

UNIVERSIDAD DE ALMERIA  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
MÁSTER EN INFORMÁTICA AVANZADA E  
INDUSTRIAL

“Robotización del proceso de injerto de  
plántulas hortícolas”

Curso 2016/2017

**Alumno/a:**  
Javier Rodríguez Sánchez

**Director/es:**  
José Carlos Moreno Úbeda  
Francisco de Asís Rodríguez Díaz



TRABAJO FIN DE MÁSTER

# Robotización del proceso de injerto de plántulas hortícolas

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

MÁSTER EN INFORMÁTICA AVANZADA E INDUSTRIAL

CURSO 2016/17



Autor:

Javier Rodríguez Sánchez

---

Directores:

Dr. D. José Carlos Moreno Úbeda

Dr. D. Francisco de Asís Rodríguez Díaz



## Agradecimientos

En primer lugar me gustaría dar las gracias al Centro Tecnológico Tecnova por hacerme partícipe de este proyecto y darme la oportunidad de ver desde dentro la parte de la I+D más cercana a la empresa.

Un agradecimiento especial para mi excompañero José Luis, que marcó el camino a seguir e hizo posible que haya podido desarrollar este proyecto y llegar a hacerlo realidad. También agradecer a mis compañeros Eduardo, María del Mar y Javier por darme su apoyo durante las largas jornadas laborales y por ofrecerme sus conocimientos agronómicos para llevar este proyecto a buen puerto. Del mismo modo, agradecer también a Pepe, Juan Pedro y al equipo de trabajo de INGRO Maquinaria, por su trabajo y esfuerzo para cumplir con los requisitos y especificaciones durante la construcción de los equipos.

También me gustaría dar las gracias a mis directores de TFM, José Carlos Moreno y Paco Rodríguez, que siempre han estado ahí para prestarme su ayuda y guiarme cuando los he necesitado.

A mis padres, hermanos y familia que siempre han confiado y siguen confiando en mí y me han dado la fuerza necesaria para seguir adelante y hacerme fuerte en los momentos más complicados. Sin ellos no podría haber llegado hasta aquí, ni sería como soy ahora.

Y por último y no menos importante, me gustaría dar las gracias a Nicole. Ver su sonrisa al comenzar y terminar el día hace que el esfuerzo realizado durante los largos días de trabajo no produzca fatiga y me anima a continuar trabajando duro para conseguir mis metas.



# Índice de contenidos

<b>Agradecimientos</b>	<b>I</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Métodos de injerto.....	3
1.2. Objetivos y estructura de la memoria.....	6
<b>2. Estado del arte</b>	<b>6</b>
2.1. Automatización del proceso de injerto.....	7
<b>3. Materiales y métodos</b>	<b>16</b>
3.1. Celda de trabajo para automatización del injerto de plántulas .....	16
3.2. Materiales básicos para el injerto de plántulas .....	19
<b>4. Resultados</b>	<b>21</b>
4.1. Sistema para detección y manipulación de plántulas. ....	23
4.2. Sistema de corte de plántulas .....	26
4.3. Sistema de dispensación de clips de injerto .....	28
4.4. Sistema automático de alimentación de bandejas de plántulas .....	30
4.5. Integración del sistema robotizado de injerto de plántulas .....	31
<b>5. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>32</b>
<b>6. Bibliografía</b>	<b>33</b>



# Robotización del proceso de injerto de plántulas hortícolas

Javier Rodríguez Sánchez

**Resumen** - En los últimos años el injerto de plántulas se ha convertido en un proceso fundamental y ampliamente utilizado en los semilleros y productores de planta hortícola como método de propagación. Tradicionalmente, las labores que implica este proceso han venido siendo realizadas de forma manual por operarios altamente entrenados, bajo condiciones extremas de humedad y temperatura, y de una forma muy intensiva durante cortos periodos de tiempo al año. Durante las últimas décadas han habido algunos esfuerzos para automatizar el proceso de injerto de plántulas hortícolas, principalmente solanáceas y cucurbitáceas, a través de sistemas mecatrónicos más o menos complejos, pero los desarrollos alcanzados no han llegado a copar el mercado debido a que no han conseguido alcanzar las exigencias de los productores. Un nuevo enfoque, haciendo uso de robots industriales para la realización de dichas tareas, permitirá la automatización del proceso de injerto de una forma más precisa, versátil y controlada, a través de técnicas y métodos ampliamente empleados en otros sectores más maduros y que han demostrado sus ventajas. Esto favorecerá la tecnificación del sector agrícola y ayudará a su profesionalización.

**Palabras clave:** Robotización, Proceso, Injerto de plántulas, Automatización, Robot industrial

**Abstract** - Currently, grafting of seedlings is a fundamental process for the plant production sector. This process is widely used among nurseries and producers as a method for plant propagation. Traditionally, operations implied in this process have been carried out manually by highly trained skilled workers. These laborers work under extreme environmental conditions that involve high humidity and temperature. Usually this process requires very intensive labor in a very short time period. During the last few decades, some efforts have been made in order to automatize the grafting process through the development of several complex machines. However, just a few of these machines managed to reach the market because they couldn't fulfill the requirements of the plants' producers. A new approach will make the grafting process automation possible in a more precise, versatile, and controlled manner with the use of industrial robots. This approach takes advantage of techniques and technologies widely used in other more mature sectors where they have demonstrated their capabilities. This will improve jobs in nurseries using the latest techniques and methods and will lead to the professionalization of the agricultural sector.

**Key words:** Robotization, Process, Grafting of seedlings, Automation, Industrial robot

## 1. Introducción

El injerto de plantas es un método de propagación asexual consistente en la unión de dos partes vivas de plántulas diferentes, de tal modo que el conjunto resultante pueda crecer y desarrollarse como un sólo organismo [4]. La planta que aporta la porción radicular se denomina

“portainjertos” o “patrón” y la que aporta la parte aérea se denomina “vástago” o “variedad” [8]. En esta unión el portainjertos, mientras que el vástago aporta las características varietales de los frutos de la planta resultante. El proceso de injerto fomenta que los tejidos del portainjertos, que ofrece ciertas características de vigor y resistencia a enfermedades, se fusionen con

los de la variedad, con el objetivo de que esta última se desarrolle, florezca y dé frutos utilizando los nutrientes absorbidos por la primera.

El injerto de plantas se ha venido utilizando desde hace miles de años como medio para conseguir mejoras productivas o de calidad en los cultivos. Los primeros datos de injerto de hortalizas se tienen de un cultivo de sandía en Japón [30] y ha seguido utilizándose hasta la actualidad. El incremento continuo de la población y la cada vez menor superficie de cultivo disponible, fomentaron el desarrollo de la producción intensiva de alimentos. Con el desarrollo de los films plásticos en la década de los 50, se hizo posible la protección de los cultivos y se generalizó la producción agrícola. Esto hizo necesario la búsqueda de nuevas metodologías capaces de solventar los inconvenientes de estos nuevos enfoques y se dio lugar a la universalización del uso de planta injertada.

El injerto comercial de hortalizas se originó en Japón y Corea y de forma lenta pero progresiva se introdujo en los países occidentales a principios de los años 90. En estos años, en Japón cerca del 60% de los cultivares de sandía, pepino, tomate y berenjena ya hacían uso de plantas injertadas [23], mientras que en Corea esta cifra ascendía a 81% [13]. Sin embargo, fuera de Asia, la elevada mano de obra especializada necesaria para realizar el proceso y los altos costes que conllevaba hicieron que la adopción de estas técnicas se produjera muy lentamente. Con la mejora de la eficiencia del proceso y la introducción de nuevos portainjertos compatibles con las mejores variedades locales, las técnicas de injerto se introdujeron en los países europeos [25] (citado en [18]). Durante las siguientes décadas muchos países de Europa, Oriente Medio, el Norte de África, América central y Asia adoptaron y desarrollaron esta tecnología, haciendo posible que el uso de

plantas injertadas en las áreas de producción aumentara rápidamente [31] (citado en [18]). Este crecimiento continuo se ha mantenido y en la actualidad estas técnicas se utilizan de forma genérica en la mayoría de países del mundo [32]. Las compañías productoras de semillas se han especializado en la selección y reproducción de portainjertos resistentes y variedades adaptadas a las condiciones locales de cultivo, de manera que con el uso de la combinación adecuada se puede obtener una producción de calidad minimizando los problemas asociados con los cultivos intensivos [18].

Debido a las limitaciones de áreas de cultivo, el uso intensivo de la tierra, con ciclos de cultivo sucesivos, sigue siendo inevitable para asegurar una fuente de alimentos suficiente para la población [23] (citado en [18]). La concienciación de la sociedad y los nuevos hábitos de consumo hacen que la búsqueda de una alimentación más saludable y una producción hortícola más segura y con un menor efecto sobre el medioambiente sea una necesidad. Además, la prohibición del uso del bromuro de metilo y el incremento de las restricciones en el uso de otros fumigantes han hecho que los productores deban buscar alternativas eficaces para lidiar con estos problemas. En este nuevo paradigma, el uso de herramientas y métodos de producción que sean capaces de solventar los problemas asociados al cultivo intensivo de una forma menos dañina para el medioambiente posibilitará una producción sostenible de frutas y verduras. En este sentido la reproducción de plantas mediante injerto reduce la dependencia de los agroquímicos y permite hacer realidad una producción orgánica.

El injerto se utiliza extensamente en muchas áreas del mundo para cultivos de solanáceas (tomate, pimiento y berenjena) y cucurbitáceas (melón, sandía y pepino) y muchos semilleros se han especializado en

ofrecer servicios profesionales de injerto para los agricultores.

Con el injerto de plantas se persiguen fundamentalmente los siguientes objetivos [26]:

1- Conseguir resistencia a enfermedades de suelo y plagas. El sistema de enraizamiento de muchos cultivos es susceptible de ser atacado por diferentes enfermedades transmitidas por el suelo (*Fusarium*, *Verticillium*, *Ralstonia*) o plagas como los nematodos. Los productores de hortalizas suelen utilizar la fumigación de pesticidas como método de control de enfermedades de suelo y plagas. Sin embargo, con la prohibición del uso del bromuro de metilo y el incremento de las restricciones en el uso de otros pesticidas, se deben buscar alternativas eficaces para lidiar con estos problemas.

Si en otros cultivares o especies puede encontrarse resistencia a estas patologías, la manera más rápida y directa de introducir dicha resistencia en el cultivo sensible es utilizar la planta resistente como portainjertos. De esta forma, una variedad de alta productividad y calidad, pero sensible a enfermedades o plagas, puede injertarse sobre el portainjerto resistente, para aunar las ventajas de ambos cultivares en una sola planta.

Esto ha hecho que la demanda de planta injertada haya crecido en los últimos años y se haya posicionado como medio alternativo para el uso de dichos químicos, posibilitando una producción más orgánica libre de pesticidas.

2- Incrementar la producción y su calidad. Dado que el sistema radicular de los portainjertos son habitualmente más vigorosos y amplios que los de la variedad a cultivar, estos pueden absorber agua y nutrientes de una forma más eficiente comparado con las plantas sin injertar. Esto ayuda además a la reducción de la cantidad de fertilizantes químicos necesarios y se

incrementa el vigor del cultivo, haciendo que se obtengan mayores producciones, más tempranas y con una calidad superior.

3- Mejorar la fisiología de las plantas haciéndolas más adaptables a ambientes más duros. Con el injerto se obtienen los beneficios de ambas plántulas, permitiendo el crecimiento de variedades de alto valor comercial en terrenos o circunstancias desfavorables. Por lo general, las plantas injertadas son más grandes y más vigorosas que las no injertadas y poseen un diámetro central más grande. Además, el injerto de variedades sobre portainjertos capaces de resistir bajas temperaturas provoca una mejor y más eficiente absorción de nutrientes durante el invierno y pueden reducir el riesgo de paradas de crecimiento. Existe también portainjertos que mejoran la tolerancia del cultivo a estrés ambiental como temperaturas extremas o exceso de salinidad.

### 1.1. Métodos de injerto

De manera general, el proceso de injerto de plántulas comprende 4 etapas básicas: 1) elección de especies de portainjertos y variedad compatibles, 2) creación de la unión de ambas especies mediante manipulación física, 3) curación de la unión, y 4) aclimatación de la planta injertada. [16] y [18].

El proceso de creación de la unión y curación del injerto debe darse bajo unas condiciones ambientales determinadas que fomenten el desarrollo de los tejidos que formarán el callo de unión y se pueda establecer una conexión vascular entre portainjerto y variedad satisfactoria [4]. Estos requerimientos son [16]:

- La temperatura durante el proceso ha de ser lo suficientemente alta para favorecer la división de las células y su crecimiento.
- Ambas plántulas han de quedar en contacto y firmemente unidas para permitir

la proliferación de las células parenquimáticas que forman el callo.

- El nivel de humedad antes y después del injerto ha de ser apropiado para prevenir la disecación de las paredes y conseguir la turgencia de estas células parenquimáticas.

- La unión de ambas plantas ha de quedar aislada de posibles infecciones por patógenos.

- La aclimatación es crítica para la supervivencia de las plantas injertadas. Dicha aclimatación engloba la curación de las superficies cortadas y el endurecimiento de la unión para la supervivencia en campo.

El esquema temporal de un proceso de injerto típico puede observarse en la Figura 1.

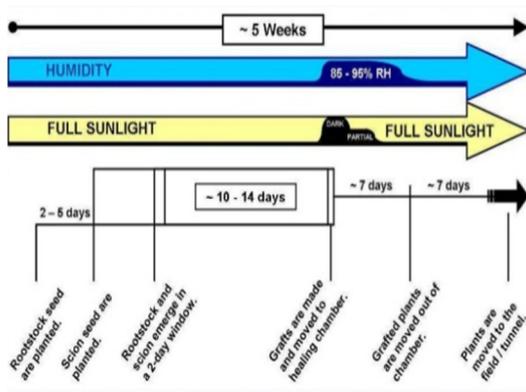


Figura 1. Esquema temporal completo de un proceso de injerto típico.

Teniendo en cuenta estas etapas básicas y especificaciones, han surgido gran variedad de métodos de injerto adaptados a las diferentes especies a injertar, la experiencia y preferencias del productor, las instalaciones y equipamiento disponibles para realizar el proceso o el volumen de injertos a realizar. Existen una gran variedad de métodos de injerto de plántulas, pero desde el punto de vista de la automatización y robotización del proceso, todos los métodos de injerto existentes en la actualidad podrían reagruparse en 3 categorías básicas:

- Injerto de inserción (Figura 2. A, B, F y G).
- Injerto de aproximación (Figura 2. C)
- Injerto de empalme (Figura 2. D, E, H, I y J).

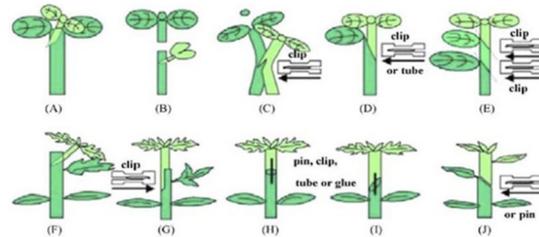


Figura 2. Principales métodos actuales de injerto en cucurbitáceas y solanáceas. (Adaptado de [18]).

