

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño de una herramienta de corte accionada eléctricamente para un sistema de  
poda automática

INGE-3009

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Mecatrónica**

Presentado por:

Xavier Eduardo Banchón González

Marcelo Josias Sotomayor Valencia

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

## Dedicatoria

---

Mis más sinceros agradecimientos a mi padre, Marcelo Sotomayor, y a mi madre, Inés Valencia, por su amor, su esfuerzo y por acompañarme con paciencia y firmeza en cada etapa de mi vida académica. Por, sobre todo, lo dedico a Jesucristo, la Luz del mundo, y al Padre, porque sin Él no sería nada. *Juan 8:12*. En Isaías 41:10 encuentro reflejada mi vida: en mis momentos más duros Dios no me soltó, me sostuvo cuando faltaron fuerzas y, por Su bondad, hoy estoy aquí; a Él sea toda la gloria.

**Marcelo Sotomayor**

## Dedicatoria

---

Dedico este trabajo a mi familia,  
especialmente a mi madre y hermanas por su  
apoyo incondicional, a mi abuelo por  
transmitirme pizcas de su sabiduría y a mi  
abuela que me dio fuerzas para seguir  
adelante. A mis amigos, que me empujaron a  
dar lo mejor en todo momento. Y a mis  
mascotas por brindarme compañía cuando  
más la necesitaba.

**Xavier Banchón González**

## Agradecimientos

---

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi compañero, Marcelo, por sus destacadas contribuciones. A PhD. Marcelo Fajardo, PhD. Carlos Saldarriaga y a PhD. Bryan Puruncajas por la guía y retroalimentación recibida en estos tres meses de arduo trabajo. Y al cliente por brindarnos la oportunidad de trabajar en el presente proyecto.

**Xavier Banchón González**

## Declaración Expresa

---

Nosotros Marcelo Josias Sotomayor Valencia y Xavier Eduardo Banchón González acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

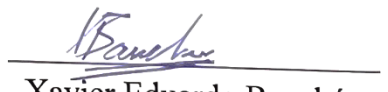
La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 23 de Octubre del 2025.

  
Marcelo Josias

Sotomayor Valencia

  
Xavier Eduardo Banchón  
González

## **Evaluadores**

---

**Bryan Joao Puruncajas Maza, PhD.**

Profesor de Materia

---

**Marcelo Fajardo Pruna, PhD.**

Tutor de proyecto

## Resumen

La herramienta diseñada es una alternativa propuesta a los esfuerzos realizados en investigaciones relacionadas a la automatización de la industria vitivinícola. Los objetivos de este proyecto constituyen el diseño de una herramienta orientada al uso por parte de un sistema autónomo, seleccionar los componentes adecuados para el trabajo, implementar un sistema de control y corroborar el funcionamiento con escenarios de poda reales. El análisis de elementos finitos de nuestro diseño de soporte estimó una resistencia a esfuerzos cortantes de máximo 67 MPa y con un factor de seguridad de 3. En cuanto al consumo de energía, se calculó que la herramienta necesita de 0.69 mAh por corte y que es capaz de realizar exitosamente 6000 cortes de sarmientos en el escenario más crítico usando una batería de 24V con capacidad de 6Ah. Se diseñó un soporte con opción de ser personalizable para acoplamiento a distintos modelos de sistemas autónomos. Los componentes escogidos rinden perfectamente durante simulaciones de corte reales, y se destaca el control preciso del motor por la emulación de señales cuadradas derivadas del sensor de posición Hall utilizado.

**Palabras Clave:** Control, poda de invierno, viñedos, robótica agrícola.

### ***Abstract***

*The designed tool is a proposed alternative within the efforts made in research related to the automation of the wine industry. The objectives of this project include the design of a tool intended for use by an autonomous system, the selection of suitable components for the task, the implementation of a control system, and the validation of its operation under real pruning scenarios. Finite element analysis of the support structure estimated a maximum shear stress resistance of 67 MPa with a safety factor of 3. Regarding energy consumption, it was calculated that the tool requires 0.69 mAh per cut and is capable of successfully performing 6,000 cane cuts in the most critical scenario using a 24 V battery with a capacity of 6 Ah. A support structure is designed with the option of being customizable for coupling with different models of autonomous systems. The selected components perform satisfactorily during realistic cutting simulations, highlighting the precise motor control achieved through the emulation of square signals derived from the Hall position sensor used.*

**Keywords:** *Control, winter pruning, vineyards, agricultural robotics.*

## Índice general

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VII
Simbología.....	VIII
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas.....	XI
Índice de planos.....	XII
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del problema.....	2
1.3 Justificación del problema.....	4
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
1.5 Marco teórico.....	6
1.5.1 Poda y mecanización del viñedo.....	6
1.5.2 Propiedades del material y fundamentos del corte.....	9
1.5.3 Conceptos centrales del estudio.....	12
1.5.4 Estado del arte.....	14

Capítulo 2.....	19
2.1 Metodología .....	20
2.2 Requerimientos de diseño .....	20
2.3 Alternativas de solución.....	20
2.3.1 Solución A: Tijeras de poda eléctricas modificadas.....	21
2.3.2 Solución B: Herramienta de corte personalizada .....	21
2.4 Criterios de evaluación.....	21
2.5 Metodología del diseño .....	23
2.6 Diseño conceptual .....	24
2.6.1 Hojas de corte .....	25
2.6.2 Mecanismo de accionamiento .....	25
2.6.3 Batería.....	26
2.7 Diseño mecánico .....	26
2.7.1 Soporte de la herramienta.....	26
2.8 Diseño electrónico.....	27
2.8.1 Motor DC sin escobillas .....	27
2.8.2 Placa Hall.....	28
2.8.3 Placa de control .....	29
2.9 Diseño del sistema de control.....	31
2.9.1 Señales de accionamiento.....	31
2.9.2 Control del motor.....	32

2.9.3 Detección de finales de carrera.....	35
2.9.4 Flujo de operación .....	37
2.10 Consideraciones éticas y legales .....	39
Capítulo 3.....	40
3.1 Resultados y análisis .....	41
3.2 Análisis mecánico .....	42
3.2.1 Análisis de elementos finitos.....	42
3.3 Análisis electrónico .....	49
3.3.1 Selección de componentes.....	49
3.3.2 Microcontroladores.....	56
3.4 Análisis de sistema de control.....	58
3.4.1 Programación.....	58
3.4.2 Señales de control.....	59
3.5 Análisis de costos .....	60
3.6 Pruebas de corte controladas .....	62
Capítulo 4.....	64
4.1 Conclusiones y recomendaciones.....	65
4.1.1 Conclusiones.....	65
4.1.2 Recomendaciones .....	66
Referencias.....	68
Apéndices.....	74



### Abreviaturas

AISI	American Iron and Steel Institute
BLDC	Motor DC sin escobillas
CAD	Dibujo asistido por computadora
CAE	Ingeniería asistida por computadora
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FEA	Análisis de elementos finitos
FOC	Control orientado por campo
ISO	International Organization for Standardization
MSD	Desórdenes muscoesqueléticos
MOSFET	Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor
PCB	Placa de circuito impreso
PLA	Ácido poliláctico
PWM	Modulación de ancho de pulsos
SMD	Dispositivos de montaje superficial
SVPWM	Modulación de ancho de pulsos por vectores espaciales
TCP	Punto central de la herramienta
THT	Tecnología de agujero pasante

**Simbología**

°	Grados
A	Amperio
cm	Centímetro
J	Joule
kN	Kilo newton
mAh	Miliamperio-hora
MHz	Megahercios
mm	Milímetro
mN.m	Milinewton-metro
MPa	Mega pascal
mT	Militesla
mV	Milivoltios
N	Newton
N.m	Newton-metro
pulg.	Pulgadas
rad	Radian
s	Segundo
USD	Dólares estadounidenses
V	Voltio
V <sub>cc</sub>	Voltaje en el colector común
VDC	Voltios a corriente directa
W	Vatio

## Índice de figuras

Figura 1.1 Viticultor realizando poda de invierno en viñedo .....	5
Figura 2.1 Metodología planteada para el diseño de la herramienta .....	24
Figura 2.2 Cuchillas de poda estándar .....	25
Figura 2.3 Piñón-cremallera de una tijera eléctrica comercial .....	26
Figura 2.4 Representación de batería de 24V para alta carga.....	26
Figura 2.5 Vista isométrica del soporte .....	27
Figura 2.6 Motor DC sin escobillas .....	28
Figura 2.7 Ilustración del efecto Hall .....	28
Figura 2.8 Placa Hall con un arreglo de 4 sensores .....	29
Figura 2.9 Controlador de tijeras eléctricas de poda.....	31
Figura 2.10 Representación gráfica de la comunicación planteada.....	31
Figura 2.11 Diagrama de bloques simplificado del control FOC .....	32
Figura 2.12 Representación del sistema de coordenadas (d,q) superpuesto sobre un motor trifásico .....	32
Figura 2.13 Representación de estados de conmutación en forma hexagonal.....	35
Figura 2.14 Señales de voltaje generadas por la técnica SVPWM.....	35
Figura 2.15 Funcionamiento de un sensor Hall .....	36
Figura 2.16 Flujo simplificado del proceso de corte.....	37
Figura 2.17 Flujo de sub-procesos de apertura y cierre de las cuchillas.....	38
Figura 3.1 Diseño final del soporte.....	46
Figura 3.2 Reductor de voltaje DC Step Down LM2596 .....	50
Figura 3.3 Módulo regulador de voltaje XL4016 .....	50
Figura 3.4 Optoacoplador PC817 de 4 pines .....	50
Figura 3.5 Motor BLDC sin ranuras con caja reductora.....	54

Figura 3.6 Sensor Hall analógico SS49E y su curva de voltaje.....	55
Figura 3.7 Sensor de corriente ACS37002 y su curva de voltaje .....	56
Figura 3.8 Señal de salida de la placa Hall .....	59
Figura 3.9 Resultados de señal de placa Hall emulada.....	60
Figura 3.10 Herramienta instalada en el robot ABB IRB 2600.....	62
Figura 3.11 Posicionamiento de la rama en el punto de corte .....	63
Figura 3.12 Resultados de corte.....	63

**Índice de tablas**

Tabla 1.1 Parámetros para el diseño de la herramienta .....	11
Tabla 2.1 Requerimientos de la solución .....	20
Tabla 2.2 Pesos específicos para los cuatro criterios .....	22
Tabla 2.3 Pesos por criterio .....	22
Tabla 2.4 Conclusiones en base a pesos ponderados .....	23
Tabla 2.5 Tabla de búsqueda para decodificación de estados .....	30
Tabla 3.1 Parámetros del motor BLDC utilizado .....	51
Tabla 3.2 Características del microcontrolador SAMD11C .....	56
Tabla 3.3 Características de la placa Arduino Nano.....	57
Tabla 3.4 Consumo general de la herramienta.....	57
Tabla 3.5 Desglose de costos por ítem.....	61

**Índice de planos**

PLANO 1 Ensamble del soporte

PLANO 2 Dimensiones de la abrazadera izquierda

PLANO 3 Dimensiones de la abrazadera derecha

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

La viña es mucho más que uvas y vino en España; es parte de la cultura y de la economía del país. De hecho, España es el tercer productor de vino a nivel mundial [27], y este sector da trabajo a cientos de miles de personas [30]. Sin embargo, detrás de cada cosecha hay un trabajo duro y poco visible. La poda de invierno, una tarea esencial para que la vid produzca bien, es un oficio que requiere experiencia, fuerza y resistencia. Es un trabajo físicamente muy demandante, en condiciones de frío, y que puede causar problemas de salud en las manos y muñecas de quienes lo realizan [28][29].

Pero hay un problema aún más grande en el horizonte: la gente que sabe podar está envejeciendo, y cada vez hay menos jóvenes que quieran dedicarse a esta labor [31]. Sin poda, la vid se debilita y la producción cae [33]. Es una situación que preocupa mucho al sector, porque sin podadores, no hay viñas productivas.

Fue precisamente en una visita a un viñedo, viendo a los trabajadores podar con esfuerzo bajo el frío invernal, donde nos surgió la pregunta: ¿y si pudiéramos ayudar? ¿Si pudiéramos diseñar una herramienta que, montada en un brazo robótico, pudiera hacer ese trabajo pesado? No para reemplazar al viticultor, sino para ser sus manos en las tareas más duras. Así nació la idea de este proyecto.

Este trabajo es importante porque busca una solución real a un problema del campo, lo que queremos lograr con este proyecto es diseñar y validar una herramienta de corte eléctrica que sea capaz de podar sarmientos de vid de forma autónoma. Nos vamos a enfocar en que sea precisa, que haga un corte limpio como recomiendan los expertos [4].

## 1.2 Descripción del problema

La viticultura es una de las actividades agrícolas más importantes en España. Según la Organización Internacional de la Viña y el Vino, el país ibérico es el tercer mayor productor de vino a nivel mundial [27]. Sin embargo, uno de los procesos más demandantes dentro de la

cadena productiva es la poda de las vides, tarea que se realiza anualmente y que tiene un alto impacto en la productividad y calidad del cultivo. En la actualidad, gran parte de los viñedos españoles siguen dependiendo de mano de obra especializada para realizar la poda, un trabajo físicamente demandante, repetitivo y de temporada. Datos de la Federación Española del Vino muestran que el sector vitivinícola emplea a cerca de 400.000 personas (2% del PIB español) [30].

Estudios demuestran que la poda manual exige una secuencia continua de gestos repetitivos, que generan una carga significativa en la mano y la muñeca. Esto incrementa el riesgo de desarrollar trastornos musculoesqueléticos (MSDs), como el síndrome del túnel carpiano, tendinitis y fatiga muscular localizada. Las zonas más afectadas suelen ser los dedos medio y anular, que soportan los picos de fuerza más altos durante el corte. Factores como el diámetro y la humedad de las ramas aumentan el esfuerzo requerido, intensificando el desgaste muscular, amplificando el estrés fisiológico del operario [28]. A esto hay que sumarle el hecho de que el diseño de las tijeras de poda no siempre distribuye la carga de manera uniforme, lo que provoca desviaciones ulnares y sobrecargas articulares, además de incentivar posturas no ergonómicas [28][29]. No hay que olvidar que la naturaleza del trabajo implica labores repetitivas a bajas temperaturas, lo cual agrava aún más la rigidez muscular y aumenta la probabilidad de inflamaciones tendinosas, sobre todo si las herramientas utilizadas no cuentan con un diseño ergonómico. Estas molestias pueden ser toleradas por agricultores jóvenes, pero no es el mismo caso para los adultos mayores. Un problema latente es, sin duda alguna, el envejecimiento de la población. Datos del Instituto Nacional de Estadística español (2023) aseguran que hay poca población joven (menor a 30 años) trabajando en el sector agrícola [31]. Como consecuencia se puede esperar que la fuerza laboral disponible para mantener los niveles de producción del país vaya decayendo en los

próximos años, y al no tener personas ayudando en la producción de vino, supondrá una gran pérdida económica para España de cara al futuro.

Por otro lado, tener menos vitivinicultores disponibles significa que habrá más viñedos que no recibirán mantenimiento. Las vides no podadas muestran menor desarrollo radicular y mayor expansión de la copa, lo que indica un desequilibrio energético y menor resiliencia ante condiciones de estrés hídrico o nutricional [33]. Esto se traduce en una reducción de frutos en la siguiente temporada. Ya que los podadores seguirán envejeciendo, sus habilidades motrices empeorarán paulatinamente al punto de no poder podar correctamente. Es importante saber que las técnicas de poda después de eventos de congelación tienen un papel decisivo en la recuperación fisiológica de las vides, incluyendo la protección ante plagas y enfermedades [32]. La severidad de la poda influye en la respuesta fisiológica de la vid ante el estrés térmico, por lo que se prefieren técnicas de corte moderadas para preservar el potencial productivo y reducir daños vasculares [34]. En el caso de las vides, la poda es esencial para controlar el crecimiento vegetativo excesivo, mejorar la aireación del follaje y aumentar el rendimiento sin comprometer la salud del cultivo [32].

En base a los requerimientos del cliente, la herramienta de corte será diseñada para su aplicación en la poda de invierno de viñedos en exteriores con sarmientos de diámetros de espesor entre 0.7 y 1.2 cm, y debe funcionar conforme a las buenas prácticas de poda [4]. El funcionamiento en exteriores implica un diseño resistente a condiciones de clima severas y a bajas temperaturas, por lo que se deberá fabricar una carcasa resistente para la herramienta. En cuanto al controlador, este debe mantener a la herramienta en una posición estable durante todo el proceso de corte y priorizar la precisión de la ejecución.

### **1.3 Justificación del problema**

La poda de invierno de la vid es un proceso crítico que determinará la calidad de producción de los viñedos, una actividad que demanda una alta actividad física y largas horas

de trabajo en el exterior. Por la época, significa que los viticultores deben trabajar en un ambiente con temperaturas bajas, afectando su estado de ánimo y reduciendo la productividad. Una solución evidente para el sector agricultor, específicamente para el vitivinífero, es integrar progresivamente tecnologías de automatización como lo son los sistemas de poda autónomos por su capacidad de trabajar con monitoreo humano mínimo.

### **Figura 1.1**

*Viticultor realizando poda de invierno en viñedo*



Adicionalmente, disponer de una herramienta de poda capaz de cumplir con las tareas habituales reducirá notablemente la dependencia extensiva de mano de obra humana. Esto no implica que se dejen de necesitar viticultores, ya que en la mayoría de las ocasiones es necesario realizar una poda manual correctiva debido a errores del sistema de poda. Como consecuencia, se reducen las posibilidades de accidentes laborales y, potencialmente, el tiempo requerido para culminar con la poda. Además, al diseñar una herramienta de corte optimizada se promueve la sostenibilidad energética y operativa, alineándose con las políticas de eficiencia y sostenibilidad que rigen la agricultura europea.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

Diseñar una herramienta de corte para un robot podador autónomo destinado a viñedos de la especie *Vitis vinifera*, integrando un sistema de control electrónico que permita realizar cortes precisos y eficientes durante la poda de invierno, considerando las condiciones operativas del entorno agrícola.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar los requerimientos funcionales y las condiciones de operación de la herramienta de corte con el fin de diseñar el mecanismo de corte, considerando principios de eficiencia mecánica y facilidad de integración.
- Seleccionar los actuadores, sensores y componentes electrónicos adecuados para el control del corte.
- Desarrollar el sistema de control para la activación y regulación del mecanismo de corte.
- Validar mediante simulaciones el funcionamiento de la herramienta a través de pruebas de corte controladas.

## 1.5 Marco teórico

### 1.5.1 Poda y mecanización del viñedo

La poda constituye uno de los pilares centrales en la gestión del viñedo, debido a su incidencia directa sobre la arquitectura de la planta, la disposición de las yemas productivas y el equilibrio entre crecimiento vegetativo y rendimiento. En esta tesis se aborda la poda invernal, intervención que fija la estructura del ciclo vegetativo siguiente y define la

arquitectura básica de la planta. Durante este periodo, los sarmientos presentan un flujo mínimo de savia, lo que permite regular con precisión la carga de yemas y el balance vegetativo-productivo [3], [5], [11].

En viñedos donde no se dispone de pre-poda mecánica, la poda invernal continúa realizándose de forma manual mediante tijeras convencionales [5], [6]. Romano instrumentó estas herramientas y registró fuerzas aplicadas por la mano a lo largo de numerosos ciclos de corte, demostrando que la poda es una tarea repetitiva y físicamente exigente, con riesgos de fatiga y afecciones musculoesqueléticas [6]. Este comportamiento confirma que la poda invernal es crítica tanto desde la perspectiva agronómica como desde la ergonómica.

El manejo de canopia que incluye poda, deshojado, aclareo de racimos y gestión de brotes influye adicionalmente en la composición fenólica, el perfil aromático y las propiedades mecánicas de la planta, así como en la mecanizabilidad del viñedo. Por ello, la poda debe analizarse en el contexto global del sistema de manejo, y no como una operación aislada [3], [4], [12].

La mecanización del viñedo se ha consolidado como respuesta al incremento de los costes laborales y a la creciente dificultad para contar con mano de obra calificada [1]. Actividades como poda, vendimia, manejo de canopia y atado de sarmientos concentran una fracción sustancial de los costes anuales de producción [1]. Tras la expansión de la vendimia mecanizada, la poda y el atado emergen como operaciones prioritarias para reducir la dependencia del trabajo manual [1], [3].

Caprara et al. compararon cuatro tratamientos diferentes de poda invernal con la poda manual tradicional. Determinaron que los tiempos de trabajo se redujeron en 95 % para la poda totalmente mecánica, 47 % para poda mecánica seguida de repaso manual y 75 % para poda mecánica con repaso simultáneo [5]. La mecanización extrema, sin embargo, se asocia a

un incremento de la densidad de pulgares y yemas, así como a una mayor incidencia de pulgares mal posicionados y racimos más pequeños y menos compactos [3], [5].

