extremo superior, de manera que se evita con ello desplazar posibles panes adyacentes. Por ello, dentro de la aplicación se define el efector final desplazado hacia dicho extremo, pero para futuros trabajos sería conveniente remodelar el elemento, estableciendo la brida de unión en uno de los extremos, para evitar desplazamientos innecesarios en el resto de ejes del robot.
- **Optimización de tiempo de ciclo:** Como se menciona anteriormente, la utilización de un robot de cadena cerrada podría suponer una clara reducción de los tiempos de ciclo. No obstante, teniendo en consideración esta limitación técnica del robot empleado, podría obtenerse una reducción del tiempo de ciclo en función del tamaño de producción que se disponga en fábrica. Con un flujo de producción pequeño, y dependiendo de la distribución del producto a lo ancho de la cinta transportadora, podría reducirse el tiempo de ciclo si en lugar de esperar al propio avance de la cinta transportadora se realizan más desplazamientos hacia ambos extremos (aunque parezca contradictorio, al realizar desplazamientos se reduce el tiempo de espera necesario para que los panes de hamburguesa se desplacen hasta la zona deseada).

Sin embargo, en el proyecto se ha buscado adaptarse a un flujo de producto similar al que se tiene en Dulcesol en la cadena de producción de los panes de hamburguesa, readaptándose a las dimensiones de la cinta transportadora disponible, y al proceder a realizar los desplazamientos se obtenía un número de choques con otros objetos adyacentes muy elevado.

Bibliografía

Asociación Española de Robótica y Automatización tecnologías de las producción. URL: <http://www.aeratp.com/aer-atp/>

AER-ATP. *Estudio sobre estadísticas de robótica 2016*.

Barrientos, A.; Balaguer, Carlos, et al. *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill, 2ª ed. Aravaca (Madrid), 2007

Blanes Campos, C. (2009). TÉCNICAS DE MANIPULACIÓN HORTOFRUTÍCOLA ROBOTIZADA EN PROCESOS PICK & PLACE.

Blanes Campos, C. (2016). Garras con sensores táctiles intrínsecos para manipular alimentos con robots [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València

Centro de Formación del Profesorado e Innovación Educativa de Valladolid. *Control y robótica*. URL: http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/ [Consultado:Noviembre 2016]

Cognex. URL: <http://www.cognex.com/?langtype=1034>

Cognex. *In-Sight® Spreadsheets Standard Class Manual*.

Cognex. *In-Sight® 5000 Series Vision System Reference Guide*. 2015

Dulcesa. Reporte interno AI2. 2015

Dulcesol. URL: <http://www.dulcesol.com/>

Fu, K.S.; González, R.C.; Lee, C.S.G. *Robótica. Control, detección, visión e inteligencia*; McGraw-Hill, 1986.

Gobierno de España, Ministerio de Educación. *Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales*. Febrero, 2012.

Infaimon. *Enciclopedia*. URL: <http://www.infaimon.com/es/blogs/enciclopedia> [Consultado: Septiembre 2016]

International Federation of Robotics (IFR). URL: <http://www.ifr.org/>

IFR. *Executive Summary World Robotics 2016 Industrial Robots*.

LearnChannel. URL: <http://learnchannel.de/es/robotica/> [Consultado: Noviembre 2016]

Lumimax. URL: <http://www.iimag.eu/es/lumimax.html> [Consultado: Septiembre 2016]

Melián Luis, J.E.; Yanes Marcelino, J. (2016). Prototipo de manipulador antropomórfico para tareas colaborativas.

Mellado Arteche, M. *Robótica*, Servicio de Publicaciones UPV 2009.254, 2009.

Ochoa Soler, A. (2014). Diseño e implementación de una pinza modular destinada a la manipulación multipick de alimentos; desarrollo y programación de la aplicación.

Posital. URL: <https://www.posital.com/es/productos/interfaz-de-comunicacion/incremental/incremental-encoder.php> [Consultado: Septiembre 2016]

Sapiensman, Oficios técnicos. URL: http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/velocidad_de_motores_electricos5.php [Consultado: Septiembre 2016]

Solidworks. URL: <http://www.solidworks.es/>

Stäubli. URL: <http://www.staubli.es/>

Stäubli. *Reference Guide VALTrack Software*. Version s7.4.1. 2015

Stäubli. *Manual de referencia VAL3*. Versión 7. 2010

3lentes. URL: <https://3lentes.com/sensores-ccd-cmos/> [Consultado: Agosto 2016]