### Injerto de inserción

En este método, una porción de hipocótilo del vástago con varias yemas se introduce entre los cotiledones del portainjerto [22]. Ambas plántulas deben ser uniformes y lo suficientemente fuertes para soportar la operación de injertado.

La porción de hipocótilo de la variedad se corta en bisel para conseguir un extremo afilado de forma cónica que favorezca la inserción (Figura 3.a). En el portainjerto se retira la primera hoja verdadera junto con el ápice de crecimiento (Figura 3.b) y se realiza un agujero o un corte hacia abajo de 1-1.5cm en el centro del tallo (Figura 3.c). A continuación, en este agujero se inserta el extremo de la variedad (Figura 3.d) y se asegura la unión.

Una variante de este método es el denominado injerto de hendidura lateral. En este caso sobre el tallo del patrón se practica un corte longitudinal de 1 a 1.5 cm de longitud (Figura 3.b) y en esta hendidura se inserta el extremo cónico de la variedad (Figura 3.c). A continuación, se coloca un clip de injerto para sujetar ambas plantas y asegurar la unión (Figura 3.d) y se decapita el patrón.

Este método se ha aplicado favorablemente sobre cucurbitáceas y solanáceas.

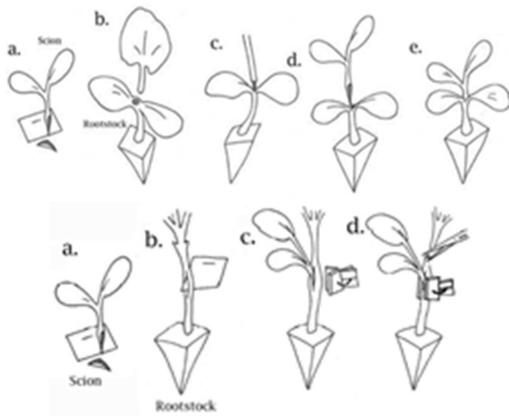


Figura 3. Diferentes variantes del método de injerto de inserción. Arriba: Método de inserción de púa; Abajo: Método de hendidura lateral.

### **Injerto de aproximación**

Es el método de injerto más empleado por productores con instalaciones deficitarias y su práctica se suele aplicar a cucurbitáceas. En este método de injerto se hacen coincidir una lengüeta del hipocótilo del portainjertos con otra similar del vástago, de manera que los cortes se superpongan. Durante el proceso de unión, las dos plantas conservan sus raíces, aunque una vez establecida la conexión se corta el tallo del vástago para aislarla del suelo [22]. Este tipo de injerto debe ser llevado a cabo cuando las plántulas de patrón y variedad desarrollan la primera hoja verdadera.

El proceso consiste en la realización de un corte semi-total del tallo del patrón en ángulo de entre 30° y 40° (Figura 4. a), 2 cm aproximadamente por debajo de los cotiledones, y un corte en ángulo opuesto sobre el tallo de la variedad (Figura 4. b). La superficie de corte debe tener entre 1 y 1.5 cm. Las partes cortadas de las plántulas se unen y se mantienen sujetas con un clip de injerto (Figura 4.c). Las plantas injertadas son colocadas en bandejas con alveolos más grandes y se mantienen en los túneles de injerto o en cámaras de prendimiento con regulación de luz y temperatura. Entre 7 y 10 días después del injerto se realiza la eliminación de las partes no válidas de las plántulas cortando

la parte aérea del patrón y el sistema radicular de la variedad (Figura 4. d y e).

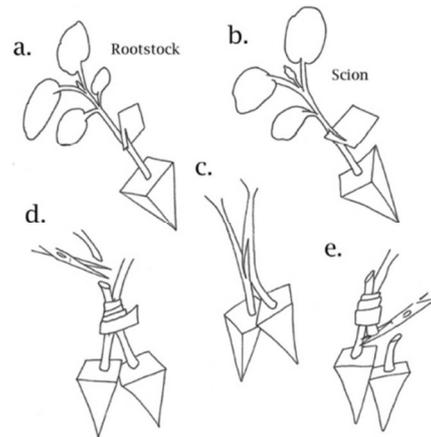


Figura 4. Método de injerto de aproximación.

Este método puede ser utilizado sobre cualquier especie. Sin embargo, no se utiliza comercialmente de forma regular debido a que precisa una mayor mano de obra para eliminar las partes inservibles y retirar el clip de injerto; a que se necesita mayor espacio para crecimiento de las plantas injertadas; y a que de manera frecuente la parte de variedad desarrolla raíces adventicias después del trasplante [13].

### **Injerto de empalme**

Es el método de más reciente implantación y entre otras ventajas destaca que es fácilmente mecanizable. [22]. El proceso de injerto debe llevarse a cabo cuando los tallo de patrón y variedad tienen diámetros similares.

De manera general el tallo del patrón se corta totalmente con un ángulo de entre 45° y 60° (Figura 5. a), desechando la parte aérea. Este corte puede realizarse tanto por arriba como por debajo de los cotiledones. De la misma forma, se corta el tallo de la variedad (Figura 5. b), desechando en esta ocasión la parte radicular. A continuación, las dos superficies cortadas se posicionan en contacto total (Figura 5. c) y se asegura la unión con un clip de injerto que las mantendrá firmemente sujetas (Figura 5. d). Durante la curación del injerto las plantas

se mantienen en túneles o cámaras de prendimiento donde la humedad, la luz y la temperatura pueden ser reguladas. Las características ambientales de curación ideales son una alta humedad (80%-90%) para evitar la deshidratación de los tejidos, una temperatura entre 20° - 30° y baja intensidad lumínica. La fusión completa del injerto se produce a los 6 u 8 días, después de los cuales la planta injertada puede pasar al área de aclimatación.

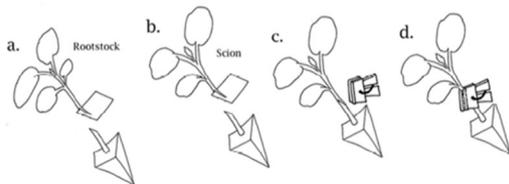


Figura 5. Método de injerto de empalme con pinza.

Existen diferentes variantes de este método de injerto. Algunos productores prefieren mantener el sistema radicular del patrón, mientras que otros lo eliminan por completo para que la planta injertada desarrolle nuevas raíces tras el injerto. Además, para cucurbitáceas, suele hacerse uso del denominado injerto de empalme con un cotiledón, donde se corta el patrón justo por la zona de los cotiledones, de manera que se elimina sólo uno de ellos y el ápice de crecimiento, dejando intacto el otro cotiledón para que el patrón pueda respirar. (Figura 6). Aunque estudios recientes han demostrado la viabilidad del método de empalme clásico para cucurbitáceas [5] y [20].

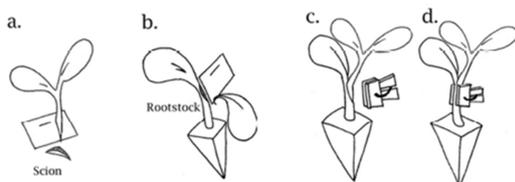


Figura 6. Método de empalme con un cotiledón para cucurbitáceas.

Del mismo modo, existen otros métodos menos utilizados para mantener ambas plantas unidas, como la aplicación manual de pegamento de cianocrilato o pines

cerámicos, dando lugar a una variante denominada injerto de pin (Figura 7).

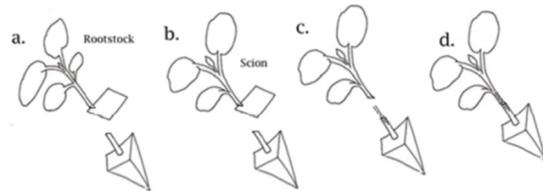


Figura 7. Método de empalme con pin.

Este método puede aplicarse a la mayoría de hortalizas y puede llevarse a cabo manualmente o mediante equipos mecánicos.

## 1.2. Objetivos y estructura de la memoria

Este proyecto tiene como objetivo principal establecer los fundamentos e ideas básicas asociados al uso de robots industriales convencionales para la automatización del proceso de injerto de plantas hortícolas, demostrando su viabilidad como alternativa real al proceso manual de injerto tradicional.

La memoria se estructura en varios bloques bien diferenciados. En primera instancia se realiza una búsqueda exhaustiva sobre el estado de la técnica para la automatización del proceso de injerto de plántulas, haciendo un recorrido por la evolución de las diferentes máquinas automáticas que han tomado forma hasta la fecha. A continuación se describen las principales características de las instalaciones de las que se han hecho uso para validar las ideas expuestas en esta memoria. Y por último, se muestran los trabajos y diseños realizados para la puesta en práctica de dichas ideas, con el fin de evaluar el cumplimiento de los objetivos planteados.

## 2. Estado del arte

Las áreas de cultivo que utilizan planta injertada ha crecido enormemente en las últimas décadas [4] debido a las ventajas que aporta esta técnica para los cultivos intensivos y la tendencia actual de restringir el uso de químicos en la producción de alimentos a nivel mundial. Para dar

cobertura a esta creciente demanda, el mercado de producción de plantas se ha especializado y han surgido un gran número de productores comerciales de planta injertada. Sin embargo, las operaciones de injerto siguen realizándose mayoritariamente de forma manual y no es fácil alcanzar los volúmenes de producción suficientes para satisfacer la demanda.

El injerto manual de plántulas presenta tres problemas principales: 1) Se requiere de trabajadores altamente entrenados, lo que incrementa el coste de las plantas injertadas; 2) Se precisan grandes volúmenes de mano de obra en pequeños periodos de tiempo, lo que imposibilita entrenar de forma adecuada a los trabajadores; 3) Frecuentemente el injerto falla debido a una baja calidad de la unión como resultado del proceso manual. Estos problemas hacen difícil cumplir con los requerimientos de producción y han favorecido la búsqueda de soluciones basadas en máquinas automáticas de injerto, cuyos desarrollos intentan rellenar un mercado potencial creciente para reemplazar la mano de obra en procesos repetitivos.

El manejo eficiente de la mano de obra es la clave del éxito en la producción en masa de plántulas injertadas y por ello algunas compañías de fabricación de maquinaria agrícola han desarrollado máquinas semiautomáticas o totalmente automáticas para el injerto de plántulas [12]. Un sistema totalmente automático para realizar el injerto de plántulas podría disminuir la mano de obra implicada en el proceso, reduciendo los costes de producción, y aumentar la calidad del producto final, ofreciendo una mayor seguridad a los agricultores. Sin embargo, la elevada complejidad de los sistemas a desarrollar, la gran diversidad de especies y variedades, y la gran heterogeneidad de las partidas de plántula, bloquean un desarrollo mayor. En el mercado sólo existen algunos equipos

disponibles en el este de Asia, Europa y Estados Unidos. Sin embargo, diversos problemas como la necesidad de producir plántulas de patrón y variedad que cumplan exactamente con las especificaciones en tamaño y calidad requeridas por los equipos de injerto automatizado desarrollados hacen que estos se encuentren infrutilizados en sus prestaciones [9] (citado en [18]). Con la internacionalización de la tecnología de injertos de plántulas y la creciente demanda de países como Estados Unidos, donde la gestión de mano de obra es un problema muy importante en la agricultura, la mejora de los equipos de injerto y la automatización de la producción de plántulas es una necesidad inmediata.

### **2.1. Automatización del proceso de injerto**

En las últimas décadas, el avance de las tecnologías mecatrónicas y de control y las ventajas que estas aportan a la industria, ha despertado una necesidad mundial de desarrollar máquinas automáticas para reducir la mano de obra involucrada en el proceso de injerto de plántulas dentro de los semilleros. Japón ha sido una de los países más involucrados en el desarrollo de nuevas técnicas de injerto debido a su gran tradición en el uso de plántula injertada. Se han realizado numerosos estudios e investigaciones sobre desarrollo de sistemas mecatrónicos para injerto de plántulas [2], [7], [12], [15], [25]. Sin embargo, sólo algunas de ellas han llegado a mercado.

El primer sistema automatizado para injerto de plántulas del que se tiene constancia fue desarrollado en Japón en 1980 por el Instituto de Investigación Avanzada en Tecnología Bio-orientada “BRAIN”. Este equipo se especializaba en el injerto de cucurbitáceas haciendo uso del injerto de empalme con un cotiledón [20]. Posteriormente, y basándose en estos primeros prototipos, la compañía japonesa ISEKI desarrolló varios modelos de máquinas automáticas [4] que llegaron a

poner en el mercado. Sin embargo, su elevado coste hizo que los productores no los viesen económicamente viables. Desde entonces, diversos equipos más o menos automatizados han sido desarrollados por diferentes compañías de maquinaria agrícola, pero sólo unos pocos han sido puestos en mercado y se encuentran disponibles en la actualidad comercialmente. A continuación se analizan los equipos comerciales más exitosos y los desarrollos más recientes. Estos provienen de ocho países diferentes incluyendo Holanda, España, Italia, Israel, Japón, Corea, China y Taiwán. De ellos, los países asiáticos se han especializado principalmente en cucurbitáceas, mientras que los europeos se han centrado en el injerto de solanáceas [19].

*Serie GR800*, desarrollado por el fabricante Iseki & Co. Ltd. en Japón, fue el primer modelo comercial de máquina de injertos y estaba disponible en 1993 [9]. Es un sistema semiautomático [18] del que se desarrollaron dos versiones, una para solanáceas (Figura 8) y otra para cucurbitáceas (Figura 9). Estos equipos son capaces de realizar 800 injertos/h, con una tasa de éxito del 95% y el apoyo de 2 o 3 operarios. En estos equipos cada operario se encarga de posicionar las plántulas a injertar en su posición adecuada. El sistema realiza el corte de cada plántula y su unión, depositando el resultado en una cinta de salida de donde otro operario debe ir recolectando las plantas injertadas para colocarlas en la bandeja de producto final.



Figura 8. Modelo GR800T de Iseki & Co. Ltd. para solanáceas



Figura 9. Modelo GR800B de Iseki & Co. Ltd. para cucurbitáceas

*GRF800-U*, también de Iseki & Co. Ltd., es la evolución de la serie GR800. Este equipo (Figura 10) es totalmente automático y permite el injerto de cucurbitáceas. Es capaz de realizar 800 injertos/h con más de un 95% de tasa de éxito y un solo operario para monitorizar el proceso. Es capaz de detectar pequeños defectos y deficiencias de crecimiento de las plántulas. Este equipo se compone de dos bahías de carga para introducir las bandejas de plántula a injertar. El equipo se encarga, de manera automática, de recolectar las plántulas, realizar el corte en cada una de ellas y realizar la unión de ambas. La planta injertada es depositada en una cinta de salida para que un operario pueda recogerlas y colocarlas en una bandeja de producto final.



Figura 10. Modelo automático GRF800-U de Iseki & Co. Ltd.

*TDARES-Tomato*, máquina de injertos para plántulas de tomate desarrollado en Taiwán [11]. Es un equipo semiautomático para el injerto de tomate sobre berenjena a través del método de injerto de empalme con tubo plástico para mantener la unión de las plántulas. Este método fue desarrollado por científicos de la Universidad Nacional I-Lan, la Universidad Nacional de Taiwán y TDARES. Este equipo es capaz de realizar de 200 a 250 injertos/h con un 92 a 97% de tasa de éxito y con un solo operario para asistir la máquina. El equipo se compone de tres soportes para bandejas de plántulas, uno para portainjertos, otro para variedad y otro para plantas injertadas (Figura 11). El operario se encarga de posicionar manualmente las plántulas a injertar en la posición correcta sobre dos brazos mecánicos. Una vez colocadas en su posición correcta el operario acciona los pedales de control y el sistema realiza el corte de las plántulas y la unión de las mismas en una zona común. Tras el proceso el operario debe recoger la planta injertada para colocarla en la bandeja de producto final.