En un viñedo joven diseñado para admitir poda mecanizada, Dobrei concluyó que el aumento del nivel de mecanización es prácticamente la única vía para mejorar la eficiencia tecnológica, siempre que se gestionen adecuadamente los efectos en la arquitectura de la planta y se realicen correcciones manuales puntuales [13]. Sun, en una revisión exhaustiva, afirma que la mecanización de poda, vendimia y manejo de canopia permite reducciones significativas de costes, aunque advierte que muchas tecnologías siguen siendo no selectivas y requieren viñedos diseñados específicamente para operar bajo esquemas mecanizados [1], [14].

Desde un enfoque de buenas prácticas, la guía Vites Qualitas enfatiza que la poda debe respetar la fisiología de la vid y la integridad de los tejidos conductores para promover la longevidad del viñedo [4]. Por ello, evaluar la mecanización exige considerar no solo la eficiencia operativa, sino también el impacto en la salud y la vida útil de la planta.

La transición desde la mecanización tradicional hacia la automatización y la robótica agrícola requiere integrar la estructura mecánica de la herramienta de corte, el sistema de accionamiento y los módulos de control en un conjunto coordinado que funcione como una unidad. Los robots podadores descritos en la literatura combinan una plataforma móvil, un manipulador, una herramienta de corte, sensores de percepción y un módulo de control que sincroniza la interacción entre estos subsistemas [8], [9].

En este contexto, la herramienta de corte actúa como componente crítico. En desarrollos dirigidos a poda de frutales, Huang et al. indican que la herramienta debe producir bordes de corte suaves, libres de astillamientos y desgarros, para favorecer la cicatrización y reducir el riesgo de pudriciones [7]. Asimismo, destacan la importancia de limitar la masa y el volumen de la herramienta para operar en canopias densas y mantenerse dentro de la

capacidad de carga del manipulador, proponiendo diseños compactos accionados por motores eléctricos de baja potencia [7].

El uso creciente de tijeras eléctricas ha aumentado la productividad, pero también ha introducido riesgos de corte accidental, especialmente en zonas de difícil acceso. Sarria et al. desarrollaron un sistema de seguridad basado en la medición de impedancia eléctrica, que distingue entre madera, alambres del emparrado y tejido humano, ordenando detener o revertir la acción de corte cuando se detecta un escenario peligroso [15]. La integración de funciones de protección en la lógica de control demuestra la necesidad de sistemas donde mecánica, accionamiento y electrónica actúen de forma coordinada.

Por otra parte, estudios sobre herramientas tipo tijera acopladas a manipuladores cartesianos o brazos industriales demuestran que el diseño condiciona el espacio de trabajo y las trayectorias posibles [10], [16], [17]. Herramientas voluminosas o pesadas limitan la accesibilidad en canopias densas, mientras que diseños compactos amplían significativamente la maniobrabilidad [7], [16], [17]. Estos principios estructuran el enfoque de esta tesis, donde la herramienta de corte se concibe desde el inicio como un módulo integrable en sistemas automatizados para poda de vid.

### *1.5.2 Propiedades del material y fundamentos del corte*

El objeto de trabajo de la herramienta de corte propuesta es el sarmiento leñoso correspondiente al crecimiento del año anterior. En lo que sigue se utilizará el término sarmiento para designar el tallo leñoso de la temporada previa, equivalente a la caña descrita en algunos estudios [4], [18], [19], [25]. Durante la poda invernal, el sarmiento se encuentra completamente lignificado, compuesto por una secuencia de nudos y entrenudos, siendo estos últimos la región donde se ejecuta la mayoría de los cortes [4].

Los estudios experimentales que caracterizan su comportamiento mecánico se orientan precisamente a los entrenudos. Esgici et al. preparan muestras de la variedad Şire con diámetros entre 6,5 y 10,5 mm [18], mientras que Pekitkan et al. analizan entrenudos de la variedad Öküzgözü con diámetros aproximados de 6 a 11 mm [19]. Ozdemir et al. examinan tallos de ocho variedades de vid dentro de un rango de 4 a 10 mm [20]. Finalmente, Bu et al. desarrollan modelos numéricos para diferentes diámetros representativos de poda invernal [2].

En el viñedo del presente proyecto se trabajará, por especificación de diseño, con sarmientos cuyo diámetro se sitúa en el intervalo 7–12 mm, de acuerdo con la guía de buenas prácticas de poda de la vid [4] y con las condiciones consideradas en el sistema robótico de poda descrito por Teng [10]. Este intervalo coincide con los rangos estudiados en la literatura experimental [18]–[20], lo que garantiza la validez de aplicar sus datos en el dimensionamiento de la herramienta.

Además del diámetro, la resistencia del sarmiento varía con la posición en la caña y su estado fenológico. Las zonas basales tienden a ser más exigentes en términos de fuerza de corte y energía requerida [18], [19]. Aunque el diseño se orienta a poda invernal, donde el material está ya lignificado, esta variabilidad sugiere la necesidad de dimensionar la herramienta para un caso más exigente que el promedio.

El diseño de la herramienta exige cuantificar explícitamente los parámetros mecánicos asociados al corte. La literatura define de manera consistente cuatro magnitudes fundamentales:

- Fuerza máxima de corte,  $F_{max}$ : máxima carga registrada durante el proceso de cizalladura.
- Tensión de corte,  $\sigma_{max}$ : máximo esfuerzo de tensión en el sarmiento.

- Energía de corte,  $E$ : energía necesaria para seccionar el material.
- Energía específica de corte: energía por área de corte. Utilizada para dimensionar la energía requerida en tallos de diámetros distintos.

Esgici et al. reportan fuerzas entre 472 y 1197 N y energías entre 3,5 y 10,2 J al aumentar el diámetro de 6,5 a 10,5 mm [18]. Pekitkan et al. confirman que tanto la fuerza como la energía de corte aumentan hacia la base del sarmiento y con el diámetro del entrenudo [19]. Ozdemir et al., al evaluar ocho variedades, identificaron a Cabernet Franc como el caso más exigente, con  $F_{\max} = 1397,6$  N,  $\sigma_{\max} = 21,68$  MPa y  $E = 3,68$  J, mientras que Tannat presentó los valores mínimos;  $F_{\max} \approx 981,6$  N,  $\sigma_{\max} = 13,94$  MPa y  $E = 2,39$  J [20].

Bu et al. integran ensayos de tracción, flexión y corte con modelos numéricos, obteniendo fuerzas entre 395 y 437 N y un par de corte aproximado de 15 Nm para determinados diámetros [2]. Aunque estos valores varían respecto a otros estudios por diferencias en geometría de cuchilla y metodología experimental, contribuyen con relaciones analíticas útiles entre diámetro y par requerido.

**Tabla 1.1**

*Parámetros para el diseño de la herramienta*

<b>Propiedad mecánica</b>	<b>Valor [2][18][20]</b>
Fuerza máxima para diámetros cercanos a 10-12mm	1000-1400 N
Energía requerida por sección	3-10 J
Par de corte	~15 N.m

**Nota.** Se toman como referencia los escenarios más demandantes para un adecuado dimensionamiento del diseño.

Los valores mostrados en la Tabla 1.1 constituyen la base para el dimensionamiento de la relación de transmisión, la selección del actuador y la definición de los márgenes de seguridad de la herramienta de corte.

### ***1.5.3 Conceptos centrales del estudio***

La poda invernal realizada con tijeras manuales implica la aplicación repetitiva de fuerzas considerables sobre la herramienta. Romano et al. instrumentan tijeras convencionales con sensores de presión y demuestran que la fuerza ejercida por la mano depende del diámetro del sarmiento, la variedad cultivada y la duración del esfuerzo [6]. Este comportamiento incrementa el riesgo de trastornos musculoesqueléticos en extremidades superiores, especialmente durante campañas prolongadas de poda que pueden extenderse durante varios meses [6].

La repetitividad y la magnitud del esfuerzo justifican la necesidad de trasladar la generación de fuerza desde la mano del operario hacia un actuador eléctrico. De esta manera, el diseño de una herramienta accionada electrónicamente no solo reduce la carga física, sino que mejora la uniformidad y la consistencia del corte, aspectos relevantes para la calidad agronómica.

La calidad del borde de corte constituye un requisito central en la poda de cultivos leñosos. Huang et al. establecen que los cortes deben ser lisos, sin astillamientos ni desgarros, para promover una cicatrización adecuada y disminuir la posibilidad de pudriciones en madera [7]. En estudios forestales, Shekwa demuestra que herramientas motorizadas producen superficies más lisas y heridas más pequeñas en *Pinus elliottii*, acelerando la oclusión del tejido [21].

La interacción entre herramienta y material vegetal también influye en la fuerza necesaria. Selvi et al. muestran que el uso de recubrimientos de bajo coeficiente de fricción en las cuchillas reduce significativamente la fuerza media y la energía específica de corte en

poda de uva [22]. Esto tiene implicaciones directas en el diseño: reducciones en fricción permiten seleccionar actuadores más compactos o mejorar el margen de seguridad sin aumentar la potencia instalada.

A partir de la literatura revisada, se identifican parámetros funcionales clave para el diseño del mecanismo de corte. Como se resume en la Tabla 4, el dimensionamiento de la herramienta se basa en una fuerza máxima de corte del orden de 1,0–1,4 kN, energías por corte de 3–10 J y un par mínimo de referencia de aproximadamente 15 Nm [2], [18]–[20]. Además, el diseño debe garantizar un borde de corte liso, sin astillamientos ni desgarros, y trasladar la generación del esfuerzo de corte desde la mano del operario hacia el accionamiento eléctrico, reduciendo la carga física y el riesgo ergonómico [6], [7], [21].

Las tijeras eléctricas se sitúan conceptualmente entre la herramienta manual clásica y el efector final de un sistema robótico. Su operación se basa en un motor eléctrico —o neumático— cuya acción de cierre es gobernada por un controlador electrónico, mientras que el operario se limita al posicionamiento y al accionamiento del gatillo [10], [15].

Aunque estas herramientas aumentan la productividad entre 8.000 y 10.000 cortes por jornada [15], también introducen riesgos de corte accidental, especialmente en zonas de acceso reducido. Para mitigarlos, Sarria et al. desarrollaron un sistema de seguridad basado en impedancia eléctrica, capaz de distinguir entre madera, alambres del emparrado y tejido humano, deteniendo o invirtiendo la cuchilla en situaciones peligrosas [15].

En el ámbito de diseño de efectores finales, Huang et al. proponen herramientas compactas de masa reducida, con mecanismos integrados de guiado, sujeción y corte accionados por motores eléctricos [7]. Zahid et al. adaptan enfoques similares en manipuladores cartesianos y brazos industriales, destacando que la geometría del efector

condiciona el espacio de trabajo y la capacidad de alcanzar puntos de corte en canopias complejas [16], [17].

Teng demuestra que es posible utilizar tijeras eléctricas comerciales como efector final de un sistema robótico para poda invernal de vid; sin embargo, estas herramientas no fueron concebidas originalmente para integración completa con sistemas de control centralizados [10]. Las revisiones de Nouri y Navone coinciden en que el efector final es uno de los mayores cuellos de botella para la automatización de la poda, debido a restricciones de tamaño, masa, consumo de potencia y necesidad de cortes suaves y precisos [8], [9].

#### **1.5.4 Estado del arte**

El estado del arte de esta tesis se organiza en cuatro ejes: I. los sistemas de poda invernal en vid y su mecanización, II. la caracterización mecánica del material vegetal, III. las herramientas motorizadas y sistemas de seguridad, y IV. los sistemas robóticos y efectores finales desarrollados para cultivos leñosos.

Estos ejes permiten situar la herramienta de corte propuesta dentro del avance tecnológico actual.

**I. Sistemas de poda: manuales, mecánicos e híbridos.** En la literatura se han comparado de forma sistemática la poda manual, la poda mecánica tipo seto y distintos esquemas híbridos en viñedos de *Vitis vinifera* [3], [5], [13]. En conjunto, estos trabajos muestran que la mecanización permite reducciones de tiempo de entre 47 % y 95 % según el grado de intervención mecánica, a costa de modificaciones en la arquitectura de la planta y en la distribución de pulgares y yemas [3], [5], [13]. Revisiones posteriores, como las de Sun y Kurtural, han confirmado que la mecanización de la poda, del manejo de la canopia y de la vendimia reduce de forma sustancial los costes laborales, aunque muchas de las tecnologías disponibles siguen siendo poco selectivas y requieren viñedos diseñados específicamente para

operar bajo esquemas mecanizados [1], [14]. Finalmente, la guía técnica Vites Qualitas recuerda que cualquier modalidad de poda debe respetar la fisiología de la vid y la integridad de los tejidos conductores, de modo que la evaluación de sistemas mecanizados y automatizados debe considerar tanto la eficiencia operativa como el impacto agronómico [4].

**II. Caracterización mecánica del material vegetal y desarrollo de herramientas de corte.** Este eje abarca estudios que definen la resistencia mecánica del sarmiento y evalúan la interacción herramienta–material. Ozdemir et al. analizaron ocho variedades de uva y reportaron hallazgos importantes en cuanto a propiedades mecánicas de un viñedo en función de su variedad de cosecha. Cabernet Franc emerge como la variedad que más endurece la vid siendo necesaria una fuerza de máximo 1397,6 N y 3,68 J de energía para cortar una rama. En cambio, la variedad Tannat reduce la fuerza requerida a 981,6 N y la energía a 2,39 J [20]. El estudio remarca la alta relevancia de la energía dedicada al corte al diseñar cuchillas apropiadas para la tarea. Esgici et al. estudian sarmientos de la variedad Şire y registran incrementos en fuerza y energía de corte con el diámetro del entrenudo, con un rango entre 472–1197 N y 3,5–10,2 J, respectivamente [18]. Pekitkan et al. amplían este análisis para Öküzgözü, incorporando variaciones a lo largo de la caña y en distintos estados fenológicos, destacando la región basal como la más exigente [19]. Bu et al. combinan ensayos experimentales con modelos numéricos mediante elementos finitos, logrando reproducir curvas fuerza–diámetro y estimar un par de corte cercano a 15 Nm para ciertos diámetros [2]. Este modelo constituye una referencia directa para el diseño del actuador. Liu modela la interacción herramienta–rama mediante simulaciones de corte por impacto, introduciendo criterios de daño y patrones de tensiones que permiten evaluar geometrías de cuchilla y estrategias de corte [24]. Selvi demuestra que recubrimientos con bajo coeficiente de fricción reducen significativamente la energía específica necesaria para cortar sarmientos, favoreciendo el uso de actuadores más compactos [22]. Aunque independiente del diseño de

poda, Bakar estudia sarmientos como material para producción de fibras, concluyendo que su estructura interna es altamente anisótropa y sensible a condiciones ambientales y químicas [25], confirmando la complejidad mecánica del material vegetal.

**III. Herramientas motorizadas de poda, ergonomía y seguridad.** La literatura sobre herramientas motorizadas destaca dos temas centrales: (1) reducción del esfuerzo humano y (2) incorporación de sistemas activos de seguridad. Romano et al. instrumentan tijeras manuales para medir cargas musculares reales, validando la relación entre diámetro, variedad y nivel de esfuerzo, y subrayando el riesgo acumulativo de fatiga [6]. Estas conclusiones soportan la transición hacia herramientas accionadas eléctricamente. Shekwa analiza herramientas eléctricas en *Pinus elliottii*, demostrando que producen cortes más limpios y heridas más pequeñas que las herramientas manuales, lo que acelera la oclusión del tejido [21]. Aunque no corresponde a vid, este principio agronómico es extrapolable. Sarria et al. incorporan un sistema basado en impedancia eléctrica que distingue entre madera, alambres del emparrado y tejido humano, integrando la función de seguridad directamente en el controlador de la herramienta [15]. Esta aproximación marca una diferencia con herramientas pasivas, ya que la seguridad pasa a formar parte del comportamiento dinámico del sistema. Wilson describe el sistema de potencia del “*Hauff Grapevine Pruner*”, una máquina especializada para poda de vid que incorpora análisis detallado de transmisión de potencia y modos de fallo [26], concepto transferible a herramientas a escala de efector final.

**IV. Sistemas robóticos de poda y efectores finales.** El área más avanzada del estado del arte corresponde a robótica y automatización agrícola. Huang et al. desarrollan un efector final capaz de guiar, sujetar y cortar ramas en frutales, con diseño compacto y accionado mediante motores eléctricos de baja potencia [7]. Zahid et al. presentan dos efectores tipo tijera para poda de manzano integrados en manipuladores cartesianos 3P3R, demostrando la

necesidad de herramientas esbeltas y de volumen reducido para maniobrar en canopias complejas [16], [17]. Para vid, Teng desarrolla un sistema robótico para poda invernal que integra reconocimiento estructural de la planta, generación de puntos de corte y ejecución mediante un manipulador equipado con tijeras eléctricas comerciales [10]. Aunque el sistema valida la automatización, evidencia que las tijeras comerciales no fueron diseñadas para integración robótica completa. Las revisiones de Nouri y Navone clasifican tecnologías de percepción, manipuladores y efectores utilizados en poda robótica, destacando retos como variabilidad estructural de las plantas, espacio reducido en canopias, necesidad de cortes precisos y restricciones de masa y consumo en efectores finales [8], [9]. En cosecha robótica, Fatehi desarrolla un sistema autónomo para recolección de rosas damascenas con un efector capaz de cortar y manipular flores sin dañar la planta [23]. Aunque la tarea difiere, el principio de integración completa entre percepción, planificación y corte es aplicable a los sistemas de poda.

La revisión presentada permite articular un marco integrado en el que convergen los fundamentos agronómicos de la poda, las propiedades mecánicas del sarmiento de vid, el desarrollo de herramientas de corte accionadas eléctricamente y los avances recientes en robótica agrícola aplicada a cultivos leñosos. Desde el punto de vista agronómico y operativo, la poda invernal se confirma como una operación de alto impacto en la estructura de la planta, en la distribución de yemas productivas y en la calidad de la uva y del vino. La mecanización ha permitido reducciones significativas en el tiempo de trabajo por unidad de superficie, pero a costa de una menor selectividad y de modificaciones relevantes en la arquitectura del viñedo; en consecuencia, cualquier solución mecanizada o automatizada debe ser compatible con la fisiología de la vid y con la preservación de la integridad de los tejidos conductores.

En paralelo, los estudios de caracterización mecánica del material vegetal y de interacción herramienta–sarmiento proporcionan una base cuantitativa consistente para el dimensionamiento de mecanismos de corte. La dependencia de la fuerza y de la energía de corte respecto al diámetro, la posición a lo largo del sarmiento y la variedad cultivada pone de manifiesto la necesidad de considerar escenarios de diseño exigentes y factores de seguridad adecuados en la selección del actuador y en el diseño de la transmisión de fuerza.

Los desarrollos en herramientas motorizadas de poda muestran que es técnicamente viable transferir el esfuerzo de corte desde la mano del operario hacia un actuador eléctrico, reduciendo la carga física, mejorando la calidad del borde de corte e incorporando funciones de seguridad activas en la lógica de control. Al mismo tiempo, los trabajos en robótica agrícola evidencian que el efector final sigue siendo un elemento crítico para la adopción práctica de sistemas de poda autónomos, debido a restricciones de masa, volumen, consumo de potencia y capacidad para generar cortes suaves en canopias densas.

En este contexto, la tesis se posiciona en el punto de unión entre estos ejes: propone el diseño de una herramienta de corte tipo tijera, accionada eléctricamente y concebida desde el inicio como módulo integrable en sistemas automatizados de poda de vid. El diseño se fundamenta en los parámetros mecánicos reportados para sarmientos de *Vitis vinifera* y en las lecciones extraídas de herramientas motorizadas y efectores finales existentes, con el objetivo de avanzar hacia soluciones que combinen eficiencia operativa, calidad agronómica y compatibilidad con arquitecturas robóticas de escala media.

## **Capítulo 2**

## 2.1 Metodología

En esta sección abordamos la metodología que se llevó a cabo para llegar a la solución propuesta. Comenzando con los requerimientos solicitados por el cliente, propusimos ideas potenciales, y discutimos sus ventajas y limitaciones para seleccionar la alternativa más favorable. Luego explicamos las ideas clave detrás de los componentes mecánico, electrónico y de control de la solución, incluyendo las razones que respaldan las decisiones de diseño en cada apartado. Para finalizar, detallamos brevemente las especificaciones finales de la herramienta y discutimos la ética de nuestro proyecto.