Figura 11. Máquina de injerto para solanáceas de TDARES.

*GR-600* es un sistema semiautomático de injerto desarrollado en Corea por Helper Robotech Co. en 2004 [11]. Este fue el primer desarrollo con la posibilidad de realizar injertos sobre solanáceas y cucurbitáceas en un mismo equipo, y ha sido ampliamente comercializado en Asia y

América del Norte [25]. Este equipo puede realizar entre 650 y 900 injertos/h con una tasa de éxito del 95% y necesita la participación de 2 a 3 operarios para preparar las plántulas y colocarlas en la bandeja de salida. Este equipo (Figura 12) se compone de dos soportes para bandejas de plántulas. Cada operario se encarga de extraer las plántulas de la bandeja y posicionarlas de forma correcta en la zona de alimentación del sistema. El equipo se encarga de realizar el corte sobre el portainjertos y la variedad y colocar una pinza de injerto para unir ambas plántulas. La planta injertada se deja caer sobre una cinta de transporte donde un operario debe recogerlas para posicionarlas en una bandeja de producto final. Existe una evolución de este modelo, denominado *AFGR-800CS*, que alcanza los 800 injertos/h con 2 operarios.



Figura 12. Modelo semiautomático GR-600 de Helper Robotech Co.

Máquina semiautomática para el injerto de cucurbitáceas, desarrollada en China en el año 2011 por la Universidad Tecnológica de Guangdong y la Universidad de Hong Kong. Alcanza un rendimiento de 720 injertos/h con un 92% de tasa de éxito. Este equipo necesita de 2 a 3 operarios. Este equipo (Figura 13) se compone de dos zonas de trabajo para operarios con soporte para bandejas y equipo de corte y dos brazos electromecánicos para manipulado de plántulas. Cada operario se encarga de

seleccionar una plántula y realizar el corte de la misma. Una vez cortada cada operario posiciona su plántula en uno de los brazos. Estos brazos se encargan de acercar las partes de las plántulas hacia una zona común para colocarle una pinza de injerto y asegurar la unión de ambas. Una vez unidas se dejan caer sobre una cinta de salida de donde un operario debe recogerlas para colocarlas en la bandeja de producto final.



Figura 13. Máquina semiautomática para injerto de cucurbitáceas.

*Patchman-S*, desarrollado por Mekatekku Co. Ltd. en Japón, es un equipo semiautomático para injerto de tomate mediante el método de empalme con tubo plástico, aunque existe también una versión para cucurbitáceas. Este equipo (Figura 14) es capaz de realizar 900 injertos/h y requiere la participación de 1 operario.



Figura 14. Equipo semiautomático Patchman-S de Mekatekku Co. Ltd.

El operario se encarga de posicionar las plántulas en la posición adecuada y controla el funcionamiento del equipo mediante dos pedales. El equipo realiza el corte de las plántulas y une ambas mediante un tubo plástico de injerto. Una vez unidas las plántulas, la planta injertada se deja caer sobre una cinta de salida de donde el operario debe recogerlas para colocarlas en la bandeja de producto final.

*ISOgraft 1100*, desarrollado en Holanda por ISO Group, es un equipo semiautomático para injerto de solanáceas. Este equipo (Figura 15) ofrece un control limitado sobre el proceso de injerto, permitiendo un corte de patrón y variedad al mismo ángulo, lo que hace que puedan encajar perfectamente y se favorezca una unión exitosa. Además, presenta la capacidad de desinfectar los tallos, lo que reduce el riesgo de la propagación de bacterias. Alcanza una productividad de 1000 injertos/h y necesita al menos 2 operarios. Este equipo se compone de dos puestos de trabajo para operario con soporte para bandejas. Cada operario introduce las plántulas unitariamente, colocándolas en la posición adecuada en una especie de carrusel. El equipo se encarga de cortar cada plántula y colocar un clip de injerto para unirlos. La planta injertada vuelve a salir del equipo por uno de los carruseles de entrada, de donde uno de los operarios debe retirarla para colocarla en la bandeja de producto final.



Figura 15. Modelo ISOgraft 1100 de ISO Group para injerto de solanáceas.

*ISOGraft 1200*, desarrollado también por ISO Group, es la evolución del equipo ISOGraft 1100 con un grado mayor de automatización. Alcanza una producción de 1050 injertos/h y una tasa de éxito cercana al 99%. Precisa de 1 o 2 operarios para cargar las bandejas con plántulas en la máquina y monitorizar el proceso, aunque existe la posibilidad de utilizar un alimentador de bandejas automático. Al igual que el modelo ISOGraft 1100, este garantiza el mismo ángulo de corte en patrón y en variedad y posee la habilidad de desinfección de tallos. Este equipo (Figura 16) se compone de un solo puesto de trabajo para plántulas de variedad, una bahía de alimentación de bandejas de plántulas portainjertos predecapitadas y una bahía de salida de bandejas de planta injertada.

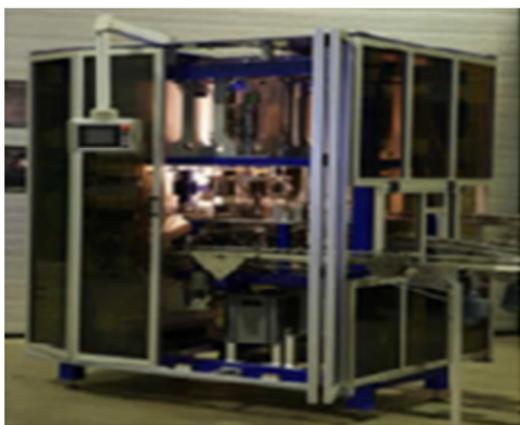


Figura 16. Modelo ISOGraft 1200 de ISO Group para injerto de solanáceas.

Un operario corta las plántulas de portainjertos por encima de los cotiledones, generalmente con un equipo externo sin sacarlas de la bandeja, y posiciona las bandejas en la bahía de entrada del equipo. El operario del puesto de trabajo introduce las plántulas de variedad de manera individual en la posición correcta sobre un carrusel y el equipo se encarga de cortarlas. El equipo realiza el injerto simultáneo de 5 plántulas. Para ello, 5 barras extraen por la parte inferior una fila de 5 plántulas de portainjertos de la bandeja de entrada y las alinea con 5 plántulas de variedad para

colocar los clips de injerto y asegurar la unión. Las plantas injertadas vuelven a colocarse en la bandeja y esta avanza a la siguiente fila.

*GR300/3*, desarrollado en Italia por Atlantic Man, es un equipo semiautomático para injerto de cucurbitáceas. Este equipo utiliza el método de injerto de empalme con clips de injerto y permite el uso de diferentes clips [25]. Tarda entre 5 y 10 segundos por injerto, consiguiendo una productividad de entre 360 y 720 injertos/h, con la participación de 1 solo operario para el posicionamiento de las plántulas en la posición correcta al inicio del proceso. Las cuchillas de corte se desinfectan en cada ciclo para evitar la propagación de infecciones. Este equipo (Figura 17) se compone de dos soportes para bandejas de plántulas y un puesto de trabajo para el operario. Este operario se encarga de posicionar de forma adecuada cada planta y mediante pedales controla el funcionamiento del sistema. El equipo se encarga de cortar cada planta y posicionar el clip de injerto para asegurar la unión.



Figura 17. Equipo para injerto de cucurbitáceas GR300/3 de Atlantic Man.

*EMP-300*, desarrollado en España por Conic System (España), es un modelo comercial para injerto de solanáceas con cierto grado de automatización [19]. Este equipo (Figura 18) utiliza el método de injerto de empalme y utiliza clips flexibles de injerto. Alcanza una producción de 300-500 injertos/h con una tasa de éxito de 90-95% y requiere 1 solo operador para posicionar las plántulas en el lugar correcto

al inicio del proceso. Este equipo se compone de una estructura de dos soportes para bandejas con un asiento para el operario y un sistema mecánico simple para la puesta de clip de injerto. Permite sólo ajustes simples y limitados del proceso, como el ajuste del ángulo de corte a varias posiciones fijas 20°, 30° y 40°.



Figura 18. Equipo para injerto de solanáceas por empalme con clip para solanáceas EMP-300 de Conic System.

*INJESTAR*, desarrollada en España por Agrupamex, es una máquina simple [19] para apoyo en el injerto de solanáceas a través del método de injerto de empalme con clip flexible de injerto. Permite un corte uniforme de los tallos de patrón y variedad. Alcanza una producción de 450 injertos/h, pero depende de la pericia del operario. Este equipo (Figura 19) posee dos soportes para bandejas, dos zonas de corte para plántulas y una zona de puesta de clip.

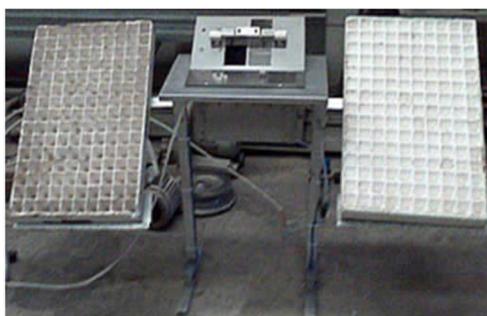


Figura 19. Equipo semiautomático para injerto de solanáceas INJESTAR de Agrupamex.

El operario se encarga de posicionar las plántulas en la posición adecuada durante las diferentes etapas del proceso y realizar el control de las acciones mediante dos pedales.

*2JC-600B*, desarrollado en China por Guangzhou Sky Mechanical & Electrical Technology Co. Ltd., es un equipo semiautomático para injerto de cucurbitáceas mediante el método de injerto de inserción. Precisa de 2 operarios para su funcionamiento y no precisa de clips de injertos para sostener la unión de las plántulas [19]. En este equipo (Figura 20) los operarios posicionan las plántulas en la posición correcta y el equipo se encarga de realizar el corte de las mismas y de insertar la variedad sobre el portainjertos. La planta injertada resultante se deja caer por una rampa de salida donde un operario se debe de encargar de recogerlas para posicionarlas en la bandeja de producto final.



Figura 20. Equipo para injerto de cucurbitáceas 2JC-600 de Guangzhou.

*2JC-1000A*, desarrollado también por Guangzhou Sky Mechanical & Electrical Technology Co. Ltd., es un equipo automático para injerto de cucurbitáceas más evolucionado, que realiza el proceso de injerto de forma simultánea sobre 5 plántulas en un único ciclo con 1 solo operario [19]. Este equipo (Figura 21) está compuesto por 3 cintas de transporte para bandejas de plántulas, una para portainjertos, otra para variedad y otra para plantas injertadas; dos brazos con pinzas múltiples para manipular las plántulas durante el proceso; un sistema de corte para realizar el corte de las plántulas; y una zona de unión donde colocar la pinza de injerto

para asegurar el injerto. El operario se encarga de alimentar el sistema con las bandejas de plántulas de variedad y patrón y retirar las bandejas de plantas injertadas.



Figura 21. Modelo 2JC-1000A de Guangzhou.

*Robotgraft*, desarrollado en Israel por Virentes, es un equipo automático para injerto de solanáceas y cucurbitáceas mediante el método de injerto por empalme con clips de injerto [19]. Se encuentra en la actualidad en fase de desarrollo tras haber sido parcialmente financiado por el programa europeo Horizon 2020. Es capaz de realizar 5 injertos de forma simultánea en un mismo ciclo, alcanzando un rendimiento de cerca de 840 injertos/h con 1 solo trabajador para asistencia del equipo. Este equipo (Figura 22) está formado por diversos mecanismos electromecánicos que actúan secuencialmente para realizar las diferentes fases del proceso de injerto.



Figura 22. Equipo robótico para injertos Robotgraft de Virentes.

Este equipo precisa ser alimentado manualmente con bandejas de plántulas y utiliza grippers múltiples para manipular las plántulas durante el proceso.

A modo de resumen, en la Tabla 1 se recogen los principales desarrollos tecnológicos alcanzados hasta la fecha.

A pesar de que el proceso de injerto de plántulas es un trabajo altamente repetitivo, con grandes requerimientos en mano de obra, y que se han alcanzado diferentes desarrollos para la automatización de dicho proceso, este sigue realizándose principalmente de manera manual. Los equipos desarrollados hasta la fecha para la automatización del proceso han sido diseñados exclusivamente para desarrollar las tareas de injerto de una manera concreta y de forma general carecen de flexibilidad, siendo tremendamente complejos, e implicando grandes costes de desarrollo.

Por otro lado, el amplio uso de robots para desarrollar trabajos en la industria y la constatación de sus ventajas en la automatización de tareas, ha hecho que se intenten buscar soluciones a tareas agrícolas aplicando esta tecnología. Desde el punto de vista de la manipulación de plántulas en semilleros, se han desarrollado algunos intentos de automatización de trabajos de propagación de esquejes mediante el robot para geranios “*Geraniums*” [1]; para crisantemos, “*Kikum*” de la Universidad de Okayama, [10]; para rosas, “*Rombomatic Roses*” de Aris y “*Cutting & Planting robot*” de ISOGroup; o más recientemente para scindapsus, “*Scindapsus Cutting Robot*” de la Universidad de Delf. Estos sistemas utilizan brazos robóticos comerciales para la toma de esquejes sobre plantas madre y los replantan con el fin de formar nuevas plantas. Sin embargo, este enfoque aún no se ha aplicado de forma específica a la propagación de plantas hortícolas mediante injerto, por lo que su aplicación en este campo resultaría en un equipo evolucionado con respecto al estado de la técnica, dando respuesta a una problemática existente desde un punto de vista novedoso.

Modelo	Fabricante	País (Año)	Especies	Automatización (N° operarios)	Método	Eficiencia (% éxito)	Referencias
G892	BRAIN	Japón (1987)	Cucurbitáceas	-		800-1200 (95)	[16]
CCG	BRAIN	Japón (1989)	Cucurbitáceas	-	Empalme con un cotiledón	500	[12] [16]
Super Angel G-710	Nasmix Co.	Japón	Cucurbitáceas	-	Empalme con tubo de silicona	600-800	[14] [16]
Super Angel G-720	Nasmix Co.	Japón	Solanáceas	-	Empalme con tubo de silicona	600-800	[14] [16]
Pin-Grafting Robot	Takii	Japón	Solanáceas	-	Empalme con pin cerámico	-	[14] [16]
JT's Robot	Japan Tobacco Inc.	Japón	Solanáceas	Alta	Empalme con tubo plástico	-(60-70)	[12]
TGR Grafting Robot	Technical Grafting Res. Inst.	Japón	Cucurbitáceas	Alta	Empalme con adhesivo (128 plántulas/ciclo)	800	[12] [14] [16]
GR800B	Iseki & Co. Ltd.	Japón (1993)	Cucurbitáceas	Media (2-3)	Empalme a un cotiledón con pinza	800 (95)	[11] [14]
GR800T	Iseki & Co. Ltd.	Japón (1993)	Solanáceas	Media (2-3)	Empalme con pinza	800 (95)	[11]
AG1000	Yanmar Agricultural Equipment Co.	Japón (1994)	Solanáceas	Alta (1)	-	1000	[11] [14] [16]
Plug-in Grafting Robot	Univ. Osaka Prefecture	Japón (1995)	Cucurbitáceas Solanáceas	Media (1-2)	Inserción sin clip	-	[14] [16]
TAG robot	Univ. SungKyunKwan	Corea (1997)	Cucurbitáceas	-	Aproximación con pinza	900-1200	[16]
Pin-Grafting Robot	Rural Development Administration (RDA)	Corea	Solanáceas	-	Empalme con pin	1200	[12] [16]
Grafting Robot	Univ. Kyungpuk	Corea (1998)	Cucurbitáceas Solanáceas	-	Inserción	900	[14] [16]
Semi-Automatic Grafting Machine	Yupoong	Corea	Cucurbitáceas	Baja (1)	Aproximación	600	[14] [16]
Arnabat	Arnabat S.A.	España (2000)	Cucurbitáceas Solanáceas	Media	-	-	[11]
GR-600	Helper Robotech Co.	Corea (2004)	Cucurbitáceas	Media (2-3)	Empalme con pinza	650-900 (95)	[11]
Tdares- Tomato	TDARES	Taiwán	Solanáceas	Media (1)	Empalme con tubo plástico	200-250 (92-97)	[2]

Modelo	Fabricante	País (Año)	Especies	Automatización (N° operarios)	Método	Eficiencia (% éxito)	Referencias
2JC-350	Guangzhou Sky Mechanical & Electrical Technology Co. Ltd.	China (2006)	Cucurbitáceas	Baja (2)	-	350 (90)	[28]
ISOGraft 1100	ISO Group	Holanda (2007)	Solanáceas	Media (2-3)	Empalme con clip	1000	[19]
INJESTAR	Agrupamex	España (2009)	Solanáceas	Baja (1)	Empalme con clip	450	[19]
2JC-450	Guangzhou Sky Mechanical & Electrical Technology Co. Ltd.	China (2009)	Cucurbitáceas	Media (2)	-	450 (90)	[32]
2JC-500	Guangzhou Sky Mechanical & Electrical Technology Co. Ltd.	China (2009)	Cucurbitáceas	Media (2)	-	500 (90)	[29]
GRF800-U	Iseki & Co. Ltd.	Japón (2010)	Solanáceas	Alta (1)	Empalme a un cotiledón con pinza	800 (95)	[19]
Patchman-S	Mechatech Co. Ltd.	Japón	Cucurbitáceas Solanáceas	Media (1)	Empalme con tubo plástico	1500	[35]
Grafting machine	Univ. Tecnológica de Guangdong Univ. de Hong Kong	China (2011)	Cucurbitáceas	Media (2-3)	Empalme con pinza	720 (92)	[19]
ISOGraft 1200	ISO Group	Holanda (2012)	Solanáceas	Alta (1)	Empalme con clip (5 plántulas/ciclo)	1050 (99)	[19]
GR300/3	Atlantic Man	Italia (2012)	Cucurbitáceas Solanáceas	Media (1-2)	Empalme con clip	360-720	[19]
EMP-300	Conic System	España (2012)	Solanáceas	Media (1-2)	Empalme con clip	300-500 (90-95)	[19]
2JC-600	Guangzhou Sky Mechanical & Electrical Technology Co. Ltd.	China (2011)	Cucurbitáceas	Media (2)	Inserción sin clip	600-700	[27]
2JC-1000A	Guangzhou Sky Mechanical & Electrical Technology Co. Ltd.	China	Cucurbitáceas	Alta (1)	Empalme con pinza (5 plántulas/ciclo)	-	[19]
Robotgraft	Virentes	Israel (2015)	Cucurbitáceas Solanáceas	Alta (1)	Empalme con clip (5 plántulas/ciclo)	840	[19]
AFGR-800CS	Helper Robotech Co.	Corea	Cucurbitáceas Solanáceas	Media (2)	Empalme con pinza	800	[34]

Tabla 1. Desarrollos alcanzados para la automatización del proceso de injerto de plántulas.

### 3. Materiales y métodos

El uso de robots para la automatización de tareas dentro de los semilleros plantea una serie de condicionantes, como el acceso a alimentación eléctrica y neumática, el espacio requerido o la disponibilidad de personal cualificado para el majeo de estos equipos, que deben ser analizados específicamente para cada caso concreto.

Para demostrar la viabilidad de las ideas planteadas en este trabajo fin de máster, se ha tomado como base una celda robotizada básica sobre la que se implementará el sistema de automatización para conseguir la robotización del proceso de injerto de hortalizas.

#### 3.1. Celda de trabajo para automatización del injerto de plántulas

La celda de trabajo que servirá como base para la consecución de los objetivos planteados con este trabajo fin de máster consiste en una celda robotizada compuesta por dos brazos robóticos del fabricante alemán KUKA Robots, modelo Kr6 R900 Agilus sixx, interconectados mediante bus de comunicaciones basado en Ethernet Industrial. El control de ambos brazos robóticos se encuentra centralizado a través de un autómata programable Omron CJ2M.

En la Figura 23 se muestra un diagrama gráfico de interconexión de equipos de la celda de trabajo donde se realizarán las modificaciones necesarias para implementar el sistema de injerto automático basado en robots industriales.



Figura 23. Diagrama de interconexión.

En la Figura 24 se muestra el plano de instalación actual de la celda de trabajo, donde se pueden observar las posiciones de cada uno de los robots.

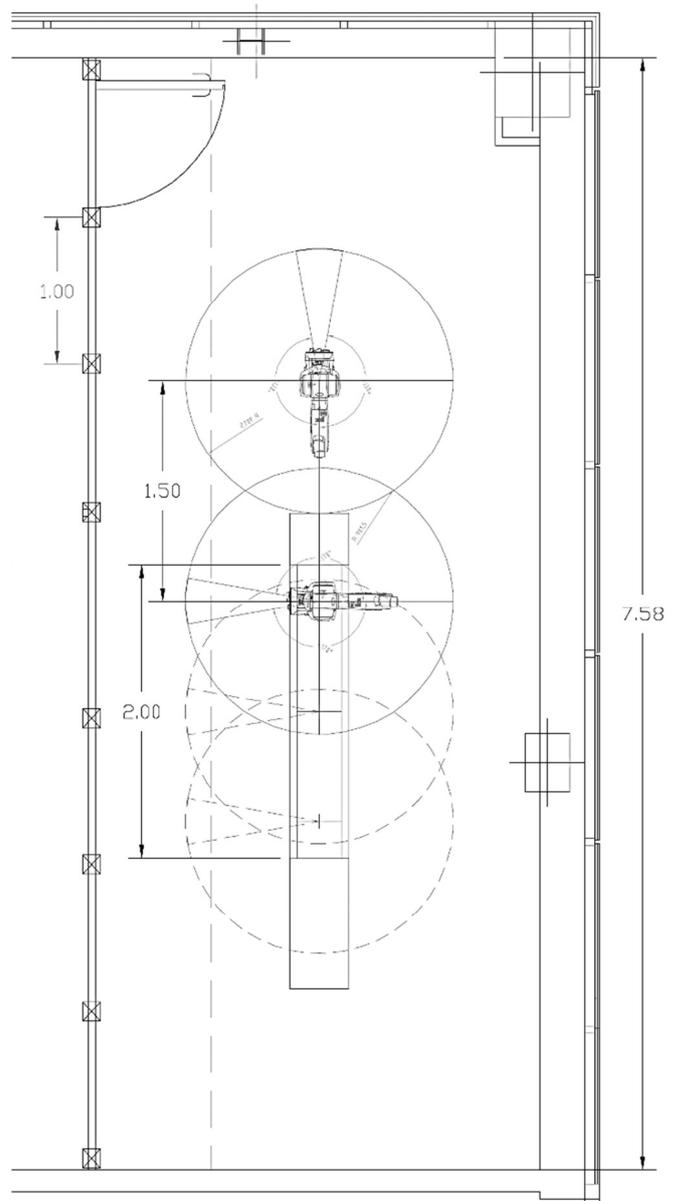


Figura 24. Celda de trabajo.

#### Control centralizado:

La celda robotizada se encuentra interconectada a través de un cuadro de control situado en el exterior de la celda. El núcleo central de este cuadro es un autómata programable Omron CJ2M con CPU 31. Este PLC posee un módulo de conectividad Ethernet IP ETH21, un módulo de 32 entradas digitales ID232 y

otro de 32 salidas digitales OD232, como puede verse en la Figura 25.

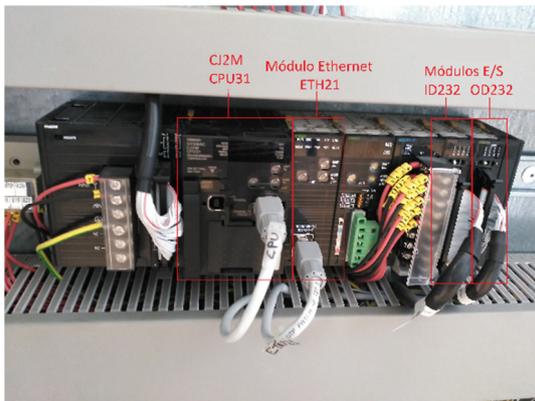


Figura 25. PLC y módulos de interconexión.

Los controladores de cada uno de los brazos robóticos se encuentran conectados a la unidad central de control a través de una red de comunicaciones basada en Ethernet Industrial. A esta misma red se conecta también un PC Industrial que permite el control de operario mediante la correspondiente interface HMI. El paso de mensajes de este equipo con el resto de la red se realiza mediante servidor OPC. Este servidor permite una conectividad robusta con cualquier dispositivo externo que lo soporte, eliminando la necesidad de interfaces o drivers hechos a medida.

### **Robot KUKA Kr6 R900 sixx**

Los robots KUKA KR6 R900 Agilus sixx han sido específicamente diseñados para realizar tareas de manipulación a muy alta velocidad con la máxima precisión. Estos robots muestran resultados impresionantes con ciclos de trabajo mínimos, una alta repetibilidad y una elevada precisión. Su diseño robusto permite trabajar con precisión continua dentro de la celda de trabajo permitiendo una máxima calidad en los trabajos de manipulación.

Los brazos robóticos KUKA de la familia Kr6 son robots TRR de 6 grados de libertad y son capaces de posicionar el elemento terminal en cualquier posición dentro de su rango de alcance.

Los robots de la serie Agilus sixx de KUKA tienen un peso de 52 Kg y, gracias a los sistemas de frenado integrados en cada

eje, pueden ser instalados en el suelo, en el techo o en la pared. Además, sus bajos requerimientos de espacio los hace extremadamente adaptables.

Estos robots ofrecen un área de trabajo óptima con una elevada repetitividad y una alta velocidad en el movimiento de pequeñas cargas. Tiene una capacidad de carga máxima de 6Kg y puede alcanzar hasta 901mm con una repetitividad  $<\pm 0.03\text{mm}$ . De acuerdo al fabricante, este robot es capaz de realizar 150<sup>1</sup> ciclos por minuto. En la Figura 26 puede verse la relación entre el área de trabajo máxima y la carga a mover por el brazo robótico.

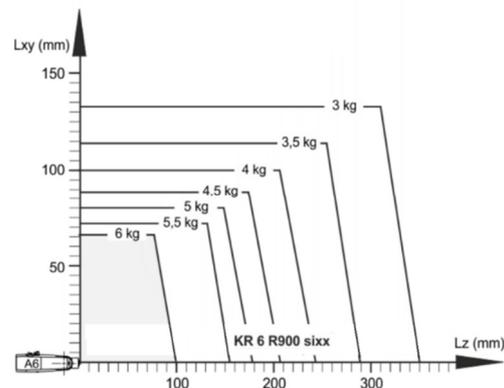


Figura 26. Relación Área de trabajo máxima/Carga.

Los robots KUKA Kr6 poseen la capacidad de alcanzar tanto puntos situados cerca de su base como en el área por encima de ellos, resultando en un volumen de trabajo esférico. En la Figura 27 puede verse el área de trabajo de estos robots y la alcanzabilidad de su extremo.

En la Tabla 2 pueden observarse el rango de movimiento de los ejes del robot.

Eje	Radio de giro
1	+/-170°
2	+45°/-190°
3	+156°/-120°
4	+/-185°
5	+/-120°
6	+/-350°

Tabla 2. Rango de movimiento por eje KUKA Kr6 R900.

<sup>1</sup> Medido con una carga de 1Kg y un movimiento repetitivo 25/305/25

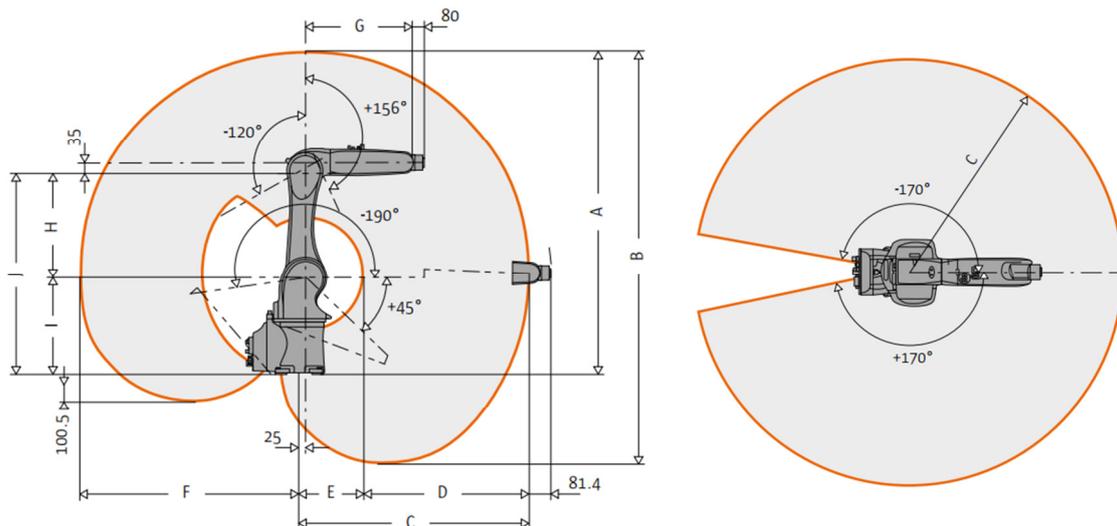


Figura 27. Área de trabajo KUKA Kr6 R900.

En la Tabla 3 se muestran los límites de alcanzabilidad para el posicionamiento del extremo del robot.

Dimensión	Medida
A	1276 mm
B	1620 mm
C	901,5 mm
D	656 mm
E	245,5 mm
F	851,5 mm
G	420 mm
H	455 mm
I	400 mm
J	855 mm

Tabla 3. Alcanzabilidad del robot KUKA Kr6 R900.

En la Tabla 4 puede verse un resumen de los ejes y articulaciones del brazo robótico KUKA KR6 y su muñeca.

Mecánicamente, los robots KUKA Kr6 R900 están protegidos contra polvo y salpicaduras de agua con una protección IP54 y pueden trabajar en ambientes con temperaturas entre +5°C y +45°C. Gracias a su diseño, no precisan de un mantenimiento específico y no necesitan cambio de lubricante. Esto los hace especialmente indicados para sistemas de producción continua e ininterrumpida.