## 2.2 Requerimientos de diseño

Como paso inicial se levantaron los requerimientos mínimos con los que debe cumplir nuestro diseño de herramienta de poda. Estos se detallan en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1**

*Requerimientos de la solución*

<b>Requerimiento</b>	<b>Descripción</b>
Corte	Sarmientos con diámetros entre 7 y 12 mm
Control	Apertura y cierre de las hojas de corte. Torque del motor.
Peso máximo	3 kg
Fuente de alimentación	Batería externa para alimentar a la herramienta
Acoplamiento	Por brida según el estándar robóticos ISO 9409-1.

## 2.3 Alternativas de solución

Considerando los requerimientos especificados por el cliente se idearon soluciones que logren cumplir con el objetivo de podar viñedos satisfactoriamente.

### ***2.3.1 Solución A: Tijeras de poda eléctricas modificadas***

Utiliza los componentes eléctricos y mecanismos de un par de tijeras eléctricas comerciales adaptados para funcionar como una herramienta de corte acoplable a un sistema robótico

### ***2.3.2 Solución B: Herramienta de corte personalizada***

Construida usando elementos mecánicos y electrónicos encontrados en el mercado, las cuchillas son mecanizadas en un taller local. Incorpora un mecanismo de piñón-cremallera para el accionamiento de las tijeras.

## **2.4 Criterios de evaluación**

Para determinar la solución más adecuada hemos definidos los siguientes criterios de evaluación:

- **Costo inicial:** La inversión necesaria para adquirir y/o producir los materiales necesarios, tales como piezas mecánicas y componentes electrónicos.
- **Tiempo de desarrollo:** El tiempo estimado para diseñar los componentes mecánico, electrónico, y de control de la herramienta.
- **Confiabilidad:** Capacidad de cumplir con la rutina de poda en el entorno de trabajo modelado sin fallos críticos.
- **Complejidad:** Cantidad de elementos necesarios para el funcionamiento de la solución.

Se definieron como más importantes la cantidad de inversión inicial para poner en marcha el proyecto y el tiempo proyectado para implementar la solución, esto por limitaciones en recursos y plazos de trabajo.

**Tabla 2.2***Pesos específicos para los cuatro criterios*

<b>Criterio</b>	<b>Costo</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Confiabilidad</b>	<b>Complejidad</b>	<b><math>\Sigma + 1</math></b>	<b>Ponderado</b>
Costo	—	1	1	1	4	0.4
Tiempo	0	—	1	1	3	0.3
Confiabilidad	0	0	—	1	2	0.2
Complejidad	0	0	0	—	1	0.1

Para evaluar el impacto de cada criterio en las soluciones propuestas asignamos objetivamente un orden de prioridad representado por valores numéricos, donde se favorece la solución con un peso mayor. El desglose de los pesos se detalla en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3***Pesos por criterio*

<b>Criterio</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b><math>\Sigma + 1</math></b>	<b>Ponderado</b>
<i>Costo</i>				
Solución A	—	0	1	0.333
Solución B	1	—	2	0.666
<i>Tiempo</i>				
Solución A	—	1	2	0.666
Solución B	0	—	1	0.333
<i>Confiabilidad</i>				
Solución A	—	1	2	0.666
Solución B	0	—	1	0.333
<i>Complejidad</i>				
Solución A	—	0.5	1.5	0.5
Solución B	0.5	—	1.5	0.5

Por último, en la Tabla 2.4 se ponderan las soluciones en función de los pesos calculados por criterio para identificar la solución con mayor prioridad por un orden de numeración ascendente; siendo 1 = Mayor prioridad y N=Menor prioridad, donde N es la cantidad de soluciones consideradas en el análisis. Finalmente se escoge la alternativa con mayor prioridad.

**Tabla 2.4**

*Conclusiones en base a pesos ponderados*

Conclusiones	Costo	Tiempo	Confiabilidad	Complejidad	$\sum + 1$	Prioridad
Solución A	$0.333*0.4$	$0.666*0.3$	$0.666*0.2$	$0.5*0.1$	0.5162	1
Solución B	$0.666*0.4$	$0.333*0.3$	$0.333*0.2$	$0.5*0.1$	0.4829	2

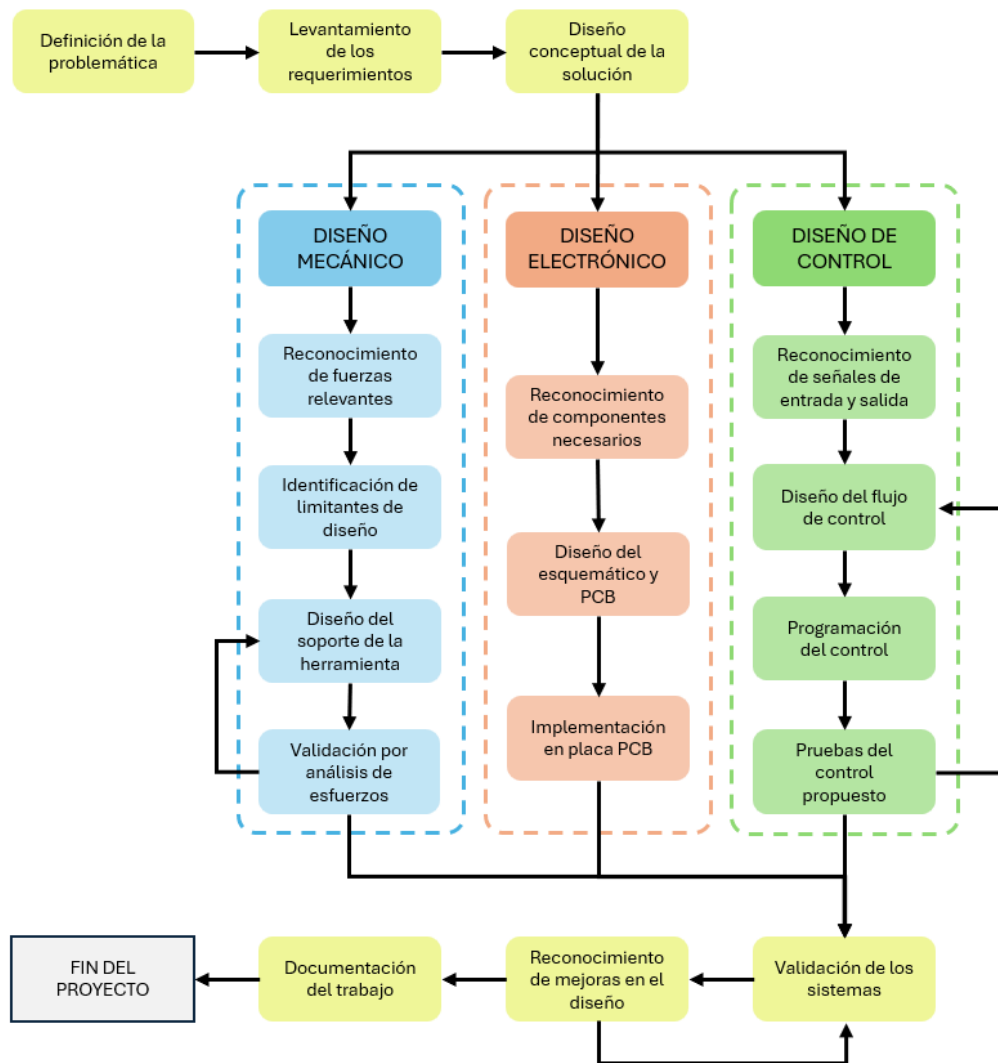
Realizado el análisis de las posibles soluciones usando el método de los criterios ponderados se determinó que la solución A es la más adecuada en base a los criterios escogidos.

## 2.5 Metodología del diseño

La etapa inicial consistió en reunirnos virtualmente con el cliente para conocer a profundidad la problemática que se desea solucionar, la información proporcionada fue usada para definir los requerimientos solicitados y para proponer posibles diseños de la solución tentativa. La etapa de diseño de la alternativa escogida se dividió en tres etapas: mecánica, electrónica, y de control. El detalle de cada una de las actividades realizadas es mostrado en la Figura 2.1. Culminada la etapa de diseño se procedió a evaluar nuestra solución y a aplicar mejoras iterativamente hasta obtener un diseño que cumpla con las expectativas. Una vez obtenida la aprobación del cliente se comenzó a documentar todo el proceso para entregar los reportes y archivos relevantes.

**Figura 2.1**

*Metodología planteada para el diseño de la herramienta*



## 2.6 Diseño conceptual

Se desarrolló el prototipo inicial de la herramienta en base a los requerimientos solicitados por el cliente para cumplir con la tarea de poda de invierno de la vid, asegurando un corte limpio que permita la renovación de los sarmientos para la nueva temporada de producción.

### ***2.6.1 Hojas de corte***

Se utilizaron cuchillas de tijeras existentes en el mercado. El estándar de la industria indica que el material de fabricación de las hojas es el acero japonés SK5, con equivalente AISI 1080 en el mercado estadounidense. Este acero cuenta con una resistencia a la tracción de hasta 1000 MPa y un límite elástico de hasta 800 MPa.

### **Figura 2.2**

*Cuchillas de poda estándar*



### ***2.6.2 Mecanismo de accionamiento***

El mecanismo es idéntico al incorporado en la tijera eléctrica comercial usada como base. Frecuentemente, los fabricantes de tijeras eléctricas se inclinan a utilizar un mecanismo de piñón-cremallera para limitar el rango de movimiento de la cuchilla móvil y, a su vez, tener un mayor control del posicionamiento actual de la cuchilla. Es normal encontrar una etapa de reducción de velocidad entre el motor y el piñón para incrementar el torque de salida. No existe un estándar en cuanto al diseño de las cajas de engranajes por lo que cada fabricante es libre de diseñar su propia solución.

**Figura 2.3***Piñón-cremallera de una tijera eléctrica comercial*

### **2.6.3 Batería**

Para remover la dependencia de una fuente de energía alterna se utiliza una batería reemplazable. Se escoge una batería de 24V con un amperaje de 6000 mAh. Este tipo de baterías se encuentran fácilmente en el mercado por sus aplicaciones directas en electrónica de alta potencia. Es crucial que este componente sea accesible así que deberá ir acompañado de un soporte adicional que se ajuste al sistema de poda.

**Figura 2.4***Representación de batería de 24V para alta carga*

## **2.7 Diseño mecánico**

### **2.7.1 Soporte de la herramienta**

El diseño del soporte se concibió con una arquitectura de dos mitades. Ambas abrazaderas cuentan con tres orejetas y dos orificios para tornillos con diámetro de rosca de

4.5 mm fijados con tuercas. Como material de fabricación se seleccionó ácido poliláctico (PLA) al ser adecuado para prototipos por su bajo costo y buena resistencia mecánica.

### **Figura 2.5**

*Vista isométrica del soporte*



El diseño geométrico del soporte consideró espesores de pared de 16.5 mm. El acople se realiza por brida y el diseño de los agujeros se realizó tomando como referencia las dimensiones provistas por un fabricante de manipuladores. También se incorporó una pequeña apertura de 10 mm de diámetro para salida de cableado en la parte inferior.

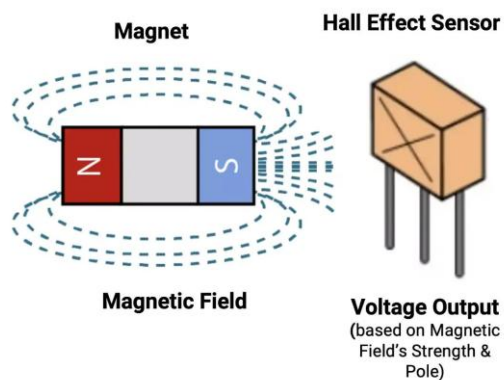
## **2.8 Diseño electrónico**

### ***2.8.1 Motor DC sin escobillas***

Las tijeras de poda inalámbricas modernas son impulsadas por motores de corriente continua sin escobillas (BLDC), los cuales ofrecen mayor torque, mejor eficiencia energética, menor mantenimiento y mayor vida útil en comparación con los diseños tradicionales con escobillas. Estos motores utilizan conmutación electrónica e imanes permanentes para impulsar el rotor, eliminando el desgaste de las escobillas y mejorando el rendimiento general. Al ser un proyecto orientado al trabajo agrícola es importante que el motor no cuente con ranuras ya que los residuos biológicos pueden acumularse dentro del equipo y causar daños que acorten la vida útil de la herramienta.

**Figura 2.6***Motor DC sin escobillas***2.8.2 Placa Hall**

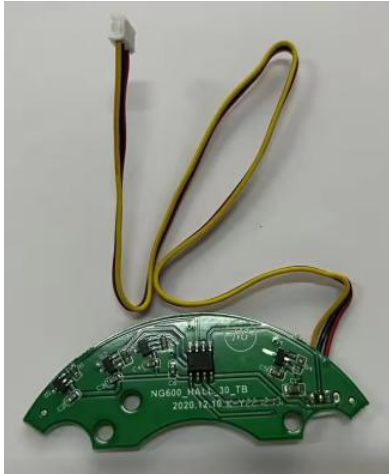
Las placas utilizadas en tijeras de poda eléctricas modernas se basan fundamentalmente en un principio físico conocido como el efecto Hall.

**Figura 2.7***Ilustración del efecto Hall*

Se manifiesta cuando una corriente eléctrica fluye a través de un conductor en presencia de un campo magnético perpendicular, generando una diferencia de potencial transversal proporcional a la intensidad del campo magnético, donde los sensores Hall actúan como interruptores digitales controlados magnéticamente que proporcionan información según el contexto; en este caso, sobre la posición de la cuchilla móvil de la tijera. Para ello se debe colocar un pequeño imán en una posición de referencia para rastrear la posición de la cuchilla en cualquier instante del tiempo.

**Figura 2.8**

*Placa Hall con un arreglo de 4 sensores*

**2.8.3 Placa de control**

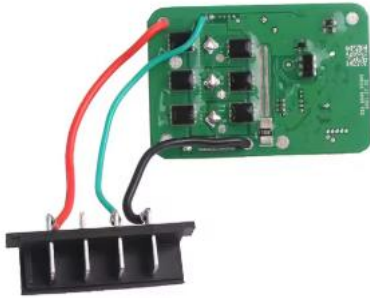
Las tijeras de poda eléctricas comerciales implementan una arquitectura bastante estándar que integra diversos bloques funcionales interconectados para garantizar su operación eficiente y segura. El procesamiento de sensores Hall constituye el primer elemento crítico, donde el controlador recibe tres señales digitales provenientes de los sensores Hall ( $H_a$ ,  $H_b$ ,  $H_c$ ), las cuales son sometidas a un proceso de filtrado de señal destinado a mitigar errores ocasionados por la desalineación de sensores Hall en motores de bajo costo, seguido por comparadores Schmitt-trigger que convierten señales analógicas ruidosas en transiciones limpias de señal digital, y posteriormente por detectores de flanco que capturan el momento exacto de cambio de estado para efectuar la conmutación. La lógica de conmutación consiste en una tabla de búsqueda (Tabla 2.5) que determina cuál es la siguiente fase por energizar basándose en el estado actual de los sensores Hall.

**Tabla 2.5***Tabla de búsqueda para decodificación de estados*

<b>Estado (ABC)</b>	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>
010	+	NC	-
011	+	-	NC
001	NC	-	+
101	-	NC	+
100	-	+	NC
110	NC	+	-

**Nota.** +: conectado a positivo, -: conectado a negativo (tierra), NC: abierto (no conectado)

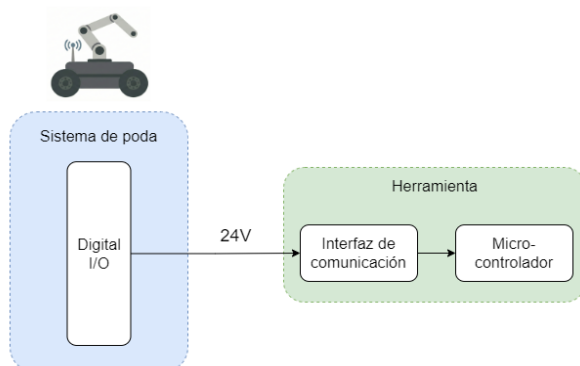
Luego, el control de velocidad mediante modulación por ancho de pulsos (PWM) ajusta el ciclo de trabajo para mantener la velocidad deseada. El circuito comprende tres medios puentes, cada uno compuesto por un transistor MOSFET de canal N en la rama baja conectado a tierra, un transistor MOSFET de canal N en la rama alta conectado a la tensión de alimentación positiva +Vcc, diodos de rueda libre para proteger contra picos de voltaje inductivo, resistencias de amortiguamiento para controlar la derivada temporal de la corriente, y la inserción de tiempo muerto que establece un tiempo de espera entre el apagado de un MOSFET y el encendido del otro en la misma rama para evitar cortocircuitos directos. Finalmente, la protección del sistema incorpora detección de sobre corriente mediante el monitoreo de la caída de voltaje a través de una resistencia de sensado en la rama baja de cada fase, protección térmica que desactiva el controlador si se excede la temperatura máxima, limitación de corriente de pico para proteger los MOSFETs, y detección de pérdida de señal Hall para detener el motor en caso de falla del sensor.

**Figura 2.9***Controlador de tijeras eléctricas de poda*

## 2.9 Diseño del sistema de control

### 2.9.1 Señales de accionamiento

La comunicación se realiza mediante una salida digital del sistema autónomo. La instrumentación eléctrica como la utilizada en programadores lógicos programables establece un voltaje 24VDC para salidas y entradas de este tipo. De ahora en adelante se supondrá que el sistema objetivo cuenta con al menos una salida digital regulada a 24VDC.

**Figura 2.10***Representación gráfica de la comunicación planteada*

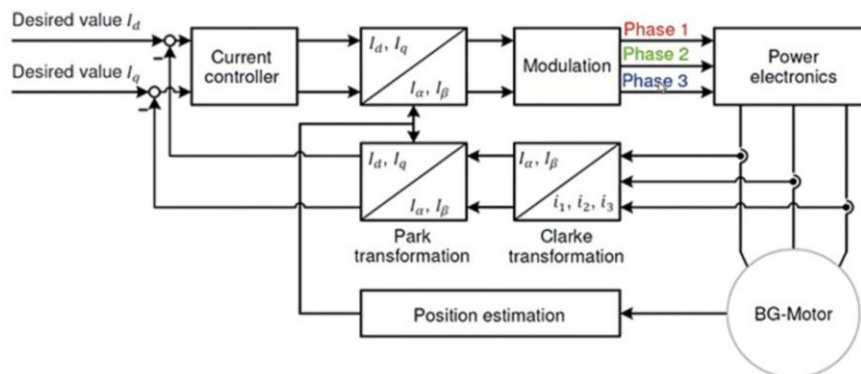
## 2.9.2 Control del motor

Por cuestiones de manejo de fuerzas, se usa un control orientado por campo (FOC).

Esta técnica se caracteriza por permitir un control altamente preciso del par del motor al manipular directamente su torque y flujo magnético.

**Figura 2.11**

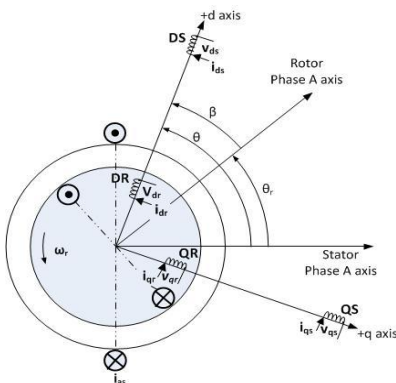
*Diagrama de bloques simplificado del control FOC*



Este algoritmo opera mediante el desacoplamiento de las variables electromagnéticas del motor BLDC, transformando las corrientes trifásicas del estator  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  adquiridas mediante un sensor de corriente y la posición angular del rotor  $\theta_R$  obtenida por medio de sensores de posición, generalmente de tipo Hall. Estas variables son transformadas hacia un sistema de coordenadas rotatorio (d,q) donde el eje d y q están alineados con la componente del flujo magnético del campo y la componente del torque, respectivamente.