KUKA Kr6 R900 Agilus Sixx		
Articulaciones		
Número	Tipo	Código
1	Articulación de Torsión	T
2	Articulación de Rotación	R
3	Articulación de Rotación	R
Grados de libertad de muñeca		Grados de libertad
Número	Tipo de articulación	6
1	Articulación de Torsión	Volumen de trabajo
2	Articulación de Rotación	Esférico
3	Articulación de Torsión	Clasificación del robot
		TRR

Tabla 4. KUKA Kr6 R900 ejes y articulaciones.

Desde el punto de vista del cableado y la conectividad, los robots KUKA Agilus poseen un sistema de alimentación enrutado

internamente y se comunica con el exterior a través de EtherCAT/EtherNet. En el interior del propio brazo existen tres

válvulas de aire comprimido de 5/2 vías, una línea directa de aire, 6 entradas digitales y 2 salidas digitales, lo que permite una integración fácil y rápida de elementos terminales. De manera adicional, el brazo robótico posee varios puntos de anclaje en los ejes 3 y 4 para equipamiento externo como válvulas o módulos de E/S. Esto posibilita la implementación de celdas robóticas de poco espacio y de reducido coste.

Todas las conexiones del brazo robótico Kr6 con el exterior se centralizan en una placa de interfaz situada en su base. Esta placa posee diferentes conectores para equipamiento externo, cuya distribución puede verse en la Figura 28 y la Tabla 5 asociada.

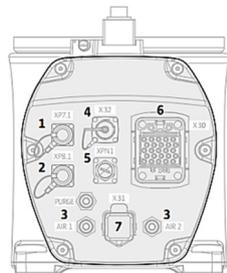


Figura 28. Placa de interfaz de conexiones.

Con.	Tipo
1	Entrada resolver para eje 7
2	Entrada resolver para eje 8
3	Conexiones neumáticas (Aire 1, Aire 2, Aire de limpieza)
4	Micro EMD
5	Extensión de interfaz (100Mbits)
6	Conexión para motor
7	Conexión de interfaz

Tabla 5. Descripción de conectores.

Esta familia de robots puede utilizar el controlador KUKA KrC4 estándar o su versión Compact, que ofrece el mismo rendimiento y fiabilidad pero algunos componentes hardware se han reemplazado por soluciones software. Estos controladores presentan una configuración muy flexible y una alta capacidad de expansión, y han sido diseñados para un bajo mantenimiento y poseen un sistema de control de temperatura interna basado en ventilador.

El controlador KrC4 Compact ofrece las mismas funcionalidades que el KrC4 estándar (seguridad, control lógico, control de movimiento y control de procesos). Las reducidas dimensiones de la carcasa permiten ahorrar espacio mediante la instalación en racks de 19" o pequeños habitáculos de protección. La arquitectura abierta del KrC4 Compact puede controlar ejes externos para una máxima flexibilidad, escalabilidad y rendimiento. De manera adicional a su propio lenguaje de programación de robots KRL, el controlador KrC4 comprende el lenguaje de máquina por control numérico (G-code) y el lenguaje de los PLCs, posibilitando la comunicación directa con controladores externos.

En la Figura 29 y la Tabla 6 asociada, puede observarse el diagrama típico de conexión de equipos al controlador KrC4 Compact.

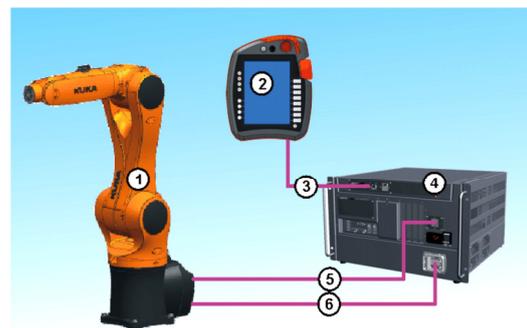


Figura 29. Diagrama típico de conexión a controlador KrC4 Compact.

Comp.	Descripción
1	Manipulador
2	Teach pendant
3	Cable de conexión con smartPAD
4	Controlador KrC4 Compact
5	Cable de conexión para datos
6	Cable de conexión con motor

Tabla 6. Descripción de componentes.

### 3.2. Materiales básicos para el injerto de plántulas

Para asegurar un correcto y fructífero injerto se precisan unas plántulas de patrón y variedad sanas y uniformes, con 2 a 4 hojas verdaderas y un tallo de 2 a 3.5 mm

de diámetro. De ahí que algunos equipos automáticos realicen una selección previa de portainjertos y vástagos por tamaño para la elección de plántulas con diámetros similares, lo que ayuda a alinear correctamente los haces vasculares en la unión de ambas plántulas.

Estas plántulas suelen venir distribuidas en bandejas portaplántula (Figura 30). El diseño y especificaciones (altura, tamaño de los alveolos y posición de los mismos) de estas bandejas dependen generalmente de cada fabricante. Las bandejas para plántulas más utilizadas en España consisten en bandejas de EPS blanco con 54, 77, 128, 216, 294 o 384 alveolos, a las que se le añade una funda plástica protectora para permitir su reutilización (Figura 31). Estas bandejas se fabrican normalmente de acuerdo al formato EuroSize (400x600mm) y son particularmente adaptables a sistemas de producción de plantas en términos de logística y mecanización (siembra, repicado, plantación o trasplante).



Figura 30. Bandeja de plántulas de 150 alveolos.

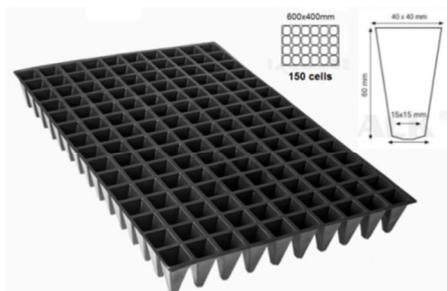


Figura 31. Funda protectora de 150 alveolos y dimensiones de alveolo típicas.

Otro material importante para el injerto de plántulas es la técnica de anclaje de la unión. En los semilleros comerciales se utilizan una gran variedad de diferentes pinzas, tubos, clips, cintas y pines para

realizar el injerto de empalme de modo manual. Sin tener en cuenta las diferencias en diseño de los diferentes fabricantes básicamente se pueden diferenciar dos tipos de clips de injerto: las pinzas de injerto y los clips de silicona o plástico flexible.

Como se desprende de la Tabla 1, la técnica más extendida en los equipos automáticos actuales es el uso de clips de injerto. Existe una gran variedad de clips (Figura 32) que suelen estar fabricados en materiales plásticos flexibles o silicona y pueden incluir soportes para palos guía de crecimiento. Estos clips están disponibles en varios diámetros internos (Figura 33), para adaptarse a diferentes tipos o especies de plantas, y algunos de ellos pueden adquirirse al por mayor en carretes continuos de clip de injerto (Figura 34). Esto permite una fabricación a medida y posibilita una automatización aún mayor. Muchos fabricantes permiten además la realización de un diseño de clip a medida, por lo que estos son los materiales más versátiles para asegurar la unión durante el injerto de las plántulas.

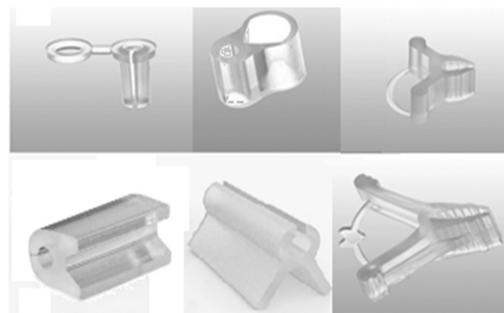


Figura 32. Diferentes modelos de clips flexibles para injerto.



Figura 33. Clips flexibles para injerto de diferentes diámetros.

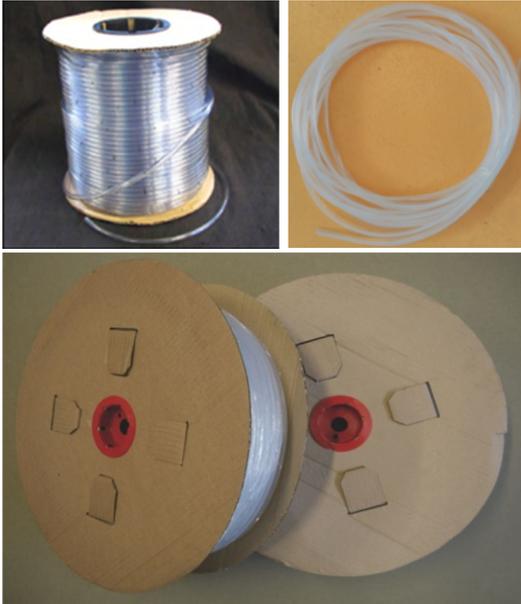


Figura 34. Diferentes carretes continuos de clip de injerto.

Este tipo de clips están disponibles en varios diámetros internos y pueden ser comprados al por mayor en carretes continuos con propósitos de automatización, lo que los hacen perfectos para la dispensación de diferentes longitudes de clip.

#### 4. Resultados

Revisando las investigaciones llevadas a cabo en las últimas décadas y analizando los diferentes equipos de injerto automático de plántulas que se han ido desarrollando hasta la actualidad, se puede llegar a ciertas conclusiones que ayudarán a definir de una forma más precisa los requisitos y necesidades que debería cumplir el sistema para la automatización del proceso de injerto de plántulas a través de robots industriales.

El injerto de aproximación rara vez ha sido empleado para la automatización del injerto, posiblemente debido a los inconvenientes post-injerto que presenta este método y a la complejidad y precisión necesaria para llevarlo a cabo.

Los primeros equipos desarrollados surgieron en Japón y Corea y utilizaban el

método de injerto de inserción como método para la unión del patrón y la variedad, esto se podría deber a que en aquellos años este tipo de injerto era el que más se empleaba para cucurbitáceas en el este de Asia, por lo que los investigadores intentaron adaptarlo en diferentes equipos para poder automatizar el proceso. Con la evolución de los métodos de injerto y dado que este tipo de injerto no es válido cuando el patrón y la variedad tienen pequeñas variaciones de edad, como en el caso de ciertas variedades de solanáceas, empezaron a desarrollarse equipos que hacían uso del método de injerto de empalme con pinzas o clips de injerto.

El método de empalme, en sus diferentes variedades, es el más utilizado en los diferentes desarrollos analizados. De hecho, una de sus variantes, el método de empalme con un cotiledón, sigue siendo utilizada ampliamente en la actualidad incluso de forma manual a pesar de haber sido explícitamente desarrollado para permitir la implementación del método de empalme con máquinas automáticas sobre cucurbitáceas.

Se podría definir, por tanto, el método de injerto por empalme como el método más flexible y polivalente para la automatización del proceso mediante robots industriales. Dentro de este método, el uso de pinzas o clips de injerto es la variante técnica más empleada.

En la Figura 35 se muestra un diagrama de conceptual de este método.

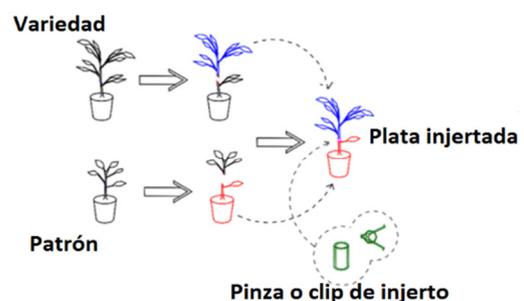


Figura 35. Diagrama del proceso de injerto por empalme con pinza o clip de injerto. Adaptado de [2].

El proceso de injerto a través de robots industriales se podría asemejar al proceso manual típico que realiza un operario en un semillero. Desde el punto de vista de la automatización mediante robots, el proceso manual de un injerto de empalme con clip se puede dividir en tres fases básicas:

1) Reconocimiento y cogida de cada plántula. El proceso de injerto comienza con la cogida de plántulas desde cada una de sus bandejas respectivas. Por lo tanto, el sistema robótico debe ser capaz de detectar la posición exacta de las plántulas para extraerlas de forma correcta de las bandejas portaplántula.

2) Corte de las plántulas para obtener las partes necesarias, parte aérea en la variedad y parte radicular en el portainjertos. Tanto patrón como variedad se deben cortar totalmente con el mismo corte en ángulo, entre  $45^{\circ}$  y  $60^{\circ}$ . Según las preferencias del productor, este corte puede realizarse bien justo por encima de los

cotiledones, en las zonas inferiores del epicótilo, o en las zonas altas del hipocótilo, justo por debajo de los cotiledones. El sistema a diseñar debería poder adaptar el corte para satisfacer los requisitos del productor.

3) Unión de las plántulas. Las dos superficies de corte se deben unir intentando que exista la mayor superficie posible en contacto. Para fijar la posición de unión de las dos plántulas firmemente se utilizan clips flexibles de injerto. Al optar por el uso de carretes continuos de clip de injerto para conseguir una flexibilidad mayor del sistema, en esta fase se incluye el corte y obtención de clips individuales previo a su posicionamiento.

En la Figura 36 se muestra un flujo típico de desarrollo del proceso de injerto mediante robots industriales definido anteriormente.

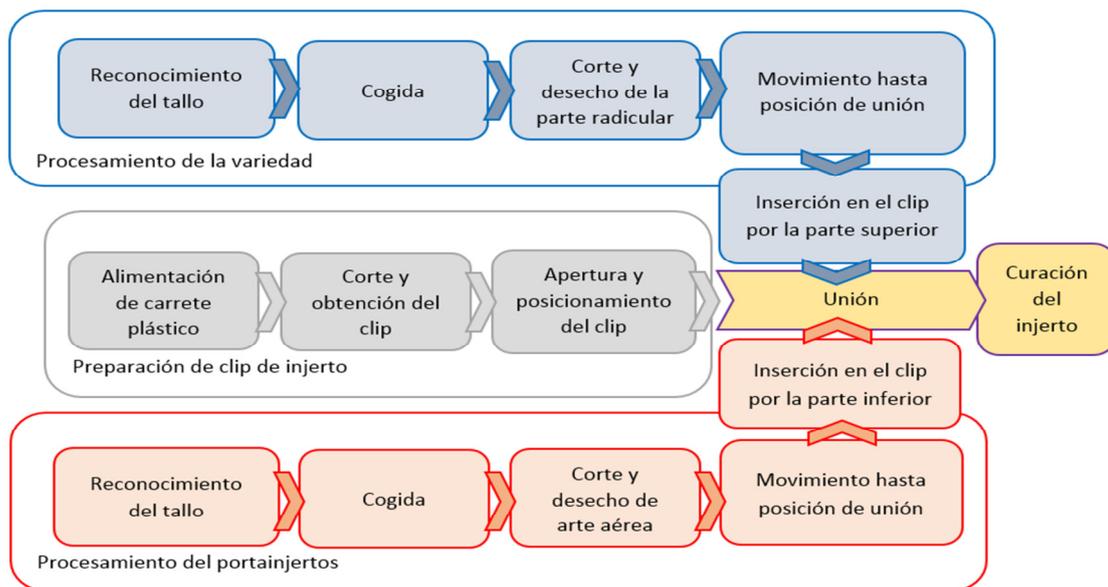


Figura 36. Flujo de acciones típicas para robotización del proceso de injerto.

El análisis de este proceso permite dividir el sistema robótico a diseñar en tres subsistemas básicos: 1) Sistema de detección y manipulación de patrón y variedad, 2) Sistema de corte de plántulas, y 3) Sistema de dispensación de clip de injerto.

De manera adicional, para conseguir una automatización total del proceso y eliminar la necesidad de emplear operarios para la reposición de bandejas, el sistema robótico ha de contar con un sistema automático de alimentación de las mismas.

#### 4.1. Sistema para detección y manipulación de plántulas.

El elemento terminal es una de las partes más importantes de cualquier sistema robótico y existen una gran variedad de tipos y diseños posibles. En el caso del injerto de plántulas el diseño de estos elementos es crítico ya que pueden ser fuente de un gran número de imprecisiones y problemas que afecten directamente al proceso desde su inicio y minen la robustez del desarrollo.

Existen un gran número de tecnologías y técnicas para la manipulación de objetos que pueden ser aplicadas al diseño de manos robóticas y elementos terminales. Teniendo en cuenta la naturaleza de las plántulas, es fundamental el diseño de un gripper capaz de manipularlas sin producirle heridas ni daños significativos.

Para seleccionar la tecnología más idónea para los gripper de injerto, se ha seguido el protocolo marcado por Monkman en su libro de 2007 *Robots Grippers* [22]. En este protocolo, se debe dar respuesta a varias preguntas en cada paso de diseño, hasta llegar a seleccionar y diseñar el gripper adecuado para la manipulación de plántulas. Este proceso paso a paso se muestra en la Figura 37.

Las plántulas a injertar poseen un peso promedio menor a 200g con cepellón incluido, su tallo tiene forma cilíndrica con un diámetro promedio de 2,85mm y su superficie es altamente delicada. La altura promedio de las plántulas viene determinada principalmente por su edad. Teniendo en cuenta que la edad apropiada para asegurar un injerto exitoso en plántulas de tomate se sitúa entre los 25-30 días, la altura promedio de las plántulas para injerto puede considerarse de unos 150mm incluyendo el cepellón. El nacimiento la primera hoja verdadera se encuentra a una altura media de 35,68mm sobre el cepellón y los cotiledones a una altura media de 20,85mm sobre el cepellón.

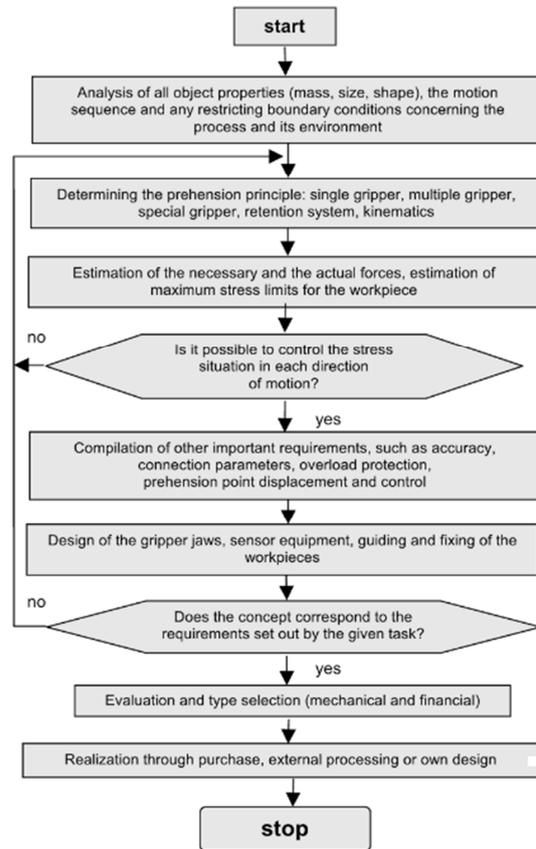


Figura 37. Protocolo de selección de tecnología para grippers

De manera básica existen 3 tecnologías fundamentales para el diseño de grippers robóticos para manipulación: mecánicas de impacto, neumáticas de succión y magnéticas. Con el fin de asegurar una correcta funcionalidad de los grippers de manipulación de plántulas para el injerto, se ha realizado el análisis de sus características por medio de tablas de decisión para selección de la técnica más idónea. En la Tabla 7 puede verse la tabla de decisión usada para seleccionar los dispositivos que se encargarán de realizar las tareas de agarre y manipulación de plántulas.

La tecnología mecánica de impacto basada en dedos paralelos es la más idónea para implementar el elemento terminal para el robot de injerto. Este ha de mantener un agarre correcto durante el proceso de manipulado de plántulas, evitando que las plántulas se deslicen y asegurando la integridad del cepellón durante el movimiento de las mismas.

physical principle		impactive mechanical				pneumatic	magnetic	
		parallel gripper	radial gripper	angle gripper	3 point gripper	suction gripper	permanent magnet	electro-magnet
gripper type		prehended object						
mass	0.2 to 1 kg	█	█	█	█	█	█	
	1 to 10 kg	█	□	█	█	█		
	10 to 50 kg	█	□	█	█	█		█
	heavier than 50 kg	□		█	█	█		
dimensions	20 to 50 mm	█	█	█	█	█	█	█
	50 to 300 mm	█	□	█	█	█	█	█
	300 mm to 1 m	█		█	█	█		█
	more than 1 m	█		█		█		█
inner grip surfaces		█		□	█			█
surface	polished	█	█	█	█	█	█	█
	rough	█	█	█	█			█
	porous	█	□	□	□	□		█
	sensitive	█			□	█	█	█
round parts	disk	█	█		█	█	█	█
	short cylinder	█	█	█	█	█		█
	shaft, rod	█		█				█
prismatic parts	block part	█	█	█		█	█	█
	flat/short	□	█	□		█	█	█
	flat/long			□		█	█	█
synthetics		█	□	□		█		
textiles						□		
foil						█		
glass		□	█	█	█	█		
stoneware		□	█	█	█	□		
sheet metal		█		█		█	█	█
vegetables		█	█	█	█	█		
plants		█	█	█	█			

Tabla 7. Tabla de decisión de selección de tecnología para manipulación

Existen diversas técnicas de cogida de objetos cilíndricos que pueden implementarse mediante grippers paralelos. Como puede verse en la Figura 38, puede

hacerse uso desde una técnica simple basada en 2 dedos simétricos hasta 3 o más dedos concéntricos.

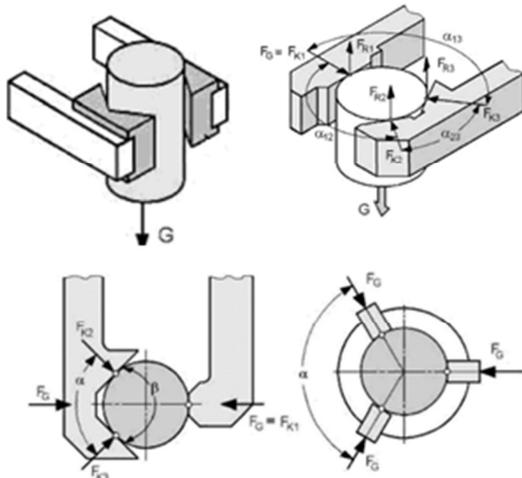


Figura 38. Principales técnicas de cogida de objetos cilíndricos

Durante el proceso manual de injerto en semillero, los operarios suelen realizar la cogida de plántulas para el injerto de dos formas diferentes (Figura 39): cogiendo el tallo con las yemas de dos dedos o “tip grip”, y utilizando tres dedos o “three finger grip”. Ambas técnicas realizan la cogida de plántulas de una forma similar, sólo se encuentran diferencias en la superficie de contacto para el agarre.

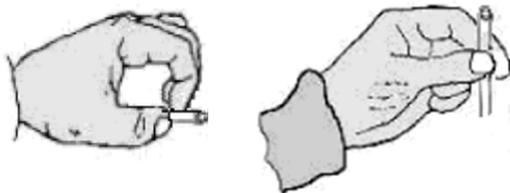


Figura 39. Principales técnicas manuales de cogida de plántulas. Izquierda: *Tip grip*. Derecha: *Three finger grip*.

La técnica más delicada con las plántulas y más simple de implementar mediante un sistema mecatrónico es la de dos dedos. Esta técnica permite la manipulación de las plántulas con un menor contacto mecánico, reduciendo así las probabilidades de producir daños sobre el tallo.

Adicionalmente a los requisitos básicos impuestos por las plántulas, el entorno de trabajo impone otras limitaciones que los grippers a diseñar han de solventar. En las

bandejas portaplántula de 150 alveolos, los alveolos donde nacen las plántulas tienen forma cuadrada de 45x45mm y la separación entre centros es de aproximadamente 50mm, tanto entre filas como entre columnas.

Tras analizar diversos lotes de bandejas con plántulas provenientes de semillero, se ha constatado que a pesar de poder conseguir cierta homogeneidad de plántulas en una misma bandeja, en cuanto a altura y diámetro de tallo, se hace imposible determinar un punto de crecimiento exacto para todas las plántulas de dicha bandeja. El nacimiento de las plántulas dentro de cada alveolo se produce estadísticamente dentro de un círculo de 30mm centrado en el centro del alveolo, aunque se suele dar con frecuencia el nacimiento de plántulas cerca de sus límites. Por tanto, la longitud de los dedos ha de ser inferior a 60mm y su anchura inferior a 10mm. La carrera del gripper debe permitir la unión de ambos dedos en el centro del alveolo y su apertura máxima debe ser inferior a 45mm para no exceder las dimensiones del alveolo y evitar que se afecte a alveolos vecinos.

Por otro lado, la delicada superficie de los tallos de las plántulas restringe los materiales a usar. Por ello, los materiales en contacto directo con las superficies de los tallos deben ser deformables y adaptables y deben asegurar un punto de cogida preciso que mantenga la estabilidad de las plántulas durante todo el ciclo de manipulado. Un diseño básico de este sistema puede verse en la Figura 40.

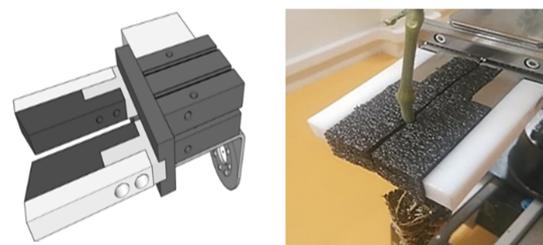


Figura 40. Sistema flexible para cogida de plántula.

Debido a la localización incierta de los tallos de las plántulas, que pueden crecer en cualquier posición dentro del alveolo, es básico poder detectar dicha posición para asegurar el agarre de la plántula. Además, se ha observado que algunas de los alveolos de las bandejas pueden estar vacíos, por lo que se debe poder detectar esta falta para continuar con el proceso de forma eficiente. Esto hace necesario la integración de sensores en el gripper para detectar la presencia de plántulas.

Existe una gran variedad de sistemas de detección de presencia de objetos, sensores de contacto, capacitivos, ultrasónicos... Aprovechando el diseño paralelo de los grippers y la pequeña distancia entre sus dedos, es posible utilizar sensores fotoeléctricos de barrera, robustos y ampliamente usados en el sector industrial. Estos sensores realizan la detección del objeto cuando este interfiere en el haz de luz existente entre emisor y receptor, como se muestra en la Figura 41.



Figura 41. Funcionamiento básico del sensor fotoeléctrico de barrera

Con la colocación de este tipo de sensores en la punta de los dedos de los grippers, como se muestra en la Figura 42 y Figura 43, es posible detectar la presencia de plántula en el alveolo y su posición exacta.

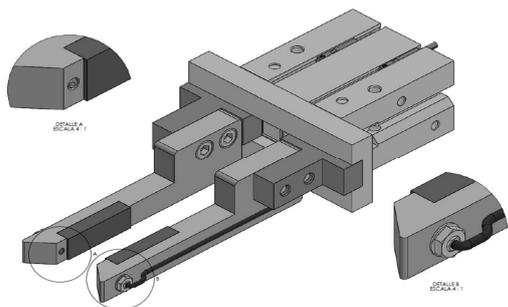


Figura 42. Gripper con detección de plántula diseñada en SketchUp.



Figura 43. Pruebas del gripper con detección de plántula

#### 4.2. Sistema de corte de plántulas

Tras la operación de cogida de las plántulas, patrón y variedad son llevados a su correspondiente zona de corte. El corte de las plántulas es la primera operación destructiva que se realiza directamente sobre ellas, y marcará el resultado de las siguientes acciones, por lo que se debe asegurar un rápido y limpio resultado.

El sistema de corte ha de realizar la división de las plántulas para desechar las partes no válidas, esto es la parte aérea de la plántula patrón y parte radicular de la plántula variedad, y mantener las partes útiles. Este equipamiento debe realizar el corte de las plántulas de forma precisa en el punto exacto configurado, bien justo por debajo de los cotiledones, bien justo por encima de ellos. Un corte limpio y preciso permitirá un contacto total entre las superficies de ambas plántulas y asegurará un alto ratio de éxito de injertos. Este equipamiento debe realizar cortes a un ángulo ajustable entre 30° y 70° y debe permitir un fácil remplazo para minimizar las necesidades de mantenimiento y asegurar un funcionamiento óptimo. El material de las cuchillas de corte a utilizar en el sistema robótico de injerto debe ser un material de alta calidad que permita mantener el filo de corte durante un alto número de ciclos de trabajo y no pierda sus propiedades en ambientes con altos niveles de humedad.

Desde el punto de vista del rendimiento de este equipo, la acción de corte debe ejecutarse con precisión, garantizando un corte limpio sin rebabas, un ángulo de corte constante y preciso, una longitud de tallo adecuada y una superficie de corte con un área óptima.

De forma básica, el dispositivo de corte se compone de tres componentes: la hoja de corte, el soporte para dicha hoja y el actuador de corte.

### **Hoja de corte:**

En el proceso manual llevado a cabo en los semilleros, los operarios encargados del injerto de las plántulas utilizan diferentes cuchillas de corte para separar las plántulas. Estas cuchillas suelen ser de tipo escalpelo, como se muestra en la Figura 44.



Figura 44. Diferentes cuchillas de corte tipo escalpelo

Generalmente se hace uso de bisturís o cuchillos quirúrgicos, por su facilidad de manejo, pero en muchas otras ocasiones se suelen utilizar simples recambios de cuchillas de afeitado, con un precio de adquisición menor que permite desecharlas con una frecuencia mayor. Del mismo modo, muchos de los equipos automáticos analizados anteriormente hacen uso también de cuchillas de este tipo.

Estas cuchillas presentan un perfil de corte muy delgado y hacen posible realizar cortes limpios minimizando el tamaño de las virutas y evitando la presencia de rebabas. Por lo tanto, y con el fin de demostrar la

viabilidad del sistema robótico, en primera instancia se usarán recambios convencionales de cuchilla de afeitado para el sistema de corte de plántulas.

### **Soporte de las cuchillas:**

Dada la gran variedad de modelos de cuchilla existente, es necesario realizar un diseño específico para el soporte de la misma, una vez adquirida esta. Este soporte debe ofrecer un agarre completo de la cuchilla para mantenerla en la posición correcta y debe facilitar el ensamblaje de la misma de forma rápida. Esta estructura de soporte debe además permitir el ajuste del ángulo de corte de una forma sencilla y precisa.