**Figura 2.12**

*Representación del sistema de coordenadas (d,q) superpuesto sobre un motor trifásico*



Para un sistema equilibrado en donde se cumpla que  $I_a + I_b + I_c = 0$ , las corrientes  $I_\alpha$  e  $I_\beta$  correspondientes a la transformada de Clarke pueden ser calculadas usando las siguientes ecuaciones:

$$I_\alpha = I_a \quad (2.1)$$

$$I_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_a + 2I_b) \quad (2.2)$$

La transformada de Park utiliza las ecuaciones:

$$I_d = I_\alpha \cos(\theta) + I_\beta \sin(\theta) \quad (2.3)$$

$$I_q = -I_\alpha \sin(\theta) + I_\beta \cos(\theta) \quad (2.4)$$

Nótese la presencia de la variable  $\theta$  al usar la transformada de Park, dando a entender la importancia de contar con la posición angular del rotor para llevar a cabo la transformación. A través de la aplicación secuencial de las transformadas de Clarke y Park, se linealiza el comportamiento del motor al separar la componente generadora de flujo magnético  $I_d$  de la componente generadora de par  $I_q$ . Es importante regular a cero la componente de flujo magnético para maximizar la eficiencia de operación del motor. Esta arquitectura permite gobernar la fuerza de corte mediante la manipulación directa de la corriente en cuadratura  $I_q$ , cuya señal de control resultante es sintetizada en voltajes de fase mediante la técnica de Modulación por Ancho de Pulso de Vector Espacial (SVPWM). La etapa de modulación requiere un cálculo previo de los voltajes adecuados para corregir el error, idealmente por controladores PID que conviertan las corrientes  $I_d$  e  $I_q$  a señales de voltaje en el sistema de coordenadas (d,q). En este punto se aplica la transformada de Park inversa usando las ecuaciones:

$$V_{\alpha} = V_d \cos(\theta) - V_q \sin(\theta) \quad (2.5)$$

$$V_{\beta} = V_d \sin(\theta) + V_q \cos(\theta) \quad (2.6)$$

No es necesario aplicar la transformada de Clarke inversa ya que la técnica SVPWM utiliza los voltajes en el sistema estacionario  $(\alpha, \beta)$  para hacer el cómputo de las señales PWM.

El principio operativo de la técnica SVPWM se fundamenta en la proyección del vector de voltaje de referencia  $U_{ref}$ , derivado de la etapa anterior, sobre el sistema complejo estacionario  $(\alpha, \beta)$  dividido en seis sectores triangulares como se muestra en la Figura #, los cuales están delimitados por los ocho estados discretos de conmutación del inversor trifásico (seis vectores activos no nulos y dos vectores nulos). El algoritmo determina la ubicación angular instantánea del vector de referencia por medio de una combinación lineal ponderada en el tiempo de los dos vectores activos adyacentes al sector ( $U_1$  y  $U_2$ ) y los vectores nulos ( $U_0$  y  $U_7$ ). Las ecuaciones describen cómo calcular los tiempos de permanencia:

$$U_{ref} \cdot T_s = U_1 \cdot T_1 + U_2 \cdot T_2 + U_0 \cdot \frac{T_0}{2} + U_7 \cdot \frac{T_0}{2} \quad (2.7)$$

$$T_1 = \left| \frac{U_{ref}}{U_1} \right| \cdot T_s \quad (2.8)$$

$$T_2 = \left| \frac{U_{ref}}{U_2} \right| \cdot T_s \quad (2.9)$$

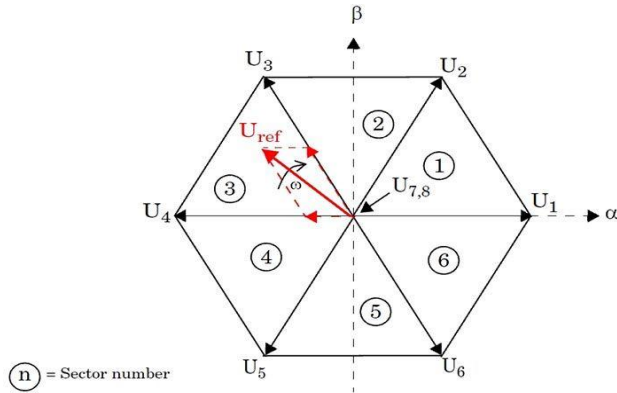
$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (2.10)$$

Se deja en claro que los valores de voltaje vienen dados en su forma compleja. Mediante el cálculo trigonométrico de los tiempos de permanencia  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_0$  para cada estado dentro de un periodo de muestreo fijo  $T_s$ , el sistema genera una secuencia de pulsos

simétrica que asegura que el voltaje promedio aplicado a los devanados del estator reproduzca fielmente el vector de referencia ideal.

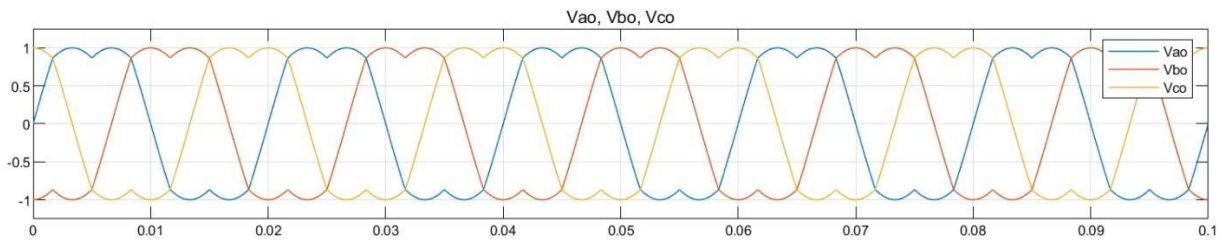
**Figura 2.13**

*Representación de estados de conmutación en forma hexagonal*



**Figura 2.14**

*Señales de voltaje generadas por la técnica SVPWM*



Por último, esta metodología nos asegura que el rango de utilidad del voltaje DC se incrementará en un 15%, favoreciendo el uso eficiente de la fuente de energía.

### 2.9.3 Detección de finales de carrera

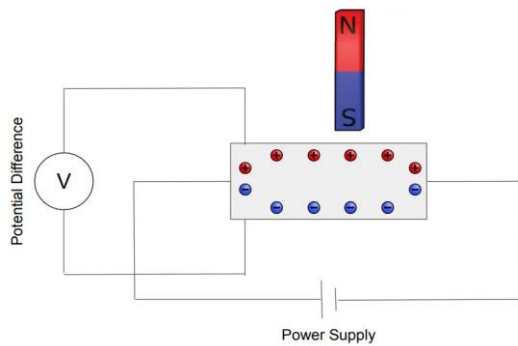
Los sensores Hall producen diferenciales de voltaje en función de la intensidad del campo magnético presente. Es posible describir este proceso por medio de la siguiente ecuación:

$$V_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot d \cdot e} \quad (2.11)$$

donde  $I$  corresponde a la corriente que alimenta al sensor,  $B$  es la intensidad de campo,  $d$  es el espesor del sensor,  $n$  es la densidad de iones/electrones del material y  $e$ , la carga de iones/electrones.

### Figura 2.15

#### *Funcionamiento de un sensor Hall*



El principio de transducción se fundamenta en la Ley de Fuerza de Lorentz, donde el sensor genera tensiones diferenciales Hall proporcionales a las componentes ortogonales del campo magnético. Las placas Hall suelen estar compuestas por un arreglo de varios circuitos integrados de sensores Hall en forma de arco, esto permite medir la intensidad de campo en un espacio bidimensional:

$$V_x = k \cdot B \cdot \cos(\theta) \quad (2.12)$$

$$V_y = k \cdot B \cdot \sin(\theta) \quad (2.13)$$

Ignorando la sensibilidad del sensor  $k$  y la intensidad de campo  $B$  se calcula la posición angular de la cuchilla  $\theta$  con la función atan2:

$$\theta = \text{atan2}(V_y, V_x) \quad (2.14)$$

Este enfoque considera el comportamiento de la función arco tangente para ángulos críticos por lo que es preferida para el cálculo del ángulo exacto.

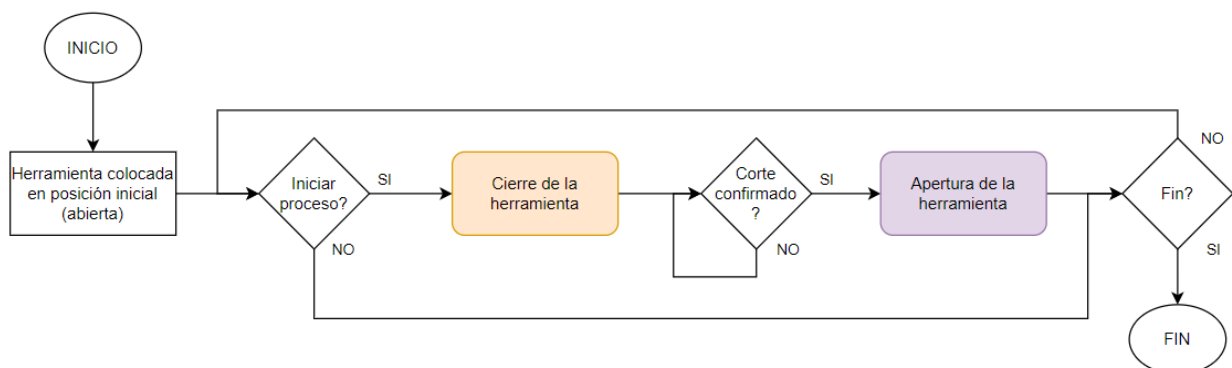
Al procesar las señales usando un comparador con un umbral objetivo de voltaje podemos fácilmente verificar que el mecanismo de las tijeras ha llegado a su posición de apertura o cierre preestablecido y estimar su posición en el arco de movimiento de la cremallera.

### 2.9.4 Flujo de operación

La operación de corte es un proceso que resulta trivial ya que el sistema de accionamiento solo se encarga de iniciar las secuencias de apertura y cierre en función de señales recibidas por el controlador del sistema autónomo. Como paso iniciar la herramienta se traslada a su posición inicial para establecer la posición cero. Puede considerarse un primer paso engorroso, pero es una alternativa que funciona y no introduce complejidad innecesaria. Una vez establecida la posición cero, la herramienta espera una señal para comenzar el proceso de corte. Iniciado el corte determinará si se ha realizado de manera exitosa ya sea por sensado de corriente o por una señal del sistema autónomo, momento en el cual se procederá a abrir las cuchillas para esperar una nueva orden de corte.

**Figura 2.16**

*Flujo simplificado del proceso de corte*

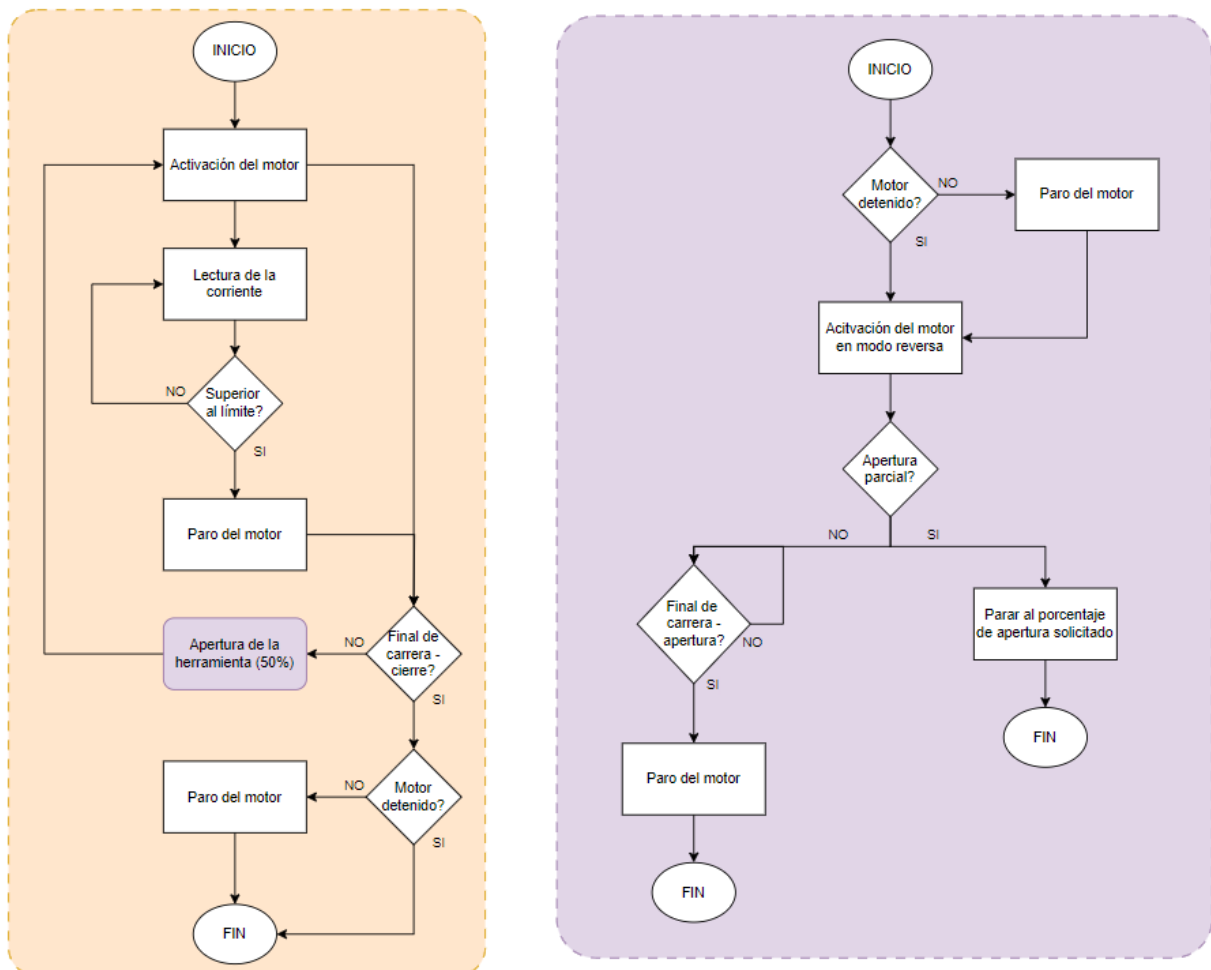


Es necesario explicar los sub-procesos de apertura y cierre por separado ya que tienen sus consideraciones propias. El sub-proceso de cierre comienza a sensar la corriente una vez que el motor ha sido activado y la compara en cada ciclo con un umbral preestablecido. En

caso de sobre corriente el programa para el motor y verifica si se ha llegado a un final de carrera. De no evidenciarse un cierre completo inmediatamente consideramos un caso de atasco por lo cual procedemos a abrir las cuchillas en un 50% antes de volver a intentar cerrar la herramienta. Cuando el cierre completo ha sido verificado se asegura la inactividad del motor antes de terminar con el sub-proceso.

**Figura 2.17**

*Flujo de sub-procesos de apertura y cierre de las cuchillas*



Generalmente, el sub-proceso de apertura será llamado después de un intento de cierre de las cuchillas por lo que es necesario asegurarnos que el motor se encuentra detenido antes de comenzar el giro en el sentido inverso. Al no incidir directamente en el corte de

sarmientos el foco recae en trasladar la cuchilla a la posición objetivo de apertura, ya sea una apertura completa o un porcentaje.

## **2.10 Consideraciones éticas y legales**

La naturaleza académica del proyecto nos exime de cumplir con las regulaciones europeas en cuanto a requisitos de seguridad y salud que debe cumplir toda maquinaria robótica comercial orientada a labores de poda y mantenimiento agrícola. En cuanto al uso de tijeras comerciales, aclaramos que la herramienta desarrollada es de uso no comercial y personal, por lo cual no se busca infringir derechos de propiedad intelectual.

Por otro lado, la propuesta de este trabajo afecta directamente a la fuerza laboral vitivinicultura española, pues una eventual adopción masiva de la solución reducirá la dependencia de mano de obra humana en labores de poda de invierno de la vid. Los administradores o dueños de los campos de cultivo serán entonces responsables de llevar a cabo un reentrenamiento de los colaboradores para la ocupación de nuevos roles emergentes en el sector.

## **Capítulo 3**

### 3.1 Resultados y análisis

Este capítulo presenta los resultados obtenidos durante el desarrollo y validación del sistema propuesto, integrando la evaluación mecánica del soporte estructural y la evaluación electrónica asociada al hardware de control, sensado e interfaz con el sistema robótico. Los hallazgos se organizan con el objetivo de demostrar, con evidencia cuantitativa, que el diseño cumple condiciones de operación bajo escenarios de carga y funcionamiento representativos.

Con el fin de favorecer una interpretación clara y reproducible, los resultados se reportan mediante tablas y gráficos que enfatizan los valores más significativos (máximos, mínimos y tendencias relevantes). Además, se emplea una estrategia conservadora de análisis al considerar condiciones extremas (peor caso) y un factor dinámico para contemplar aceleraciones y perturbaciones durante el uso real. Esta decisión incrementa el margen de seguridad del análisis y permite justificar la robustez del diseño frente a incertidumbres de operación.

En un proyecto con componentes inter/multidisciplinarios, se presentan resultados a nivel global del sistema y, de manera específica, aquellos directamente vinculados al aporte de la carrera: (i) la validación estructural del soporte mediante análisis por elementos finitos y (ii) la verificación funcional del subsistema electrónico y del procesamiento de señales para su integración con el control del sistema.

## 3.2 Análisis mecánico

El análisis mecánico se concentró en verificar el comportamiento estructural del soporte responsable de fijar y posicionar la herramienta dentro del sistema. En términos físicos, el problema puede leerse como una transferencia de cargas desde un conjunto relativamente masivo (herramienta y acople) hacia una estructura portante. Así que se estudiará el comportamiento mecánico del soporte bajo condiciones de carga estáticas y dinámicas.

Se adoptó la representación de la carga por peso en el centro de masa como momento situado en la cara que se montará a la brida del sistema autónomo. Ese momento se implementó de manera práctica mediante pares de fuerzas iguales y opuestas, separadas una distancia conocida. Con este enfoque se evaluaron tres escenarios independientes asociados a los ejes coordenados (X, Y, Z), cada uno con su distancia de separación correspondiente.

La condición más exigente se estableció mediante la inclusión de un factor dinámico igual a 3, aplicado sobre la carga base. Este factor representa una ampliación conservadora de las solicitaciones para aproximar efectos transitorios que, aunque no necesariamente permanentes, pueden dominar el diseño en sistemas que interactúan con el entorno y presentan aceleraciones o vibraciones durante la operación.

### *3.2.1 Análisis de elementos finitos*

Con el fin de verificar la integridad estructural del soporte que aloja la herramienta de corte, se desarrolló un análisis por elementos finitos (FEA) sobre el modelo tridimensional. El objetivo fue caracterizar la distribución de esfuerzos y deformaciones bajo condiciones conservadoras, priorizando una representación reproducible del fenómeno de flexión que experimenta el conjunto durante la operación. Debido a que en la práctica resulta complejo ubicar con precisión el centro de masa de una herramienta comercial y replicar su carga

distribuida real, la sollicitación se modeló mediante un enfoque equivalente: se aplicó un momento sobre la zona de montaje, implementado como pares de fuerzas iguales y opuestas separados por una distancia conocida. Este método permite generar un momento controlado, independiente de detalles geométricos secundarios, y facilita comparar escenarios al variar únicamente la dirección del eje de carga y la separación entre fuerzas.

Las restricciones se definieron en las zonas correspondientes a la brida y los pernos de fijación, representando el anclaje del soporte a la estructura portante. Se utilizó un mallado localizado de 0.025 pulg., con refinamiento en las regiones donde se anticipa mayor gradiente de esfuerzos por cambios de sección y cercanía a la restricción. Como criterio adicional de seguridad, el análisis se planteó bajo un enfoque extremista, incorporando un factor dinámico de 3 sobre la carga base, con el propósito de aproximar efectos transitorios como vibración, aceleraciones y perturbaciones durante la interacción mecánica. El material considerado para el soporte fue PLA, y la interpretación de resultados se realizó en función de su resistencia mecánica nominal reportada, complementada con criterios prácticos asociados al proceso de fabricación por impresión 3D.

El estudio se ejecutó en tres escenarios independientes, asociados a sollicitaciones equivalentes alrededor de los ejes X, Y y Z, utilizando separaciones representativas de 88 mm, 62 mm y 50 mm, respectivamente. Para cada caso se evaluaron cuatro magnitudes: (i) esfuerzo equivalente de Von Mises, como indicador global de sollicitación multiaxial; (ii) primer esfuerzo principal, para identificar zonas dominadas por tracción; (iii) tercer esfuerzo principal, para caracterizar regiones dominadas por compresión; y (iv) desplazamiento total, para cuantificar la rigidez global del soporte. Adicionalmente, se emplearon probetas (probe labels) en puntos representativos para obtener lecturas puntuales comparables en las regiones críticas.