### **Actuador de corte:**

La operación de corte ha de ser llevada a cabo de forma controlada desde la unidad central de control. Tras posicionar la plántula en la posición de corte, la unidad de control transmitirá la orden de corte y el actuador realizará la operación.

Siguiendo estas premisas se ha desarrollado un sistema de corte simple basado en un actuador neumático que se encargará de hacer avanzar la cuchilla hasta realizar el corte total de la plántula.

El resultado de estos diseños puede verse en las Figuras 45.

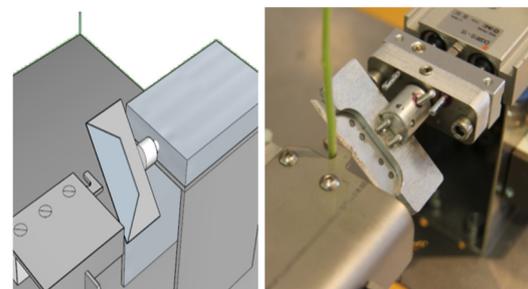


Figura 45. Diseño y prototipo de sistema de corte de plántulas

El resultado final de los diseños del sistema de corte de plántulas puede verse en la Figura 46.

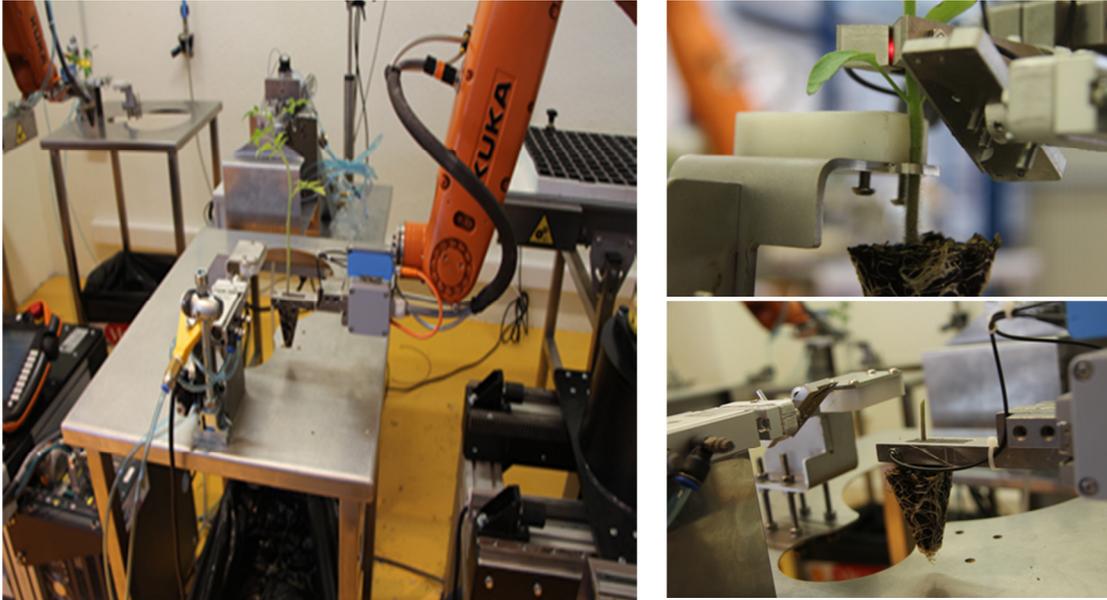


Figura 46. Sistema de corte de plántulas

### 4.3. Sistema de dispensación de clips de injerto

El equipo de dispensado y colocación de clips de injerto se encargará de asegurar la unión de variedad y portainjertos mediante un clip flexible.

Como se ha mostrado anteriormente, existen en el mercado una gran variedad de clips para injerto y cada uno requiere de un método particular para su dispensación. Sin embargo, para conseguir una automatización completa del proceso de injerto y asegurar una alta autonomía del sistema, donde se puedan realizar un gran número de injertos sin necesidad de intervención de los operarios, el uso de carretes continuos de clip de injerto puede ser la mejor opción. Además, este sistema permite la obtención de clips de diferentes longitudes lo que dota al sistema de una mayor flexibilidad.

Para usar este tipo de clips de injerto, el dispositivo de dispensación de clips debe realizar tres operaciones básicas: corte del clip a la medida seleccionada, apertura óptima del clip y posicionado del mismo en el lugar correcto. Por ello, un diseño modular para este dispositivo hace que cada una de las operaciones pueda ser optimizada individualmente, con el fin de

conseguir un sistema que facilite la entrada de las plántulas en el clip y asegure su unión duradera. Este diseño se compone de varios subsistemas mecatrónicos, cada uno de los cuales desarrolla una función específica.

#### Subsistema de corte de clip

La función principal de este subsistema es obtener un clip de injerto con la longitud correcta y sin presencia de rebabas plásticas que puedan bloquear la inserción de los tallos de las plántulas.

El diseño obtenido para este subsistema se compone de varios cilindros neumáticos y un sistema de corte por cuchilla doble filo. Para obtener un clip con la longitud deseada, uno de los cilindros avanza en dirección vertical dicha distancia mientras un microcilindro aprisiona el tubo plástico continuo. Esta operación hace que dicho tubo plástico avance de forma vertical una longitud definida. En esta posición otro cilindro neumático es accionado y retrae la cuchilla de corte. Esta operación separa una pieza plástica de longitud deseada, clip, y la deja preparada para la siguiente operación. En la Figura 47 pueden verse los diferentes componentes de este subsistema.

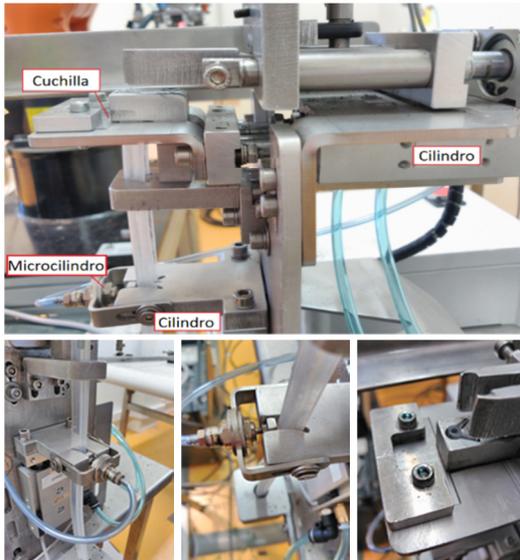


Figura 47. Componentes del subsistema de corte de clips

### Subsistema de apertura de clip

Este subsistema se encarga de obtener una apertura óptima del clip de injerto para permitir la inserción de los dos tallos de plántulas a unir.

El diseño de este subsistema tiene como base dos piezas simétricas de diseño personalizado a modo de pinzas, donde queda posicionado el clip de injerto tras la posición de corte. El movimiento de rotación de un cilindro neumático es transmitido mediante una excéntrica a cada uno de los lados de esta pinza para cerrar el hueco entre ambos y abrir el clip de injerto.

En la Figura 48 pueden verse los diferentes componentes de este subsistema.

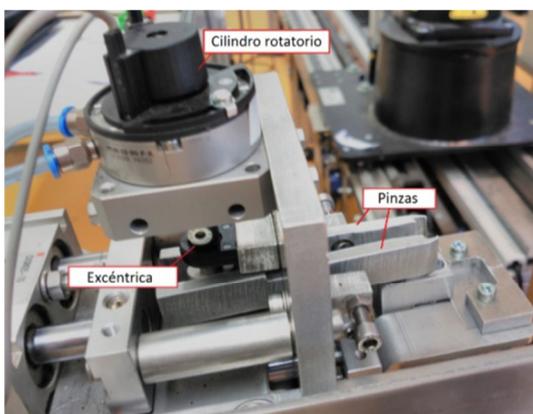


Figura 48. Subsistema de apertura de clip

En la Figura 49 puede verse el funcionamiento de este subsistema y como queda el clip totalmente abierto.

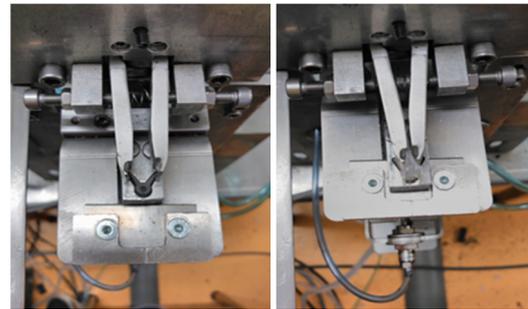


Figura 49. Apertura de clip

### Subsistema de posicionamiento de clip

Una vez abierto el clip de injerto, la función de este subsistema es posicionarlo de la manera correcta para facilitar la inserción de los tallos de las plántulas a unir.

El diseño de este subsistema se compone de un cilindro neumático, que cuando es accionado desplaza todo el subsistema de apertura de clips, que mantiene el clip abierto, hacia adelante hasta posicionarlo en la zona de inserción de las plántulas. Esta operación posiciona el clip de injerto abierto siempre en el mismo lugar para asegurar una fácil inserción de los tallos.

En la Figura 50 pueden verse los diferentes componentes de este subsistema.

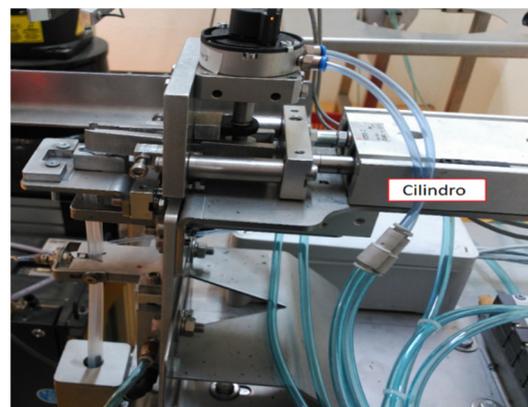


Figura 50. Subsistema de posicionamiento de clip

El resultado final de los diseños del sistema de dispensación de clips de injerto puede verse en la Figura 51.



Figura 51. Sistema de dispensación de clip de injerto

#### 4.4. Sistema automático de alimentación de bandejas de plántulas

Este equipamiento se encarga de gestionar la entrada y salida de plántulas del sistema de una forma totalmente autónoma. La función principal de este equipamiento es la de alimentar al sistema robótico con plántulas de variedad y patrón. Esta operación consiste básicamente en poner a disposición de ambos brazos robóticos las plántulas a injertar.

El método más sencillo y robusto para la implementación de este sistema de transporte es el uso de cintas de transporte de velocidad regulable. De esta forma, el sistema de transporte para la robotización del injerto de plántulas diseñado consta de 3 cintas de transporte controladas electrónicamente, una para la entrada de bandejas con patrón, una para entrada de bandejas de variedad y una para salida de bandejas con pantas ya injertadas.

Estas cintas se controlan a través de la unidad de control central y gracias al uso de variadores de frecuencia, su velocidad de avance puede ser fácilmente configurada.

Además, para facilitar la cogida de plántulas por parte de los brazos robóticos, las bandejas son posicionadas en posiciones determinadas conocidas por cada uno de ellos.

El diseño personalizado de estas cintas (Figura 52) permite un ajuste in-situ de la altura de cada una de las patas, lo que facilita su adaptación salvando ligeros desniveles del suelo. Del mismo modo, estas cintas permiten adaptar su anchura para adaptar el sistema a diferentes formatos de bandejas portaplántula.



Figura 52. Sistema automático de alimentación de bandejas de plántulas

#### 4.5. Integración del sistema robotizado de injerto de plántulas

Con la unificación de los sistemas descritos anteriormente en una misma celda de trabajo, esta podría tener la forma de la Figura 53. En esta célula robotizada cada brazo robot se encargará de la manipulación

de cada una de las plántulas obtenidas de dos bandejas diferentes. Una vez completado el injerto, la planta injertada resultante se colocaría en una tercera bandeja de salida.

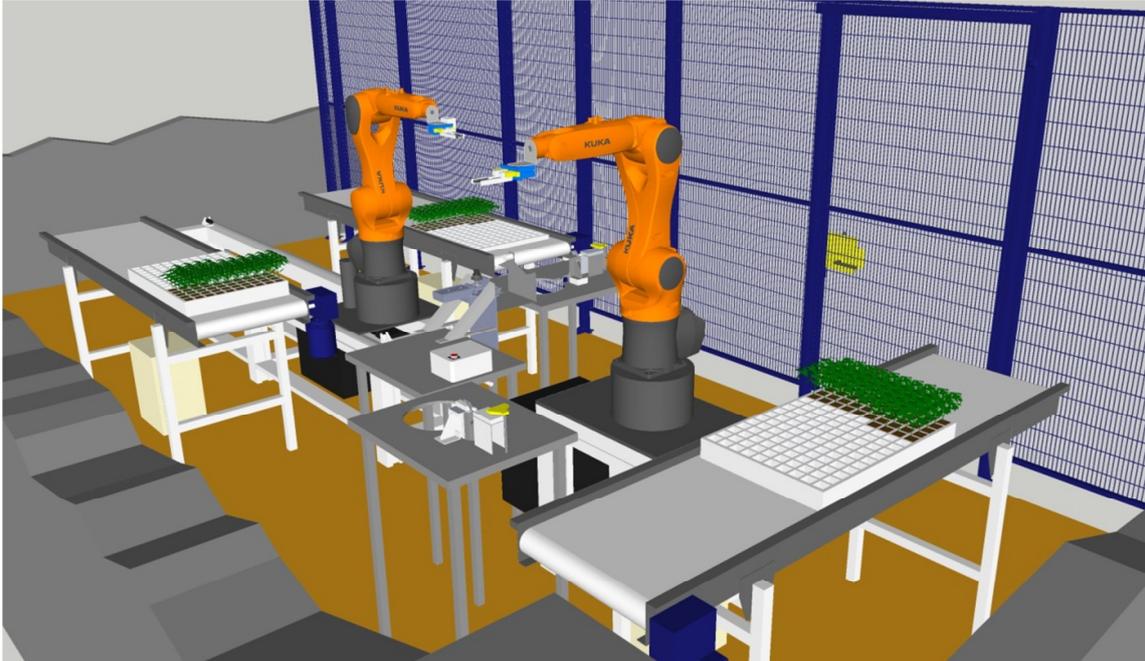


Figura 53. Celda de trabajo diseñada en SketchUp

El proceso de injerto robotizado puede dividirse en cuatro fases básicas, que serán realizadas secuencialmente por los robots de forma coordinada. Estas fases son:

a) Fase “pick”: Durante esta fase, los manipuladores ejecutarán una trayectoria programada hasta el punto de cogida de plántulas. En esta fase la interacción entre los dos robots se limita a finalizar ambos en la posición previa a la fase siguiente.

b) Fase de corte de plántulas: En esta fase los manipuladores acercarán las plántulas hasta una zona de corte donde se dividirán, desechando las partes inservibles, parte aérea en portainjertos y parte radicular en variedad.

c) Fase de unión: Los manipuladores deberán coordinar sus movimientos hasta realizar el contacto de las dos superficies de corte de las plántulas a injertar. La

coordinación en este punto es crucial, especialmente en el momento en que ambos manipuladores se acerquen a la zona común de ensamblaje. Una vez ambas plántulas en contacto total, el sistema posicionará un clip de injerto para asegurar la unión de ambas plántulas. Esta fase finaliza cuando el clip de injerto haya sido satisfactoriamente colocado.

d) Fase “place”: Esta fase comenzará con la liberación de la plántula por parte del manipulador de la plántula de variedad, permitiendo al otro brazo robótico quedarse con la planta injertada. Este manipulador ejecutará una trayectoria programada punto a punto para colocar dicha planta en la bandeja de producto final.