El sistema analizado corresponde a un soporte estructural que sostiene una herramienta de masa aproximada de 1 kg en configuración de voladizo. En condiciones estáticas, el efecto gravitacional ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ) genera una fuerza de peso:

$$W = mg \quad (3.1)$$

$$W = (1 \text{ kg}) \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 9.81 \text{ N}$$

En estructuras en voladizo, la magnitud del momento flector en la sección empotrada domina el estado tensional, siendo:

$$M = WL \quad (3.2)$$

Debido a la falta de información exacta del centro de masa de la herramienta, se adopta una hipótesis conservadora: considerar que toda la carga equivalente actúa en la punta del sistema. En este caso, el brazo total se toma como la suma del “saliente” de la herramienta y la longitud efectiva desde el empotramiento hasta el punto de acople. Considerando que la longitud de la herramienta es de 300 mm y una longitud de soporte de 65 mm, la longitud efectiva es:

$$L = L_{herr} + L_{soporte} \quad (3.3)$$

$$L = (65 + 300) \text{ mm} = 365 \text{ mm}$$

El momento estático en el empotramiento resulta:

$$M = (9.81 \text{ N})(0.365 \text{ m}) = 3.58 \text{ N.m}$$

Tomando un factor de seguridad  $N = 3$ :

$$M_{3g} = 3(3.58) = 10.74 \text{ N}$$

Se consideran tres separaciones geométricas disponibles para aplicar pares en los ejes principales del soporte (distancias medidas entre caras/puntos extremos donde se aplican fuerzas opuestas):

- En X:  $d_x = 88 \text{ mm} = 0.088 \text{ m}$
- En Y:  $d_y = 62 \text{ mm} = 0.062 \text{ m}$
- En Z:  $d_z = 50 \text{ mm} = 0.050 \text{ m}$

Usando el peor caso dinámico  $M_{3g} = 1074$  las fuerzas equivalentes por eje son:

- $F_x = 0.088 = 122.0 \text{ N}$
- $F_y = \frac{10.74}{0.062} = 173.2 \text{ N}$
- $F_z = \frac{10.74}{0.050} = 214.8 \text{ N}$

Para el análisis se usará el esfuerzo cortante máximo en los tres ejes coordenados, considerando el primer y tercer esfuerzo principal en cada caso. El esfuerzo cortante máximo se calcula usando la ecuación 3.4.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (3.4)$$

Los esfuerzos cortantes obtenidos por eje son:

- $\tau_{max_y} = 13.73 \text{ MPa}$
- $\tau_{max_x} = 8.34 \text{ MPa}$
- $\tau_{max_z} = 67.56 \text{ MPa}$

Se concluye análisis por elementos finitos del componente modelado, definiendo las condiciones de contorno (restricciones en las zonas de sujeción) y aplicando las cargas correspondientes al caso de operación evaluado, con posterior discretización mediante una malla tetraédrica (orden de  $10^6$  nodos y  $\sim 6,8 \times 10^5$  elementos, según el solver). Como

resultados principales se obtuvieron campos de esfuerzo equivalente de Von Mises y esfuerzos principales, identificándose concentraciones en la zona de transición geométrica cercana a la brida y la unión con el cuerpo del soporte. El esfuerzo de Von Mises máximo alcanzó 64,52 MPa, mientras que los esfuerzos principales extremos fueron  $\sigma_{1,max} = 67,21$  MPa (tracción) y  $\sigma_{3,min} = -67,91$  MPa (compresión), lo que evidencia un estado multiaxial dominado por flexión y efectos locales de concentración. Adicionalmente, se estimó la tensión cortante máxima conforme al criterio de Tresca, obteniéndose  $\tau_{max} \approx 67.56$ MPa; este valor es consistente en magnitud con el Von Mises reportado, y confirma que el caso analizado es significativamente más severo que escenarios previos. A partir de los resultados se determinó que el diseño no es viable ya que sobrepasa el límite de rotura del material, para PLA es de 45,6 MPa [36]. Por esta razón se rediseñó el soporte desde cero.

### Figura 3.1

*Diseño final del soporte*



El análisis de momentos considera el peso de la herramienta y fuerzas ejercidas en el TCP de la herramienta. Como punto de referencia se usó el límite máximo de momento permitido en la brida de un manipulador ABB IRB 2600. El diagrama de cuerpo libre de la herramienta puede ser consultado en el Apéndice G. El momento  $M_x$  es producto del peso propio y está ubicado en el centro de gravedad, con valor de 0.5719 N.m. El momento  $M_y$  resulta de cualquier fuerza aplicada en el TCP en el mismo plano, la brida del manipulador de referencia soporta momentos de hasta 10 N.m [37] así que la máxima fuerza permitida en el TCP es de 45 N. Los cálculos se realizaron usando la ecuación de momento (3.5)

$$M = F \cdot d \quad (3.5)$$

El tiempo para cortar exitosamente un sarmiento de vid se calculó por medio de un análisis dinámico y usando el principio de trabajo-energía. Para ello fue importante conocer de antemano una propiedad mecánica de la vid, la energía específica de corte. Esta relaciona el área transversal del sarmiento y la energía para cortarlo como se muestra en la ecuación 3.5:

$$W_{sc} = \frac{W_c}{A} \quad (3.6)$$

donde  $W_{sc}$  es la energía específica de corte,  $W_c$  es la energía de corte, y  $A$  es el área transversal del sarmiento. Según la literatura, la energía específica máxima para cortar una vid es de  $0.0256 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$  [20]. Con este valor podemos estimar la energía para cortar sarmientos de cualquier diámetro.

$$\Delta W = W_{motor} - W_c - W_{fc} \quad (3.7)$$

La ecuación 3.6 modela la energía del sistema. Sabemos que durante la operación de corte existirán pérdidas por fricción entre cuchillas, dientes de los engranajes y en el motor, éstas dos últimas son consideradas en la eficiencia del sistema mecánico. Las pérdidas por fricción en las cuchillas  $W_{fc}$  se producen por una fuerza de reacción normal por la presión que se ejerce al unir la cuchilla móvil a la cuchilla estática. Para cuantificar las pérdidas se utiliza el coeficiente de fricción cinética entre metales limpios:  $\mu_k = 0.42$  [35]. También es necesario calcular la distancia recorrida por la cuchilla y la fuerza normal ejercida sobre ella. Por limitaciones de la instrumentación disponible y al ser generalmente pequeñas se obviaron las pérdidas por fricción de cuchillas en los cálculos, pero es importante reconocer que inciden directamente en los resultados.

La ecuación 3.7 describe la energía mecánica del motor. Se considera  $\tau_{nom}$  como el torque nominal,  $\omega_{nom}$  como la velocidad nominal y  $t_{op}$  como el tiempo de operación.

$$W_{motor} = \tau_{nom} \cdot \omega_{nom} \cdot t_{op} \quad (3.8)$$

Para cuantificar el cambio de energía se debe considerar la inercia de los elementos móviles dentro del sistema. Al contar con etapas de reducción entre el eje del motor y la cuchilla móvil es necesario reflejar la inercia del sistema a un punto de referencia, en este caso se escoge al eje del motor, como se muestra en la ecuación 3.8 donde  $J$  representa la inercia del elemento e  $i$  el valor de reducción.

$$J_{eq} = J_{motor} + \frac{J_{reductora} + J_{piñón} + J_{sector} + J_{cuchilla}}{i^2} \quad (3.9)$$

Entonces  $\Delta W$  es igual a:

$$\Delta W = \frac{1}{2} J_{eq} \cdot (\omega_f - \omega_i)^2 \quad (3.10)$$

Con  $W_{fc} = 0$  y reemplazando 3.5, 3.7 y 3.9 en 3.6 queda:

$$\frac{1}{2} J_{eq} \cdot (\omega_f - \omega_i)^2 = \tau_{nom} \cdot \omega_{nom} \cdot t_{op} - W_{sc} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.11)$$

La ecuación 3.10 describe el sistema dinámico durante el momento de corte para un sarmiento de diámetro  $d$ . Se determinó experimentalmente que la inercia del sistema es de  $9.714 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$ . Considerando un caso de corte exitoso donde la cuchilla cierra por completo y sin producirse un atasco podemos calcular el tiempo de operación del motor, el cual sería equivalente al tiempo de corte. Con el motor trabajando a un torque nominal de 60 mN.m a 10000 rpm y con una velocidad sin carga de 21000 rpm (Tabla 3.1), el tiempo de operación es:

$$t_{op} = \frac{\frac{1}{2} J_{eq} \cdot (\omega_f - \omega_i)^2 - W_{sc} \cdot \frac{\pi d^2}{4}}{\tau_{nom} \cdot \omega_{nom}} \quad (3.12)$$

$$t_{op} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 9.714 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2 \cdot \left(-21000 \frac{2\pi}{60} \text{ rad/s}\right)^2 - 0.0256 \cdot \frac{\pi(12)^2}{4} \text{ J}}{0.06 \text{ N.m} \cdot 21000 \frac{2\pi}{60} \text{ rad/s}}$$

$$t_{op} = 0.4198 \text{ s}$$

### 3.3 Análisis electrónico

Para el diseño de la placa electrónica se prefirió usar componentes con tecnología de agujeros pasantes (THT). Trabajar con elementos THT nos permitió realizar las tareas de soldadura rápidamente al no depender de equipos o herramientas especializadas. Además, estos componentes son manejables sin necesidad de pinzas a diferencia de los componentes con tecnología de montaje superficial (SMD). Esta decisión técnica trajo consigo ciertas limitaciones. El tamaño de los componentes THT limitó la cantidad de elementos en la placa y nos forzó a considerar medidas de los componentes de mayor tamaño para el diseño de la cavidad correspondiente dentro de la herramienta. Una alternativa perfectamente viable era utilizar los servicios de manufactura de placas con tecnología SMD en países extranjeros, de esta forma se elimina la necesidad de dedicar tiempo para comprar y soldar cada componente por separado. Por otra parte, las principales desventajas de esta opción serían los períodos de envío variables y la poca flexibilidad para realizar modificaciones en caso de fallos graves durante el funcionamiento del circuito en el entorno de trabajo esperado. Por esta razón, fabricar una placa localmente con componentes disponibles en el mercado significó una vía práctica dentro del marco de esta investigación para iterar rápidamente de ser necesario.

#### *3.3.1 Selección de componentes*

Para alimentar el motor y los microcontroladores es necesario regular el voltaje de alimentación. El módulo LM2596 nos permite regular un voltaje de entrada de entre 4V - 40V a un voltaje de salida entre 1V - 37V, soportando una corriente de hasta 3A. Estos rangos se ajustan a nuestros requerimientos.

**Figura 3.2***Reductor de voltaje DC Step Down LM2596*

La demanda de corriente de la herramienta sobrepasa el consumo de los demás componentes debido a la corriente que requiere el motor para arrancar y realizar el corte. Un módulo LM2596 no es capaz de soportar los ciclos de corriente cambiante por lo que se usó el módulo XL4016. Este módulo, en cambio, regula el voltaje de salida entre 0.2-37V para una entrada de voltaje de hasta 40V y maneja perfectamente corrientes menores a 10 A. Las características de este módulo lo convierten en una excelente opción para suministrar la energía a la herramienta.

**Figura 3.3***Módulo regulador de voltaje XL4016*

La señal de control sobrepasa los voltajes que puede manejar un Arduino Nano. Como medida de protección se hace uso de un optoacoplador para crear una etapa de aislamiento por delante de los pines de entrada de la placa de desarrollo. De esta forma nos aseguramos de que los controladores de nuestra herramienta no sean expuestos a altos voltajes.

**Figura 3.4***Optoacoplador PC817 de 4 pines*



El actuador utilizado es un motor BLDC, para protección contra residuos vegetales se seleccionó un modelo sin ranuras. Los parámetros del actuador usado se muestran en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1**

*Parámetros del motor BLDC utilizado*

Parámetro	Valor
Voltaje nominal	16.8 V
Corriente nominal*	~0.2 A
Corriente de arranque*	~1 A
Corriente sin carga*	~0.05 A
Torque nominal <sup>†</sup>	60 mN.m
Torque de arranque <sup>†</sup>	550 mN.m
Velocidad sin carga	~21000 rpm
Velocidad nominal <sup>†</sup>	10000 rpm
Eficiencia <sup>†</sup>	76%
Constante de velocidad	1250 rpm/V

**Nota.** \*Los parámetros fueron obtenidos experimentalmente. <sup>†</sup>Los parámetros fueron tomados de un motor con características similares.

Para verificar que el motor está dentro del rango de operación nos aseguramos de que el torque para cortar una rama sea menor al torque de arranque. Del software CAD estimamos que el brazo desde el pivote de la cuchilla hasta el punto de corte es de 34.4 mm, se considera una fuerza máxima de corte de 1200 N y una caja reductora con reducción  $i = 264$ :

$$\tau_{corte} = \frac{F_{corte} \cdot r}{i \cdot \eta} \quad (3.13)$$

$$\tau_{corte} = \frac{1200 \text{ N} \cdot 34.4 \times 10^{-3} \text{ m}}{264 \cdot 0.76} = 0.21 \text{ N.m}$$

$$\tau_{corte} < 0.55 \text{ N.m}$$

A partir de este resultado nos aseguramos de que estamos dentro del margen permitido. Para calcular la corriente máxima que llega a consumir el motor al cortar un sarmiento consideramos la constante de torque del motor. Si usamos la relación con la constante de velocidad tenemos que:

$$K_t = \frac{60}{2\pi \cdot K_v(RPM)} \quad (3.14)$$

$$K_t = \frac{60}{2\pi \cdot 1250 \text{ rpm/V}} = 0.007639 \text{ N.m/A}$$

De esta forma podemos saber la corriente consumida durante el corte de un sarmiento de 12mm:

$$I_{corte} = \frac{\tau_{corte}}{K_t \cdot i} \quad (3.15)$$

$$I_{corte} = \frac{0.21 \text{ N.m}}{0.007639 \text{ N.m/A} \cdot 264} = 0.104 \text{ A}$$

Para calcular el consumo usamos la cantidad de tiempo necesaria para completar un ciclo de corte. La relación entre velocidad y desplazamiento angular nos permite determinar los tiempos para calcular el consumo del motor. La ecuación 3.15 considera la reducción de velocidad  $i$ .

$$t = \frac{i \cdot \Delta\theta}{\omega} \quad (3.16)$$

La máxima apertura de las cuchillas fue de  $50^\circ$  y la apertura antes de llegar a una rama de aproximadamente 12mm fue de  $35.5^\circ$ . A partir de las velocidades mostradas en la Tabla

3.1 se estiman tres tiempos:

- Apertura o cierre de cuchillas

$$t_{sc} = \frac{264 \cdot (50 - 0) \frac{\pi}{180} \text{ rad}}{21000 \frac{2\pi}{60} \text{ rad. s}^{-1}} = 0.104 \text{ s}$$

- Desplazamiento hasta periferia del sarmiento (12mm)

$$t_{ps} = \frac{264 \cdot (50 - 35.5) \frac{\pi}{180} \text{ rad}}{21000 \frac{2\pi}{60} \text{ rad. s}^{-1}} = 0.030 \text{ s}$$

- Tiempo de corte (tomando el tiempo de operación)

$$t_c = t_{op} - t_{ps} = 0.42 \text{ s} - 0.03 \text{ s} = 0.39 \text{ s}$$

Entonces, el tiempo de ciclo para el corte de sarmientos de 12mm es:

$$t_{ciclo} = t_{op} + t_{sc} \tag{3.17}$$

$$t_{ciclo} = 0.4198 \text{ s} + 0.1040 \text{ s} + 2 \cdot 0.0100 \text{ s}$$

$$t_{ciclo} = 0.5238 \text{ s}$$

La corriente de arranque del motor viene dada por la constante de tiempo eléctrica. En motores BLDC esta constante indica el tiempo que le toma al motor alcanzar el 63% de su corriente máxima,

$$\tau_e = \frac{L}{R} \tag{3.18}$$

donde  $L$  es la inductancia del motor y  $R$  la resistencia del bobinado. Usualmente se expresa en milisegundos y es un tiempo extremadamente rápido. Para los cálculos se asumirá que  $\tau_e = 2$  ms. Así podemos modelar el consumo de la corriente de arranque como:

$$C_{arranque} = \int_0^{5\tau_e} (I_{arranque} - I_{sc})e^{-\frac{t}{\tau_e}} + I_{sc} dt \quad (3.19)$$

$$C_{arranque} = 3.58 \text{ A} \cdot \text{ms} \approx 0.99 \times 10^{-3} \text{ mAh}$$

El consumo en arranque corresponde al área bajo la curva de la corriente a través del tiempo del motor BLDC cuando opera sin carga por un tiempo  $t$ . La función garantiza que tras una constante de tiempo la corriente de arranque se ha reducido en al menos el 37%. Y se considera que el motor ha alcanzado su estado estable tras 5 constantes de tiempo. Para  $I_{arranque} = 1 \text{ A}$  e  $I_{sc} = 0.2 \text{ A}$ , resolviendo la integral en la ecuación 3.18 nos da un consumo de 0.99 mAh.

El consumo del motor se calculó a partir del uso de la corriente en función de la distribución del tiempo respecto al tiempo de ciclo, como se muestra en la ecuación 3.16.

$$Consumo = I_{corte} \cdot \frac{t_c}{t_{ciclo}} + I_{sc} \cdot \frac{t_{ps} + t_{sc}}{t_{ciclo}} + 2 \cdot C_{arranque} \quad (3.20)$$

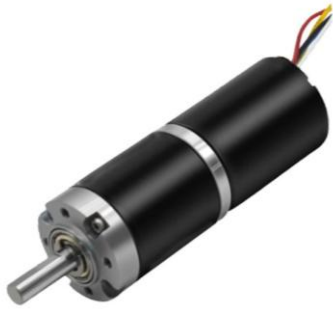
$$Consumo = 0.104 \text{ A} \cdot \frac{0.39}{0.5238} \text{ s} + 0.05 \text{ A} \cdot \frac{0.030 + 0.104}{0.5238} \text{ s} + 2 \cdot 0.00358 \text{ A} \cdot \text{s}$$

$$Consumo (\text{mAh}) = 97.38 \text{ mA} \cdot \text{s} \approx 27 \mu\text{Ah/corte}$$

Como el motor tiene que activarse 2 veces durante un ciclo de corte se duplica el consumo por arranque. De esta forma se estimó un consumo de 97.38 mA por corte sin atasco.

### Figura 3.5

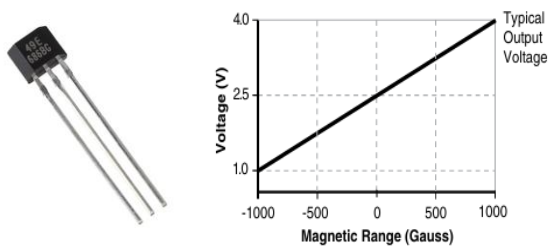
*Motor BLDC sin ranuras con caja reductora*



En cuanto a la placa Hall, los sensores Hall presentes en el circuito electrónico son del tipo lineal. Estos sensores operan dentro de un rango de voltaje entre 1V - 4V con consumo máximo de 6mA usando una alimentación de 5V. Son capaces de trabajar en un rango de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$  y responden a intensidades de campo de  $\pm 1000$  Gauss ( $\pm 100$  mT). Es importante aclarar que el imán requerido para este tipo de sensores es de tipo diametral. En el presente proyecto se usa un imán con diámetro de 4mm y una densidad de flujo magnético de 70 mT.

### Figura 3.6

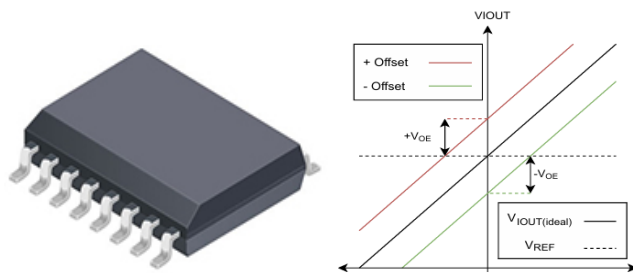
*Sensor Hall analógico SS49E y su curva de voltaje*



El sensor de corriente es fundamental para poder determinar un atasco o un consumo inesperado de corriente por parte del motor. Por lo tanto, se decidió usar el sensor ACS37002 que soporta amperajes superiores a los 30A. El rango de voltaje de salida de este componente es de 0.5V - 4.5V para una alimentación de 5V y con sensibilidad configurable de hasta 9.9 mV/A en algunos modelos. Por la alta sensibilidad del sensor se debe considerar un offset de voltaje, este comportamiento se refleja en la gráfica de la Figura 3.7.

**Figura 3.7**

*Sensor de corriente ACS37002 y su curva de voltaje*

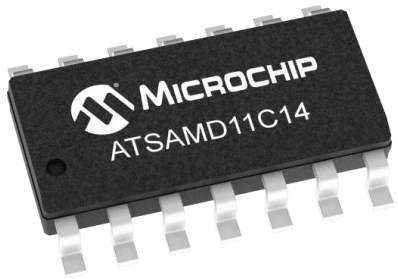


### 3.3.2 Microcontroladores

La placa controladora usa un microcontrolador SAMD11C por su diseño compacto y rápida capacidad de procesamiento, esta última siendo una característica crítica ya que habilita la ejecución del control orientado por campo. El microprocesador cuenta con las siguientes características:

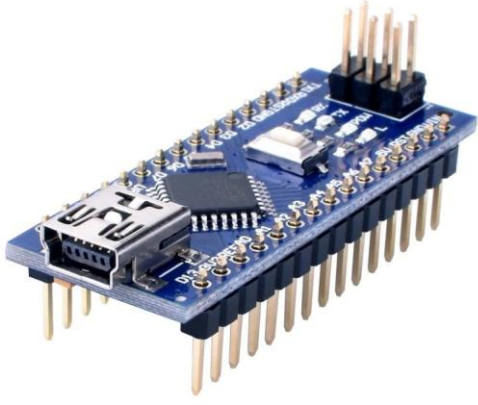
**Tabla 3.2**

*Características del microcontrolador SAMD11C*

<b>SAMD11C</b>	
	<p>Procesador: ARM Cortex de 32 bits de bajo consumo @ 48 MHz</p> <p>Memoria: 16 KB Flash 4 KB SRAM</p> <p>Comunicación: 3x UART Interfaz USB</p> <p>I/O: Hasta 12 GPIO programables</p> <p>Alimentación: 1.62V-3.63V</p>

El segundo componente utilizado para el control fue una placa de desarrollo Arduino Nano con las siguientes características:

**Tabla 3.3***Características de la placa Arduino Nano*

<i>Arduino Nano</i>	
	Microprocesador: Atmega 328 de 8 bits @ 16MHz
	Memoria: 30 KB Flash 2 KB SRAM 1 KB EERPOM
	Comunicación: UART Micro-USB
	I/O: 20 pines digitales 8 pines analógicos 6 canales PWM
	Alimentación: 5V-3.3V

La versatilidad y mayor cantidad de pines GPIO del Arduino Nano permitió utilizarlo como un adaptador, de tal forma que es capaz de recibir instrucciones del sistema autónomo por medio de señales digitales para procesarlas y transmitir las a la placa de control. El consumo total del sistema electrónico se detalla en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4***Consumo general de la herramienta*

Componente	Consumo (mA)
Motor BLDC	97.38
Controlador + sensor hall*	12
Arduino Nano []	30
<b>TOTAL</b>	<b>139.38</b>

*Nota.* \*Consumo medido experimentalmente

### **3.4 Análisis de sistema de control**

El diseño del control para el motor BLDC se basa en la teoría del control orientado por campo. Procesamos la señal proveniente del motor y la señal del sensor de posición con el Arduino Nano antes de enviarlas a la placa de control, donde estas señales serán utilizadas en el algoritmo de control FOC. La modulación se realiza con la técnica de espacios vectoriales para producir las señales de voltaje PWM suministradas por las fases U, V y W del motor.

#### ***3.4.1 Programación***

El código desarrollado para el Arduino Nano implementa una interfaz intermedia robusta entre un sistema robótico y la placa de control de una tijera eléctrica, mediante la emulación digital de sensores Hall a través de salidas configuradas en modo open-drain. Su arquitectura se fundamenta en una separación clara entre la entrada de orden proveniente del sistema de control y las señales de actuación hacia la placa comercial, garantizando aislamiento lógico y seguridad eléctrica. La decisión de emplear salidas en configuración open-drain responde a la necesidad de evitar conflictos eléctricos con la electrónica original de la placa, permitiendo que esta conserve sus propios niveles de referencia, mientras que el microcontrolador únicamente fuerza el estado bajo cuando se requiere simular la activación del sensor. De este modo, se minimiza el riesgo de inyección de tensiones indebidas, se previenen cortocircuitos por conducción simultánea y se asegura la compatibilidad entre dispositivos de distinta naturaleza eléctrica. La generación de trenes de pulsos temporizados sobre las líneas A0 y A1 permite reproducir de forma realista el comportamiento de sensores Hall industriales, con parámetros ajustables que facilitan su calibración según los requerimientos del sistema. Asimismo, el algoritmo incorpora mecanismos de anti-rebote y temporización de enfriamiento, lo que previene activaciones repetitivas ante señales

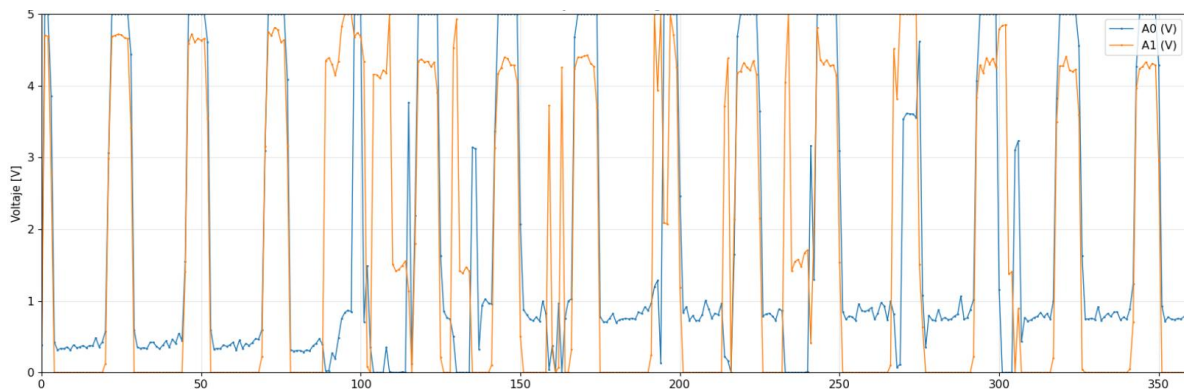
sostenidas o ruidosas. La secuencia funcional de cierre y apertura se ejecuta de manera determinista y repetible, asegurando la confiabilidad del proceso, mientras que la liberación permanente de las líneas en estado seguro reduce el riesgo de interferencias eléctricas con la placa controlada.

### 3.4.2 Señales de control

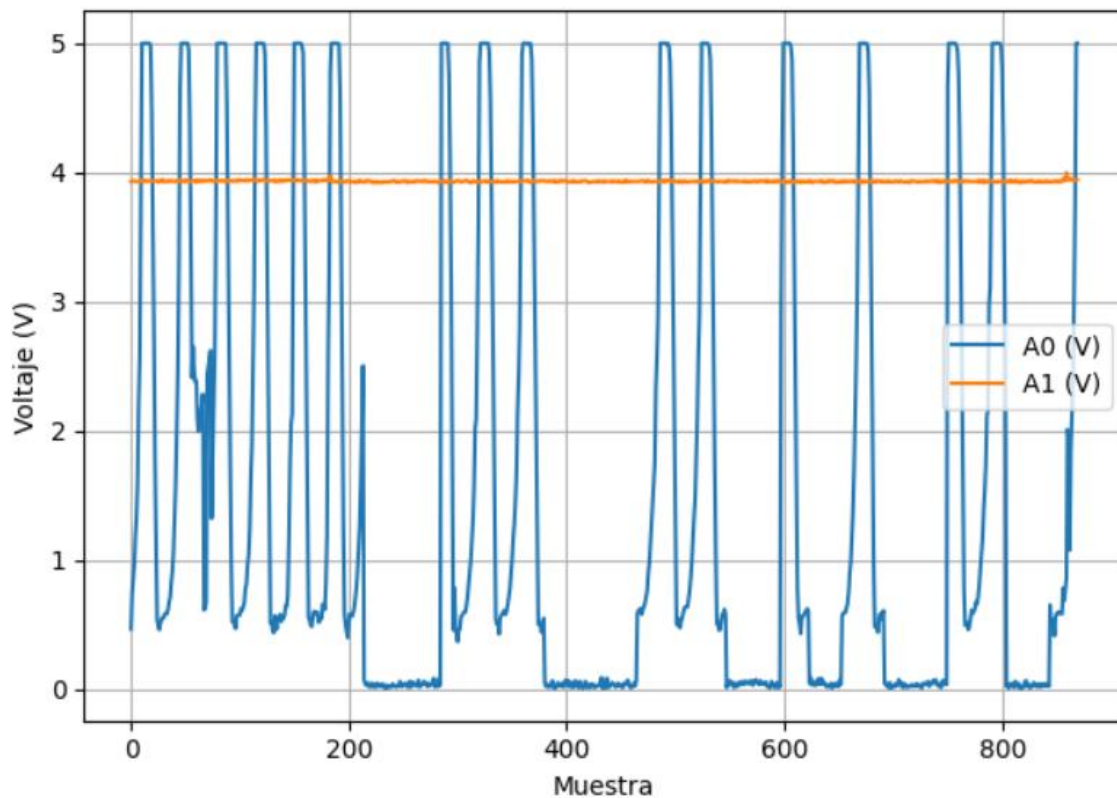
Para la obtención de los datos crudos de las mediciones de señal se usó un osciloscopio. Estos datos fueron procesados y graficados posteriormente usando Python. Las formas de onda observadas reflejan una secuencia de pulsos digitales claramente definidos, caracterizados por una activación periódica de nivel bajo seguida de intervalos de reposo.

**Figura 3.8**

*Señal de salida de la placa Hall*



Se aprecia un poco de ruido en la señal cruda, siendo más notorio en los estados LOW. Asimismo, podemos confirmar que el voltaje de operación del sensor de posición trabaja en un rango de 0.5V a 4.5V. Para generar la onda cuadrada se usó un proceso de cuantización tomando niveles estables como referencia y se promediaron para obtener una señal limpia como se muestra en la Figura 3.9.

**Figura 3.9***Resultados de señal de placa Hall emulada*

### 3.5 Análisis de costos

El presente análisis de costos tiene como finalidad evaluar la viabilidad económica del prototipo desarrollado, considerando los recursos materiales directamente involucrados en su implementación. Este estudio constituye un elemento fundamental dentro del proceso de validación del diseño, ya que permite establecer si la solución propuesta resulta coherente no solo desde el punto de vista técnico, sino también desde una perspectiva económica.

Para la estimación de costos se realizó un levantamiento detallado de los componentes electrónicos, eléctricos y materiales de fabricación empleados en la construcción del sistema. En la Tabla 3.5 se muestra el desglose correspondiente, donde se evidencia que el costo total del prototipo asciende a 118,05 USD, valor que resulta razonable para un desarrollo de carácter académico y experimental.

**Tabla 3.5***Desglose de costos por ítem*

<b>Ítem</b>	<b>Costo</b>
Arduino Nano	\$8
Controlador + Placa Hall	\$18
Módulo LM2596	\$1
Módulo XL4016	\$11,50
Optoacoplador PC817	\$0,15
Batería de Litio 24V @ 6Ah	\$40
Motor BLDC con caja reductora	\$12
Rollo de PLA	\$27
Diodo LED	\$0,20
Resistores x2	\$0,20
<b>TOTAL</b>	<b>\$118,05</b>

El componente con mayor impacto económico es la batería de litio de 24V y 6 Ah, cuyo costo representa una proporción significativa del total. Este valor se justifica por la necesidad de garantizar una fuente de alimentación confiable, capaz de suministrar la energía requerida por el motor BLDC y los sistemas de control asociados. El módulo XL4016 es otro de los componentes más importante del sistema ya que maneja directamente el consumo de corriente del motor. Asimismo, el material de fabricación estructural (PLA) constituye otro rubro relevante, debido a su uso en la manufactura de piezas mecánicas mediante impresión 3D.

Por otra parte, elementos como el controlador con sensores Hall, el microcontrolador Arduino Nano y el módulo LM2596 cumplen funciones críticas dentro del sistema con costos relativamente bajos en comparación con otros ítems. Los componentes discretos (optoacoplador, resistores y diodos LED), si bien representan una mínima fracción del presupuesto, resultan indispensables para garantizar condiciones adecuadas de aislamiento, protección y señalización del sistema.

Cabe destacar que el presente análisis se limita a los costos directos de materiales, excluyendo costos asociados a mano de obra, infraestructura, herramientas, instrumentación de laboratorio y gastos indirectos. Esta delimitación responde al carácter académico del proyecto, cuyo objetivo principal es validar la factibilidad técnica y económica del diseño propuesto a nivel de prototipo.

En conclusión, el costo total obtenido permite afirmar que el sistema desarrollado es económicamente viable dentro de un contexto estrictamente académico ya que su implementación no requiere inversiones elevadas, lo cual favorece su replicabilidad en trabajos futuros o aplicaciones de mayor alcance.

### 3.6 Pruebas de corte controladas

Para corroborar el funcionamiento de la herramienta se realizaron pruebas con el robot de modelo ABB IRB 2600 con carga máxima de 12kg y alcance de 1.65m disponible en el laboratorio de Mecatrónica de la facultad.

#### Figura 3.10

*Herramienta instalada en el robot ABB IRB 2600*



Se escogieron ramas de especies vegetales locales con diámetros entre 9 y 11 mm de espesor. Para la experimentación se fijaron las ramas seleccionadas al borde de una mesa usando un aprieto tipo G y posicionándolas exactamente en el TCP de la herramienta cuando esta se encuentra en el punto de corte programado. Primero fue necesario mover el robot al punto designado. El resultado de este procedimiento se muestra en la Figura 3.11.

**Figura 3.11** *Posicionamiento de la rama en el punto de corte*



La placa electrónica de la herramienta fue alimentada por una fuente de voltaje de 24VDC y la señal digital del controlador del robot fue conectada a la placa por medio de un cable de largo alcance. Se realizaron 3 pruebas de corte en total, obteniendo cortes limpios en cada caso como se evidencia en la Figura 3.12. Los resultados indican que la herramienta opera correctamente bajo los parámetros de diseño estipulados en el capítulo 1. Bajo la modalidad de operación de la herramienta, su funcionamiento es agnóstico a la programación de cualquier sistema de poda. Sin embargo, es necesario configurar correctamente el TCP de la herramienta para alcanzar un punto de poda aleatorio dentro del volumen de trabajo de sistema.

**Figura 3.12** *Resultados de corte*



(1)



(2)



(3)

**Nota.** (1) 10mm de espesor, (2) 11mm de espesor, (3) 9mm de espesor

## **Capítulo 4**

## 4.1 Conclusiones y recomendaciones

En esta sección describirá la importancia del trabajo desarrollado, las fortalezas y las debilidades.

### 4.1.1 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos al implementar nuestra propuesta de diseño podemos concluir que:

- El diseño del soporte para la herramienta brinda una flexibilidad única para ser adaptado a diferentes sistemas autónomos debido a la unión de la brida brida con una placa conectora desmontable, esto permite que los usuarios puedan diseñar e imprimir acoples que se ajusten a sus necesidades.
- Se seleccionó exitosamente un actuador para alimentar el mecanismo de corte de la herramienta considerando una fuerza de corte de máximo 1200 N, y los microcontroladores y sensores utilizados fueron elementos clave en la etapa de control por sus especificaciones técnicas lo que nos aseguró un circuito electrónico robusto y confiable.
- La emulación de la señal del sensor Hall demostró un control preciso del accionamiento de las cuchillas en función de la posición del sector dentado conectado a la cuchilla móvil.
- Se validó el proceso de corte de la herramienta simulando la poda de ramas de entre 9-11 mm de espesor en un ambiente controlado de forma exitosa, demostrando el correcto funcionamiento del sistema.

#### 4.1.2 Recomendaciones

- El diseño base de la herramienta considera el uso de un par de cuchillas de poda con capacidad de corte de ramas o sarmientos de hasta 12mm de diámetro. Si bien es posible retirar las cuchillas de la herramienta y sustituirlas por una versión de menor o mayor capacidad, no garantizamos que el sistema de herramienta continúe trabajando correctamente. Esta limitante puede ser un tema de investigación para futuros trabajos por la implicación de un sistema adaptable y configurable en función de las cuchillas utilizadas. Sería interesante explorar las posibles soluciones a esta incógnita partiendo de nuestro trabajo.
- Se decidió que la comunicación entre el sistema de poda y la herramienta sea por medio de una señal digital debido a la complejidad reducida para procesar la señal. Fue requerida una etapa de protección entre el sistema electrónico y la señal de entrada, una desventaja de poco peso en comparación a los esfuerzos que se hubieran requerido si se hubiera usado una interfaz de comunicación diferente. Estos sistemas manejan una plétora de interfaces de comunicación, cada uno con sus beneficios y limitantes. Decidir usar un Arduino Nano como un adaptador entre la placa de control y el controlador del sistema autónomo abre las puertas a diferentes interfaces de comunicación. Una particularmente atractiva es usar una conexión RJ45 entre sistemas para transmisión eficiente de información por sockets sobre el protocolo TCP/IP ya que elimina la etapa de protección contra señales de alto voltaje.
- Dos de las mayores limitantes de este trabajo fueron los recursos disponibles y la reducida ventana de tiempo para construir un producto funcional. Como consecuencia se realizó un sobredimensionamiento de las fuerzas de corte

necesarias para cumplir con los requerimientos establecidos al iniciar el proyecto y se optó por usar impresión 3D para fabricar las piezas que componen el soporte de la herramienta. Estudiar los efectos de la geometría de las tijeras en la fuerza de corte suministrada por el motor es una vía por explorar con el fin de diseñar un sistema altamente eficiente. Por otro lado, el diseño del soporte final puede ser mejorado para evitar el desarmado del soporte cada vez que sea necesario instalar o retirar la herramienta de un sistema de poda.

## Referencias

- [1] Q. Sun, C. Ebersole, D. P. Wong, y K. Curtis, “The Impact of Vineyard Mechanization on Grape and Wine Phenolics, Aroma Compounds, and Sensory Properties”, *Fermentation*, vol. 8, jul. 2022, doi: 10.3390/fermentation8070318.
- [2] Lingxin. Bu et al., “Investigating Shear Force and Torque of Grapevine Shoots Based on Experimental and Simulation Analysis”, *Bioresources*, vol. 20, núm. 3, pp. 6662–6679, 2025, doi: 10.15376/biores.20.3.6662-6679.
- [3] S. Poni, S. Tombesi, A. Palliotti, V. Ughini, y M. Gatti, “Mechanical winter pruning of grapevine: Physiological bases and applications”, *Sci Horti*, vol. 204, pp. 88–98, jun. 2016, doi: 10.1016/j.scienta.2016.03.046.
- [4] G. Santesteban et al., “GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS DE PODA DE LA VID”, Pamplona, 2023.
- [5] Claudio. Caprara y Fabio. Pezzi, “Effect of different winter pruning systems on grapes produced”, *Journal of Agricultural Engineering*, vol. XLIV, núm. 2s, pp. 421–424, 2013, doi: 10.4081/jae.2013.s2.e85.
- [6] Romano Elio, Bonsignore R, Camillieri D, Caruso L, Conti A, y Schillaci G, “Evaluation of Hand Forces During Manual Vine Branches Cutting”, en *Proceedings of the International Conference Ragusa SHWA 2010 – Work Safety and Risk Prevention in Agro-food and Forest Systems*, A. Conti, S. Failla, y G. Tirro, Eds., Ragusa, Italia: ElleDue Editore, sep. 2010, pp. 465–470.

- [7] B. Huang, M. Shao, y W. Chen, “Design and research on end effector of a pruning robot”, *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, vol. 17, núm. 36, pp. 19.1-19.5, 2016, doi: 10.5013/IJSSST.a.17.36.19.
- [8] A. Navone, M. Martini, y M. Chiaberge, “Autonomous robotic pruning in orchards and vineyards: A review”, *Smart Agricultural Technology*, vol. 12, ago. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.101283.
- [9] N. Nouri y H. Gharakhani, “A dedicated review of robotic pruners: current technologies, challenges, and future directions”, *Comput Electron Agric*, vol. 239, sep. 2025, doi: 10.1016/j.compag.2025.111013.
- [10] Tao. Teng, “Research on Grapevine Recognition, Manipulation and Winter Pruning Automation”, PhD Thesis, Università Cattolica del Sacro Cuore, Piacenza, 2022.
- [11] T. K. Wolf, *Wine Grape Production Guide for Eastern North America*, NRAES–145. Ithaca, New York, USA: Plant and Life Sciences Publishing (PALS), 2008.
- [12] Y. Sun et al., “Leaf Pruning End-Effector for Adaptive Positioning at the Branch–Stem Junction of Tomato Plants”, *Agriculture (Switzerland)*, vol. 14, núm. 12, dic. 2024, doi: 10.3390/agriculture14122281.
- [13] A. Dobrei, Eleonora. Nistor, D. Constantinescu, Daniela. Dobromir, y Alina. Dobrei, “Improving vineyards management efficiency by using mechanical pruning”, *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, vol. 24, núm. 2, pp. 22–27, 2020.
- [14] S. Kaan Kurtural y M. W. Fidelibus, “Mechanization of Pruning, Canopy Management, and Harvest in Winegrape Vineyards”, *Catalyst: Discovery into Practice*, vol. 5, pp. 29–44, abr. 2021, doi: 10.5344/catalyst.2021.20011.