Para concluir, en la Figura 54 se muestra el resultado final de la integración de los todos los equipos desarrollados.

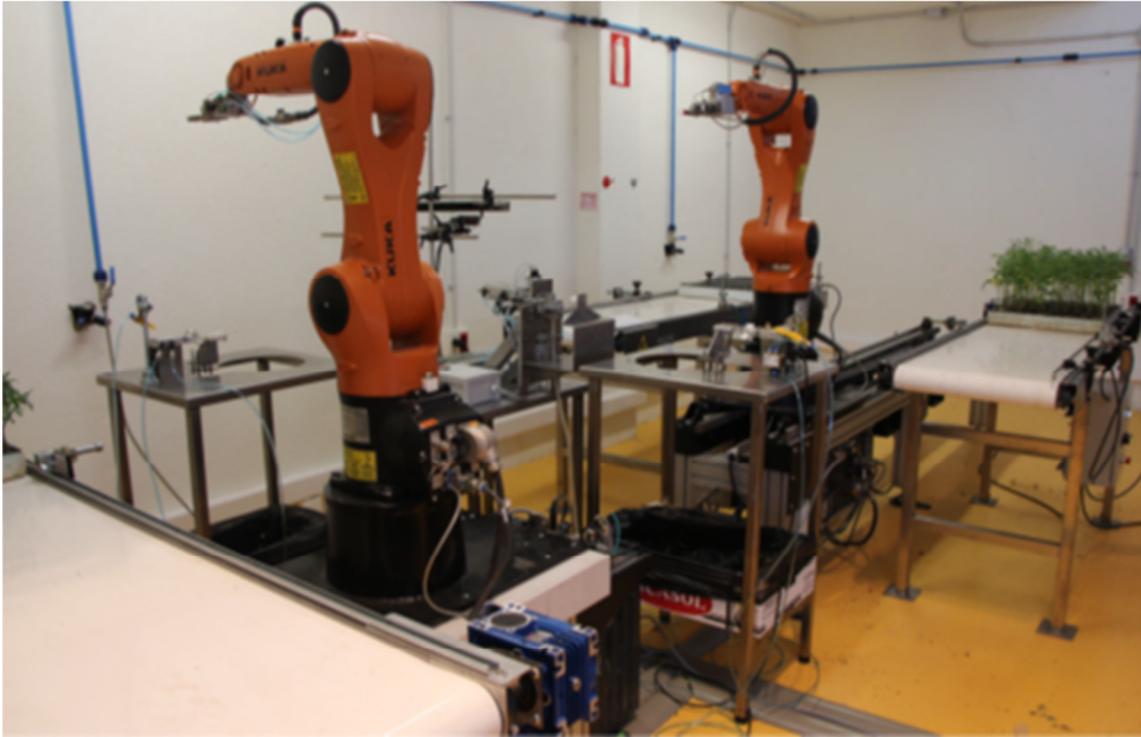


Figura 54. Celda de trabajo implementada

## 5. Conclusiones y trabajos futuros

La producción de injertos de plántulas se ha realizado tradicionalmente de forma manual. Sin embargo, las largas jornadas de trabajo, la fatiga de los trabajadores y su pérdida de concentración hacen que su eficiencia se reduzca significativamente. Para mejorar la eficiencia del proceso y reducir la carga de trabajo de los operarios, a lo largo de los últimos años se han trabajado en la búsqueda y desarrollo de máquinas o equipos de apoyo para el injerto de plántulas.

En la actualidad, existen numerosos diseños de equipos automáticos para realizar el injerto de plántulas y algunos desarrollos disponibles en el mercado. Estos equipos poseen diferentes modos de operación, desde funcionamiento puramente manual o semiautomático, hasta operación totalmente automática, con la necesidad de 1 o 2 operarios para asistir la operación. A pesar de los avances conseguidos, estos equipos muestran ciertas características que los hacen inadecuados para muchos productores. Los productores de planta

injertada deben considerar el precio del equipo, su eficiencia y tasa de éxito y su escalabilidad industrial para elegir el equipo de injerto más adecuado. De forma general, los equipos comercializados en la actualidad muestran una eficiencia relativamente baja para un coste usualmente alto. Continuar con los trabajos de investigación y de desarrollo de nuevas máquinas para injertado de plántulas sigue siendo necesario ya que con la invención de equipos más eficientes, el precio de las plantas injertadas podría reducirse considerablemente para cumplir con las expectativas de los agricultores.

El desarrollo de un equipo robótico para injerto de plántulas como el que aquí se plantea supondría una solución tecnológica de vanguardia que podría resolver los principales problemas asociados a las tareas propias de la técnica de injerto a través del uso de tecnologías de automatización avanzadas.

En este trabajo se ofrecen las bases y fundamentos de la tecnología necesaria para

la automatización del proceso de injerto de plántulas mediante el uso de robots industriales. Haciendo referencia a los diferentes niveles de desarrollo tecnológico, el trabajo aquí plasmado permite alcanzar el nivel TRL3, habiendo formulado los conceptos tecnológicos para la automatización y robotización del proceso de injerto de plántulas, y marcando y definiendo los conceptos de diseño y los requisitos básicos necesarios para el desarrollo de un prototipo funcional. Las primeras pruebas experimentales realizadas en las instalaciones del Centro Tecnológico TECNOVA, han permitido constatar la viabilidad del uso de robots industriales para llevar a cabo las tareas de injerto de plántulas.

El proyecto aquí expuesto puede considerarse como punto de partida de las tareas de ejecución del experimento “INJEROBOTS: UNIVERSAL ROBOTICS SYSTEM FOR GRAFTING OF SEEDLING”, financiado por el proyecto de investigación robótica ECHORD++ (European Clearing House for Open Robotics Development), bajo el Séptimo Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico (FP7), con Grant Agreement No. 601116.

Este experimento, coordinado por el Centro Tecnológico TECNOVA y dónde participan las empresas INGRO Maquinaria y Robotnik Automation, pretende desarrollar un sistema flexible y universal para injerto automatizado de plántulas basado en robots antropomórficos bajo ROS. Partiendo del nivel TRL3, en este experimento se pretende alcanzar satisfactoriamente el nivel de desarrollo TRL7, con la fabricación de un prototipo y la demostración de sus funcionalidades en ambiente de operación.

## 6. Bibliografía

- [1] Bures, S.: 1992; *Geranios*. Horticultura N° 76, 1992, págs.: 38-45.
- [2] Chen, S.; Chiu, Y. C.; Chang, Y. C.: 2009; *Development of a tubing grafting robotic system for fruit bearing vegetable seedlings*. IFAC International Workshop on Bio-Robotics, Information Technology, and Intelligent Control for Bioproduction Systems, paper no. 507.
- [3] Chiu, Y.C., Chen, S., Chang, Y.C.: 2010; *Development of a circular grafting robotic system for watermelon seedlings*. *Applied Engineering in Agriculture*, 26, págs.: 1077-1084.
- [4] Hartmann, H.T.; Kester, D.E.: 1975; *Plant Propagation: Principles and Practices*. 3rd Ed. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J., págs.: 314-427.
- [5] Hassell, R. L.: 2008; *Continuation of Improved Grafting Method for Watermelons Transplants*. Recuperado de <http://www.vegetablegrafting.org>.
- [6] Hiroshi M.: *Present state of grafting of Solanaceae vegetables in Japan*. Recuperado de <http://www.fftc.agnet.org/>.
- [7] Hwang, H. J., Chang H., Kim, S. C.: 1997; *Automatic grafting system for fruit bearing vegetables based on inarching graftage*. In Proc. of ISAMA National Taiwan University, 97, págs.: 75-80.
- [8] Janick, J. (1979) *Horticultural Science* 3rd Ed. W.H. Freeman and Company San Francisco, C.A. págs.: 365-371.
- [9] Kobayashi, K.: 2005; *Vegetable grafting robot*. *Research Journal of Food and Agriculture* 28, págs: 15–20.

- [10] Kondo N.; Monta M.: 1998; *Chrysanthemum Cutting Sticking Robot System*. Japanese Society of Agricultural Machinery, Vol. 60, No. 5, págs: 37-43.
- [11] Kubota, C.; McClure, M. A.; Kokalis-Burelle, N.; Bausher, M. G.; Roskopf, E. N.: 2008; *Vegetable Grafting: History, Use, and Current Technology Status in North America*. HortScience, Vol. 43, No. 6; págs: 1664-1669.
- [12] Kurata, K.: 1994; *Cultivation of grafted vegetables II. Development of grafting robots in Japan*. HortScience Vol. 29, págs: 240-244.
- [13] Lee, J.: 1994; *Cultivation of Grafted Vegetables I. Current Status, Grafting Methods, and Benefits*. HortScience Vol. 29, págs: 235-239.
- [14] Lee, J.; Bang, H.; Sook Ham, H.: 1998; *Grafting of vegetables*. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science 67(6), págs: 1098-1104.
- [15] Lee, J.; Lin, S.; Chiu, J. S.; Hwang, Y. Y.: 2001; *Development of an automatic grafting robot for propagating passion fruits*. J. Agric. and Forestry 50(1), págs: 1-14.
- [16] Lee, J.; Oda, M.: 2003; *Grafting of herbaceous vegetable and ornamental crops*. Hort. Rev. 28, págs: 61-124.
- [17] Lee J.; Kubota C.; Tsao S. J.; Vinh N. Q.; Huang Y.; Oda M.: 2008. *Recent Progress in Vegetable Grafting*. International Workshop on Development and Adoption of Green Technology for Sustainable Agriculture and Enhancement of Rural Entrepreneurship.
- [18] Lee J.; Kubota C.; Tsao S.J.; Bie Z.; Hoyos Echevarria P.; Morra L.; Oda M.: 2010; *Current status of vegetable grafting (Diffusion, grafting techniques, automation)*. Scientia Horticulturae, Vol. 127, Issue 2, págs: 93-105.
- [19] Lin, H.; Chang, C.; Chien, C.; Chen, S.; Chen, W.; Chu, Y.; Yang, A.; Hseuh, Y.; Chang, S.: 2016; *Current situation of grafted vegetable seedling industry and its mechanization development in Taiwan*. FFTC & Tainan-DARES International Workshop on Grafting to Improve Fruit Vegetable Production. 16-20 Mayo, 2016. Recuperado de <http://www.ffmpeg.org/>.
- [20] Memmott, F.: 2010; *Refinement of innovative watermelon grafting methods with appropriate choice of developmental stage, rootstock type, and root treatment to increase grafting success* (Tesis de Máster). Universidad de Clemson, Carolina del Sur, Estados Unidos.
- [21] Monkman, G.; Hesse, S.; Steinmann, R.; Schunk, H.: 2007; *Robot grippers*. Wiley InterScience (Online service). Wiley-VCH.
- [22] Miguel, A.: 1997; *Injerto de hortalizas*. Serie de divulgación técnica. Consellería de Agricultura, Pesca y Alimentación. Generalitat Valenciana.
- [23] National Research Institute of Vegetables, Ornamental Plants and Tea (NIVOT): 2001; *Current use and issues in grafted vegetable seedling production*. National Research Institute of Vegetables, Ornamental Plants and Tea, Japanese Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Report No. 9.
- [24] Nishiura, Y.; Murase, H.; Honami, N.; Taira, T.: 1995; *Development of plug-in grafting robotic system*. In Proc. of the 1995 IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation 3, págs: 2510-2517.

- [25] Oda, M.: 2002; *Grafting of vegetable crops*. Sci. Rep. Agr. & Biol. Sci. Osaka Pref. Univ. 54, págs: 49–72. 2012260\_2012262.html. Recuperado el 15 de Agosto de 2017
- [26] Pessaraki, M.: 2016; *Handbook of cucurbits: growth, cultural practices, and physiology*. CRC Press, Febrero 2016.
- [27] Qi, C.; Kai, J.; Kai, L.; Song, G.: 2011; *Experimental Study on 2JC-600 Automatic Grafting Machine*. Journal of Agricultural Mechanization Research.
- [28] Song, G.: 2006; *Development of 2JC-350 automatic grafting machine with cut grafting method for vegetable seedling*. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2006-12.
- [29] Song, G.; Liu, B.; Wang, X.; Yang, Y.: 2008; *Production test of 2JC-500 automatic grafting machine for watermelon*. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering; 2008-12.
- [30] Tateishi, K.: 1927; *Grafting watermelon on squash*. Japan. J. Hort. 39, págs: 5–8.
- [31] UNIDO: 2007; *Methyl bromide phaseout projects*. United Nations Industrial Development Organization.
- [32] Xingyu, Z.; Song, G.; Kai, J.: 2009; *Study on 2JC-450 Grafting Machine*. Journal of Agricultural Mechanization Research; 2009-12.
- [33] Yetisir, H.; Sari, N.; Yücel, S.: 2003; *Rootstock resistance to fsarium wilt and effect on watermelon fruit yield and quality*. Phytoparasitica, 31, págs: 163-169.
- [34] <https://helpersys.en.ec21.com/Supreme-Precision-Grafting-Robot-->
- [35] <http://www.urban.ne.jp/home/mechatech/pdf/patchman-eng.pdf>. Recuperado el 12 de Abril de 2017.

En los últimos años el injerto de plántulas se ha convertido en un proceso fundamental y ampliamente utilizado en los semilleros y productores de planta hortícola como método de propagación. Tradicionalmente, las labores que implica este proceso han venido siendo realizadas de forma manual por operarios altamente entrenados, bajo condiciones extremas de humedad y temperatura, y de una forma muy intensiva durante cortos periodos de tiempo al año. Durante las últimas décadas han habido algunos esfuerzos para automatizar el proceso de injerto de plántulas hortícolas, principalmente solanáceas y cucurbitáceas, a través de sistemas mecatrónicos más o menos complejos, pero los desarrollos alcanzados no han llegado a copar el mercado debido a que no han conseguido alcanzar las exigencias de los productores.

Un nuevo enfoque, haciendo uso de brazos robóticos industriales para la realización de dichas tareas, permitirá la automatización del proceso de injerto de una forma más precisa, versátil y controlada, a través de técnicas y métodos ampliamente empleados en otros sectores más maduros y que han demostrado sus ventajas. Esto favorecerá la tecnificación del sector agrícola y ayudará a su profesionalización.

Currently, grafting of seedlings is a fundamental process for the plant production sector. This process is widely used among nurseries and producers as a method for plant propagation. Traditionally, operations implied in this process have been carried out manually by highly trained skilled workers. These laborers work under extreme environmental conditions that involve high humidity and temperature. Usually this process requires very intensive labor in a very short time period. During the last few decades, some efforts have been made in order to automatize the grafting process through the development of several complex machines. However, just a few of these machines managed to reach the market because they couldn't fulfill the requirements of the plants' producers.

A new approach will make the grafting process automation possible in a more precise, versatile, and controlled manner with the use of industrial robots. This approach takes advantage of techniques and technologies widely used in other more mature sectors where they have demonstrated their capabilities. This will improve jobs in nurseries using the latest techniques and methods and will lead to the professionalization of the agricultural sector.