- [15] D. Sarri, S. Gemignani, R. Lisci, y M. Vieri, “A body impedance-based safety system for electrical pruning tools”, en *Chemical Engineering Transactions*(Vol. 58), Remigio. Berruto, Pietro. Catania, y Mariangela. Vallone, Eds., Florence: Italian Association of Chemical Engineering - AIDIC, 2017, pp. 127–132. doi: 10.3303/CET1758022.
- [16] A. Zahid, M. S. Mahmud, L. He, D. Choi, P. Heinemann, y J. Schupp, “Development of an integrated 3R end-effector with a cartesian manipulator for pruning apple trees”, *Comput Electron Agric*, vol. 179, oct. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105837.
- [17] A. Zahid, L. He, L. Zeng, D. Choi, J. Schupp, y P. Heinemann, “Development of a robotic end-effector for apple tree pruning”, *Trans ASABE*, vol. 63, núm. 4, pp. 847–856, 2020, doi: 10.13031/trans.13729.
- [18] R. ESGİCİ, G. ÖZDEMİR, G. PEKİTKAN, K. ELİÇİN, F. ÖZTÜRK, y A. SESSİZ, “ENGINEERING PROPERTIES OF THE ŞİRE GRAPE (VITIS VINIFERA L. CV.)”, *Scientific Papers. Series B, Horticulture*, vol. 61, 2017.
- [19] F. Goksel Pekitkan, “Mechanical properties of Okuzgozu (*Vitis vinifera* L. cv.) grapevine canes”, *J King Saud Univ Sci*, nov. 2024, doi: 10.1016/j.jksus.2023.103034.
- [20] G. Ozdemir, A. Sessiz, R. Esgici, y A. K. Elicin, “CUTTING PROPERTIES OF WINE GRAPE CULTIVARS”, *Scientific Papers. Series B, Horticulture*, vol. LIX, 2015.
- [21] A. Shekwa, P. Chirwa, E. Ngulube, y T. Ghebremariam, “ Productivity, efficiency and costs of manual saw and electric shear pruning operations in *Pinus elliottii* stands of Mpumalanga, South Africa ”, *International Journal of Forest Engineering*, vol. 28, núm. 3, pp. 169–175, jul. 2017, doi: 10.1080/14942119.2017.1337462.

- [22] K. Çağatay. Selvi, “The Effects of Blade Coatings on Corce Demand When Pruning Grape”, *Black Sea Journal of Engineering and Science*, vol. 6, núm. 2, pp. 111–116, abr. 2023, doi: 10.34248/bsengineering.1256088.
- [23] F. Fatehi y H. Bagherpour, “Design, construction, and evaluation of an autonomous robot for harvesting damask roses, equipped with a specialized end-effector”, *J Agric Food Res*, vol. 24, oct. 2025, doi: 10.1016/j.jafr.2025.102432.
- [24] Y. Liu, Y. Ban, X. Zhang, G. Zhao, J. Wen, y C. Lin, “Tool–Branch Interaction Mechanism of Impact-Pruning Process Based on Finite Element Method”, *Forests*, vol. 15, núm. 11, oct. 2024, doi: 10.3390/f15111902.
- [25] B. F. A. Bakar y F. A. Kamke, “Comparison of alkali treatments on selected chemical, physical and mechanical properties of grape cane fibers”, *Cellulose*, vol. 27, pp. 7371–7387, jul. 2020, doi: 10.1007/s10570-020-03299-z.
- [26] T. T. Wilson, “H.F. Hauff Pruner – Power System”, Undergraduate Thesis / Senior Project, Central Washington University, Ellensburg, Washington, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://digitalcommons.cwu.edu/undergradproj>
- [27] International Organisation of Vine and Wine, Annual Assessment of the World Vine and Wine Sector in 2023, OIV, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.oiv.int/es/what-we-do/data-discovery-report?oiv>
- [28] E. Romano, L. Caruso, D. Longo, E. Vitale, G. Schillaci, and V. Rapisarda, “Investigation of hand forces applied to a pruning tool – pilot study,” *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, vol. 26, no. 3, pp. 472–478, 2019, doi: 10.26444/aaem/109751.

- [29] T. Wakula, "Physiological Stress in Vineyard Workers," *Journal of Agricultural Ergonomics*, vol. 14, no. 2, pp. 123–132, 2000.
- [30] Federación Española del Vino, "El sector en cifras," FEV, 2025. [En línea].  
Disponible en: <https://www.fev.es/sector-cifras/>
- [31] Instituto Nacional de Estadística, "Ocupados por grupo de edad, sexo y ocupación (4145)," Encuesta de Población Activa (EPA), INE, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=4145>
- [32] M. Aneja Nair, N. Neha, R. M. Ramanjineyulu, M. Sainath Rao, A. Siddiqua, and A. Khayum, "Pruning in Horticulture: A Blend of Art and Science," *Journal of Scientific Research and Reports*, vol. 30, no. 10, pp. 313–329, 2024.
- [33] D. Tomasi, F. Gaiotti, D. Petoumenou, L. Lovat, N. Belfiore, D. Boscaro, and G. Mian, "Winter Pruning: Effect on Root Density, Root Distribution and Root/Canopy Ratio in *Vitis vinifera* cv. Pinot Gris," *Agronomy*, vol. 10, no. 10, p. 1509, 2020.
- [34] I. E. Dami, S. Ennahli, and Y. Zhang, "Assessment of Winter Injury in Grape Cultivars and Pruning Strategies Following a Freezing Stress Event," *American Journal of Enology and Viticulture*, vol. 63, no. 1, pp. 106–113, 2012.
- [35] The Engineering ToolBox, "Friction - Coefficients for Common Materials and Surfaces", 2004. Disponible en: [https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html)
- [36] PLA Ultimaker, "Ficha de datos técnicos PLA", Versión 3.011, 2017. Disponible en: <https://um-support-files.ultimaker.com/materials/2.85mm/tds/PLA/TDS%20PLA%20v3.011-spa-ES.pdf>

- [37] ABB, “Product Specification – IRB 2600”, 3HAC085909-001, 2017. Disponible en:  
[IRB 2600 for OmniCore, Product specification](#)

## **Apéndices**

## Apéndice A

### Código de control del Arduino Nano

```

/*
  Control de placa comercial mediante emulación de sensor Hall (A0 y A1).

  Entradas / salidas:
  - D2  : orden externa (HIGH) para ejecutar un ciclo de cierre y apertura.
  - D9  : salida hacia transistor open-drain para hundir A0 (evento A0 = 0
V).
  - D10 : salida hacia transistor open-drain para hundir A1 (evento A1 = 0
V).

  Nota:
  - D9 y D10 NO se conectan directo a A0/A1. Deben manejar transistores
(open-drain/open-collector).
*/

const int PIN_ORDEN = 2;
const int PIN_A0    = 9;
const int PIN_A1    = 10;

// Ajustes (valores conservadores, modificables)
const int PULSO_MS      = 30; // duración del hundimiento a GND
const int ESPERA_MS     = 70; // tiempo entre pulsos
const int PULSOS_CERRAR = 6;  // cantidad de pulsos para "cerrar"
const int PULSOS_ABRIR  = 6;  // cantidad de pulsos para "abrir"
const int PAUSA_CICLO_MS = 200; // pausa entre cerrar y abrir

// Robustez básica
const int REBOTE_MS = 30;
const int COOLDOWN_MS = 300;

unsigned long tCambio = 0;
unsigned long tUltimoCiclo = 0;
bool entradaPrev = false;

void hundirA0(bool on) { digitalWrite(PIN_A0, on ? HIGH : LOW); }
void hundirA1(bool on) { digitalWrite(PIN_A1, on ? HIGH : LOW); }

void liberarLineas() {
  hundirA0(false);
  hundirA1(false);
}

// Tren de pulsos sobre una línea: hunde a GND y suelta repetidamente
void pulsosEnLinea(int pin, int n) {
  for (int i = 0; i < n; i++) {
    digitalWrite(pin, HIGH); // transistor ON -> línea a 0V
    delay(PULSO_MS);
    digitalWrite(pin, LOW);  // transistor OFF -> línea liberada
    delay(ESPERA_MS);
  }
}

// Secuencia mínima: cerrar (pulsos en A1) y luego abrir (pulsos en A0)
void cicloCerrarAbrir() {
  liberarLineas();

  // Cerrar: se emula con A1
  pulsosEnLinea(PIN_A1, PULSOS_CERRAR);
}

```

```
delay(PAUSA_CICLO_MS);

// Abrir: se emula con A0
pulsosEnLinea(PIN_A0, PULSOS_ABRIR);

liberarLineas();
}

void setup() {
  pinMode(PIN_ORDEN, INPUT);
  pinMode(PIN_A0, OUTPUT);
  pinMode(PIN_A1, OUTPUT);

  liberarLineas();
}

void loop() {
  unsigned long now = millis();
  bool orden = digitalRead(PIN_ORDEN);

  // Antirrebote
  if (orden != entradaPrev) {
    tCambio = now;
    entradaPrev = orden;
  }

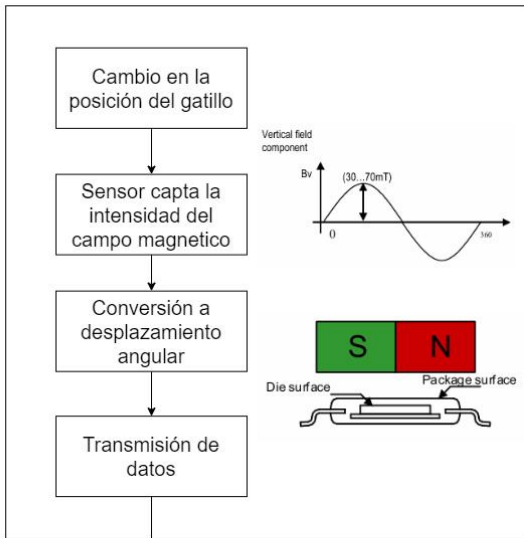
  bool ordenEstable = orden && (now - tCambio > REBOTE_MS);

  // Ejecutar ciclo al recibir orden alta estable, respetando cooldown
  if (ordenEstable && (now - tUltimoCiclo > COOLDOWN_MS)) {
    tUltimoCiclo = now;
    cicloCerrarAbrir();
  }

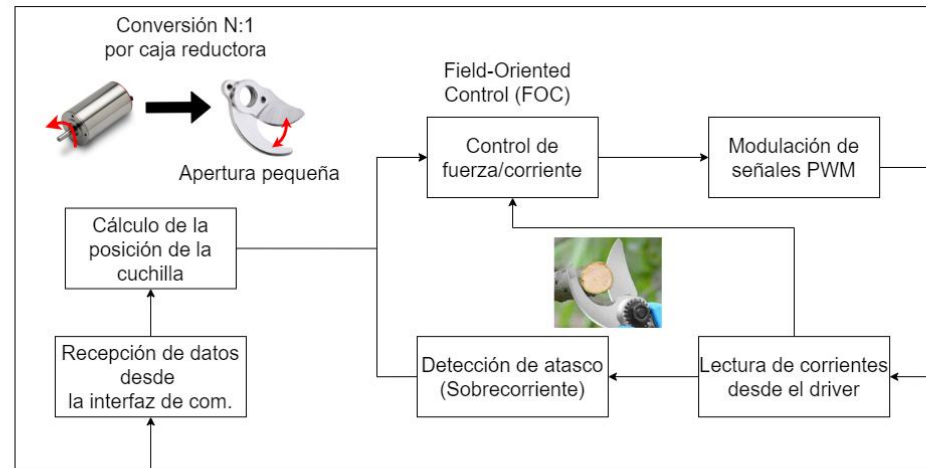
  // Estado seguro permanente
  liberarLineas();
}
```

## Apéndice B Flujo del sistema de control de poda

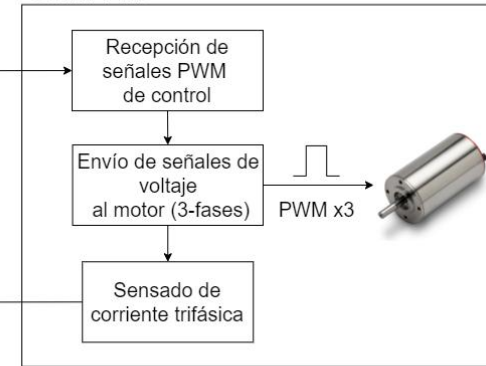
### SENSOR DE POSICIÓN



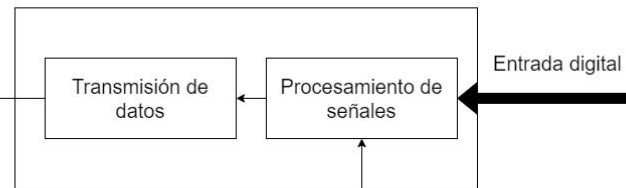
### MICROCONTROLADOR



### DRIVER



### INTERFAZ DE COMUNICACIÓN



**SISTEMA DE PODA**

## Apéndice C

### Propuesta de código para el control FOC en el microcontrolador

```

void setup() {
  // ..configuraciones pertinentes

  // Modo de Control: Ángulo (Posición) con lazo interno de
  corriente motor.controller = MotionControlType::angle;
  motor.torque_controller = TorqueControlType::foc_current;
  //Ganancias experimentales
  motor.PID_current_q.P = 2.0;
  motor.PID_current_q.I = 1500;
  // Repetir lo mismo para el eje D
  motor.PID_current_d.P = 2.0;
  motor.PID_current_d.I = 1500;

  // Límites de Seguridad
  motor.current_limit = CORRIENTE_MAX; // Nunca pasará de 2A
  motor.voltage_limit = VOLTAJE_FUENTE;

  //..configuraciones de tasa de refresco y pines I/O

  //Inicialización de FOC
  motor.init();
  motor.initFOC();

  //Es necesario realizar homing. Se debe agregar una rutina que
  maneje ese proceso.
}

void loop() {
  motor.loopFOC();

  // Variables de estado
  float velocidad_actual = motor.shaft_velocity;
  float corriente_actual = current_sense.getDCCurrent(); // o
  motor.current.q

  switch (estado_corte) {

    case APROXIMACION:
      motor.controller = MotionControlType::angle;
      motor.current_limit = 9;
      motor.target = POSICION_CERRADA;

      // Si la corriente sube, tocamos madera
      if (corriente_actual > 10) estado_corte = CORTANDO;
      break;

    case CORTANDO:
      // Cambiamos estrategia: Fuerza Bruta pero Lenta
      motor.controller = MotionControlType::velocity;
      motor.current_limit = 15.0;
      motor.target = 2.0; // Velocidad lenta constante (rad/s)
  }
}

```

```
// Detección del "Snap" (La rama se rompió)
// Si la corriente cae de golpe O la velocidad se dispara
if (velocidad_actual > 5.0) {
    estado_corte = FRENADO;
}

// Detección de Atasco (Madera muy dura, no avanza)
if (velocidad_actual < 0.1 && corriente_actual > 15) {
    rutinaAntiAtasco(); // Abrir un poco y reintentar o
pedir ayuda
}
break;

case FRENADO:
    motor.controller = MotionControlType::velocity;
    motor.target = 0; // Freno activo
    motor.current_limit = 2.0; // Usar fuerza para frenar

    if (velocidad_actual < 0.1) estado_corte = FIN;
    break;
}
}
```

## Apéndice D

### Código RAPID de las simulaciones de corte controladas

```

MODULE Module1
  CONST robtarget Target_70:=[[1121.577,-
101.12,1435.077],[0.965925826,0.258819045,0,0],[-1,0,-
1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
  CONST robtarget
Target_80:=[[1115.713953003,129.496247042,517.521545674],[0.71472955
7,0.69940093,-0.000000016,-
0.000000011],[0,0,0,1],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
  CONST robtarget Target_90:=[[1115.71392808,-
7.753015362,517.521638607],[0.714729535,0.699400952,-0.000000012,-
0.000000013],[0,0,0,1],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
  PERS tooldata viticut_v2:=[TRUE,[-175.077,-
101.12,91.577],[0.683012702,0.183012702,-
0.683012702,0.183012702]], [1,[-107.38,62,65.5],[1,0,0,0],0,0,0]];
  PROC main()
    Path_40;
    Path_50;
  ENDPROC
  PROC Path_40()
    VAR triggdata herr_on;
    TriggIO herr_on, 0\Time \DOp:=Local_IO_0_DO2, 1;

    MoveJ Target_70,v100,z0,viticut_v2\WObj:=wobj0;
    MoveJ Target_80,v100,z0,viticut_v2\WObj:=wobj0;
    TriggJ Target_90,v100,herr_on,fine,viticut_v2;
    WaitTime 1.5;

  ENDPROC
  PROC Path_50()
    VAR triggdata herr_off;
    TriggIO herr_off, 0\Time \DOp:=Local_IO_0_DO2, 0;

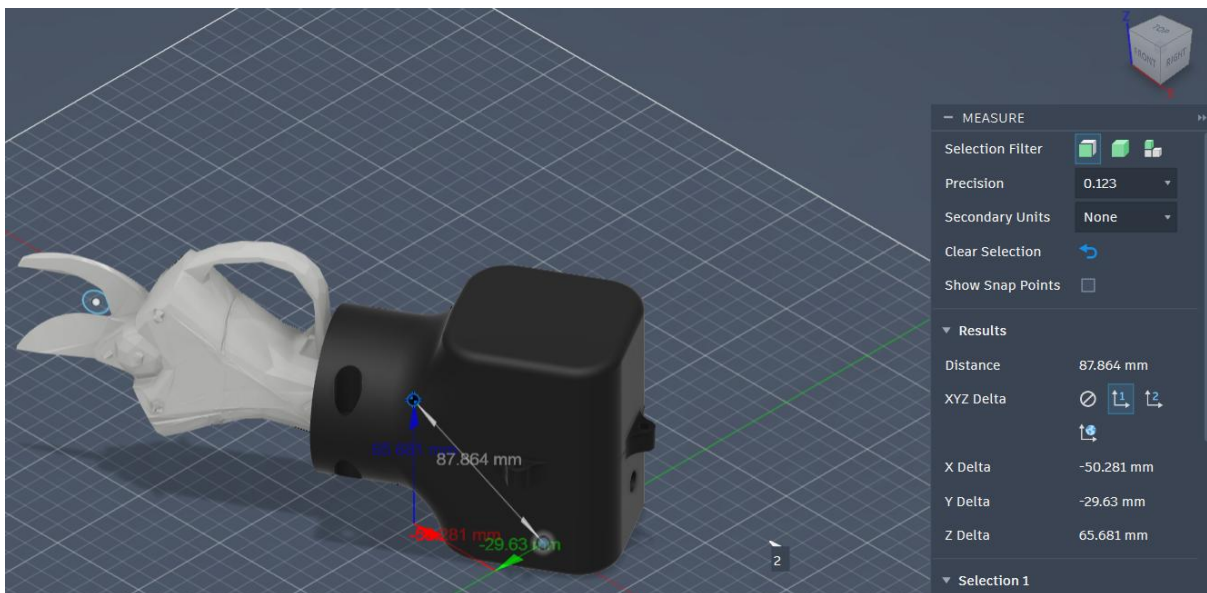
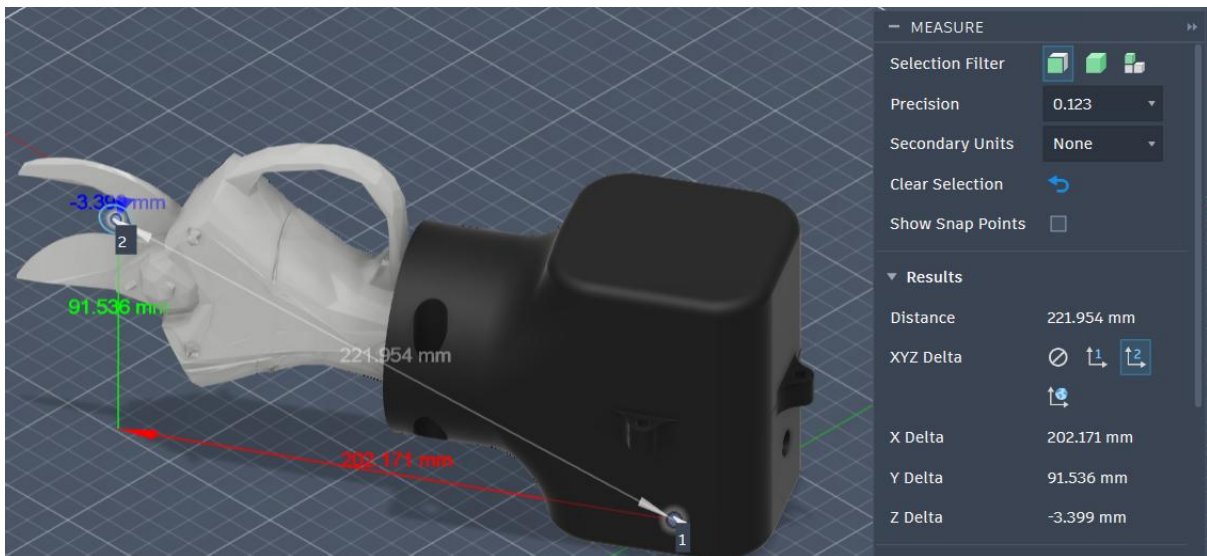
    TriggJ Target_90,v100,herr_off,fine,viticut_v2;
    WaitTime 0.5;
    MoveJ Target_80,v100,z0,viticut_v2\WObj:=wobj0;
    MoveJ Target_70,v100,z0,viticut_v2\WObj:=wobj0;

  ENDPROC
ENDMODULE

```

## Apéndice E

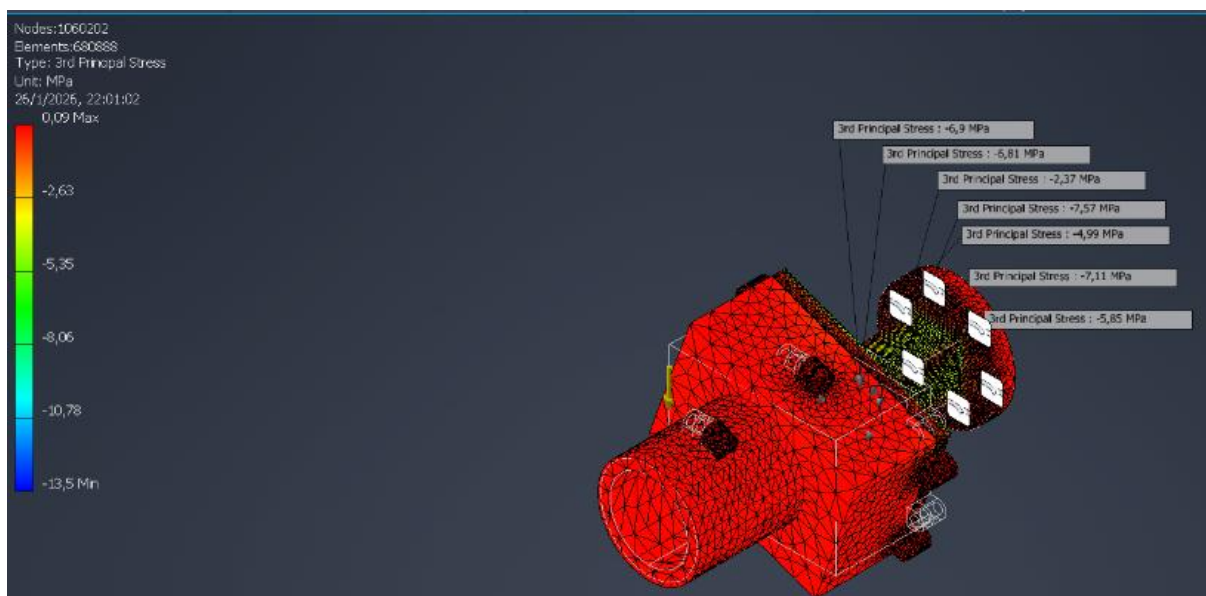
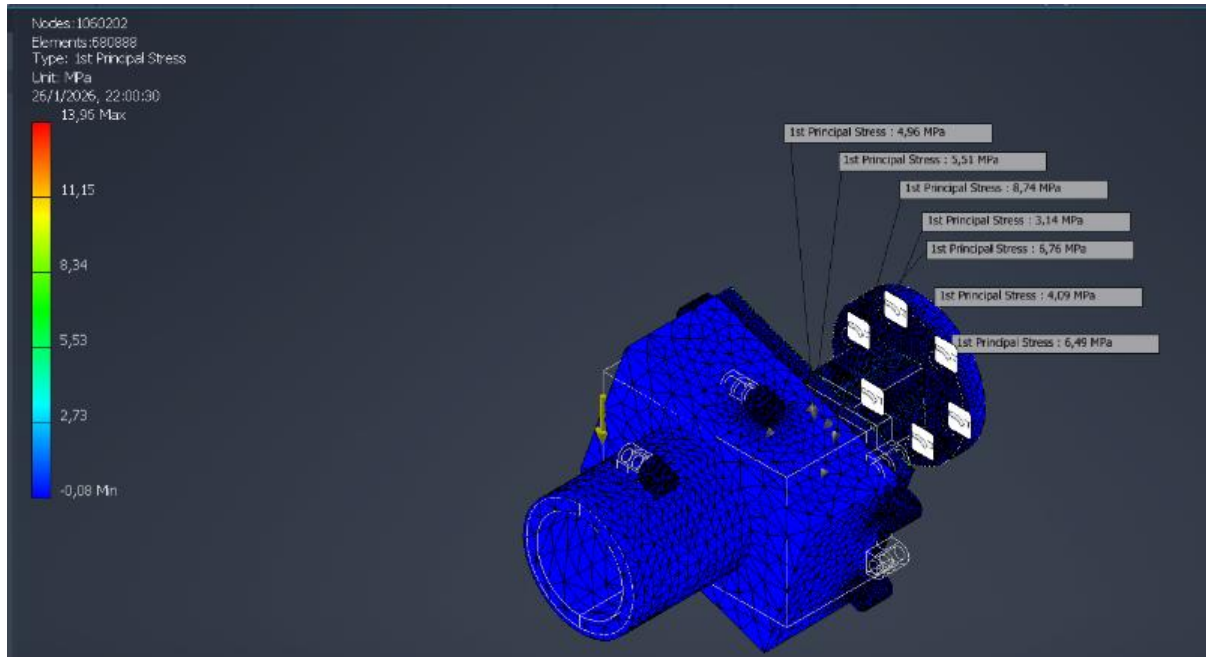
### Ubicación del TCP y CG de la herramienta (CAD)



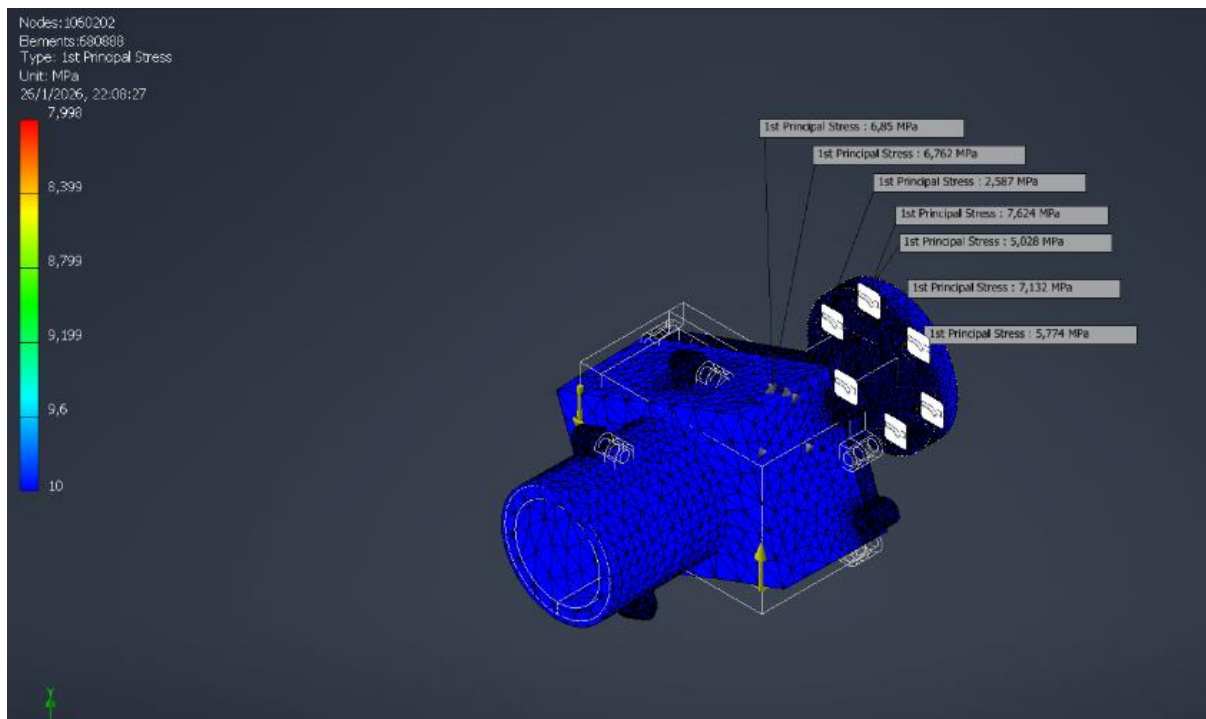
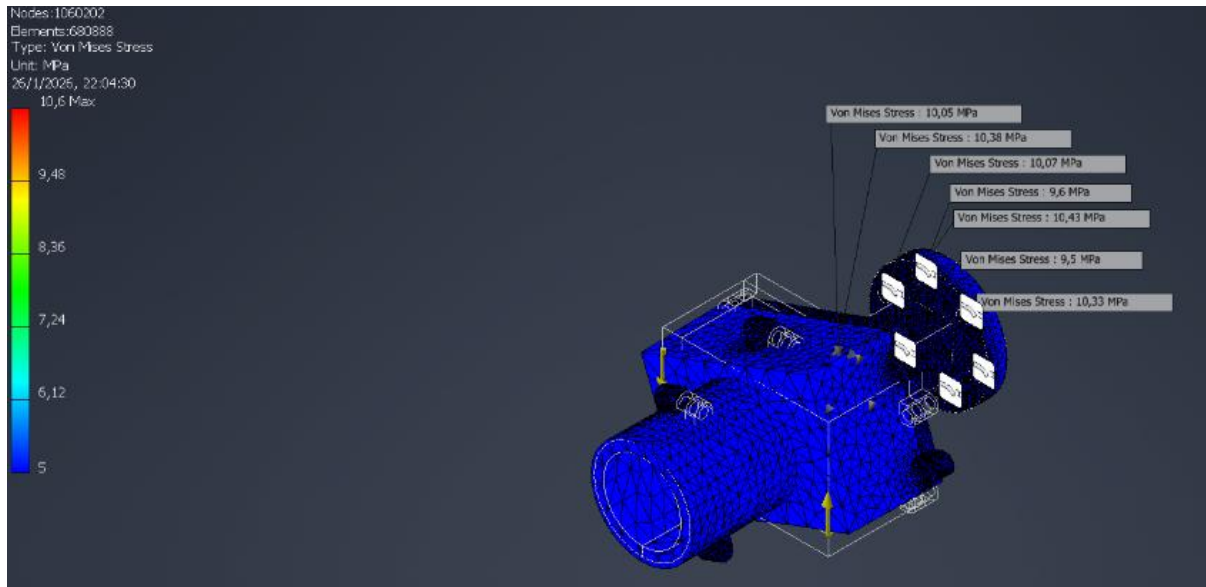
## Apéndice F

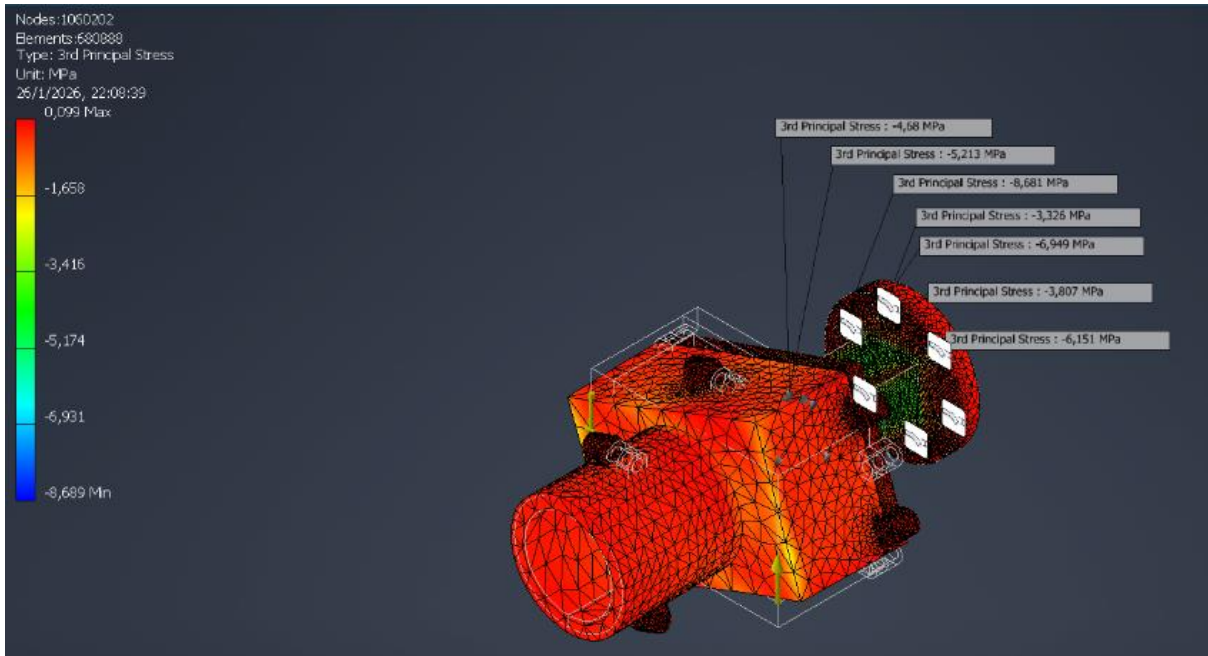
### Análisis de elementos finitos

#### *Esfuerzos principales en Y*

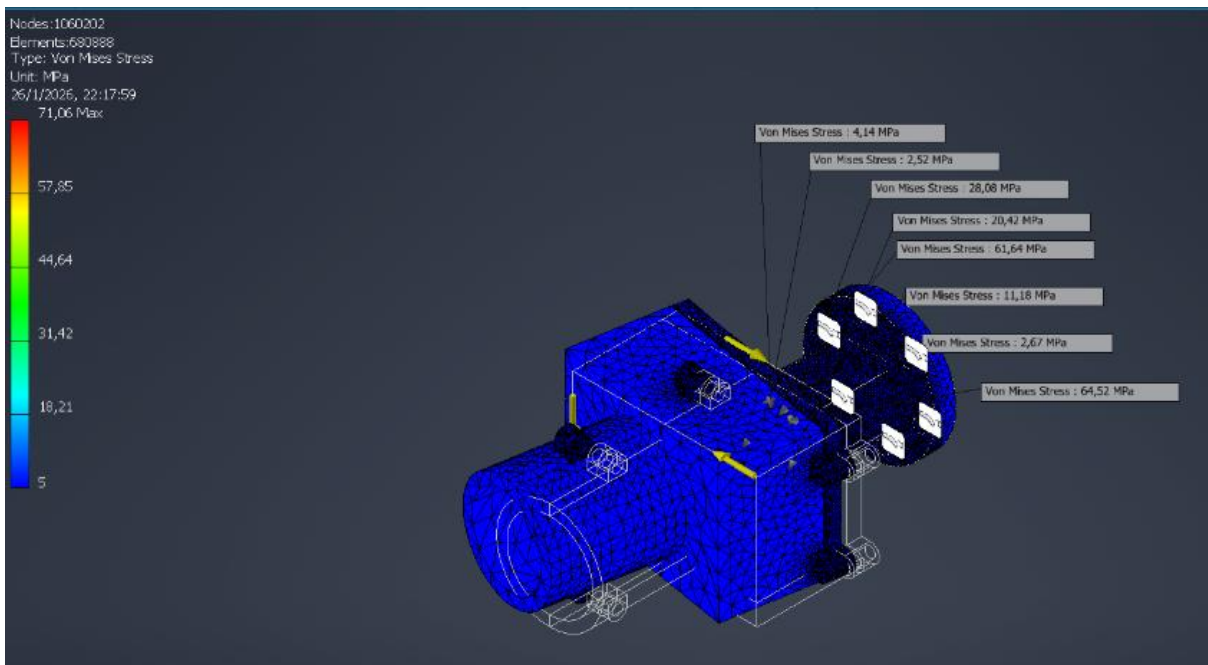


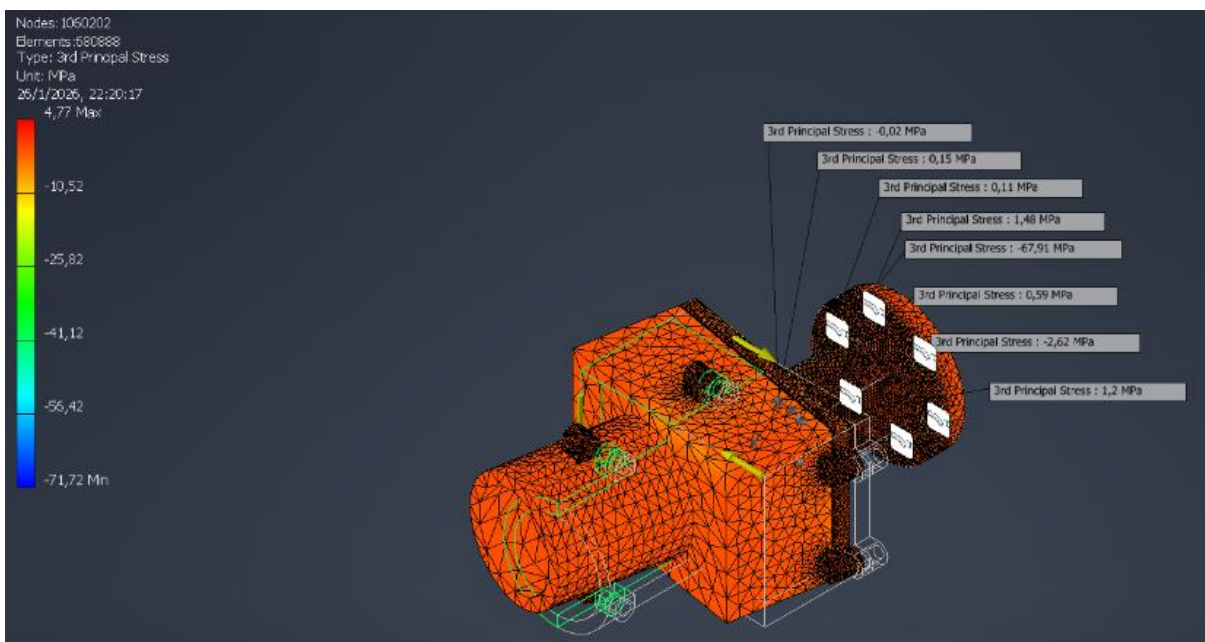
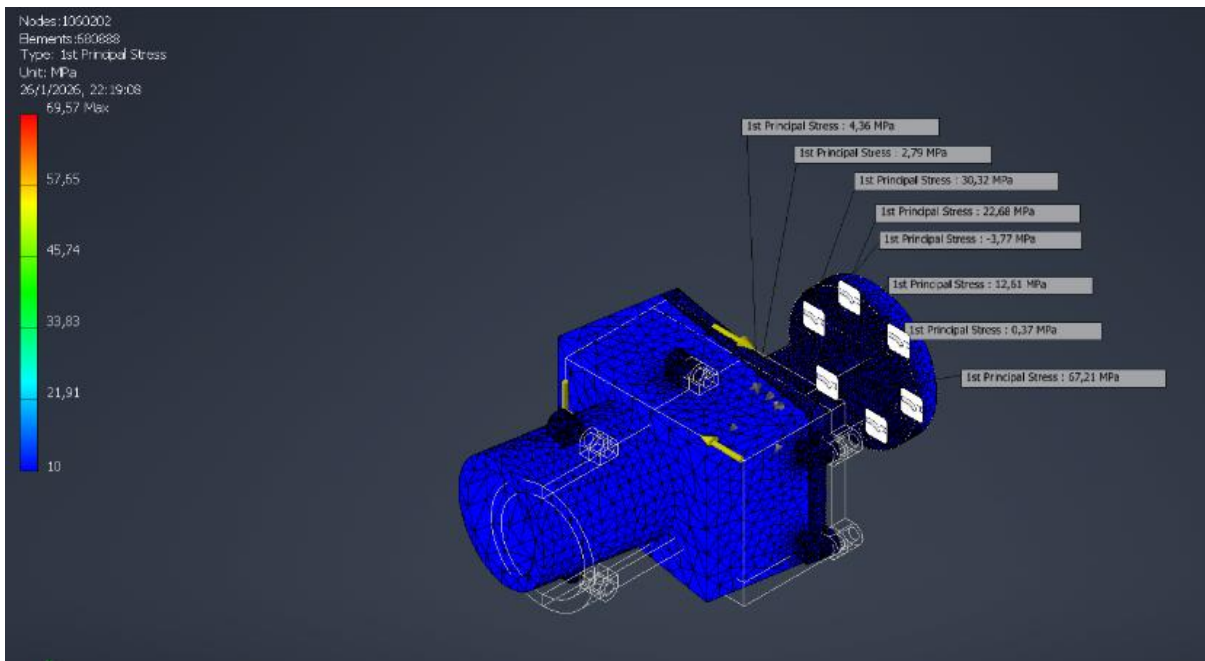
## Esfuerzos principales en X



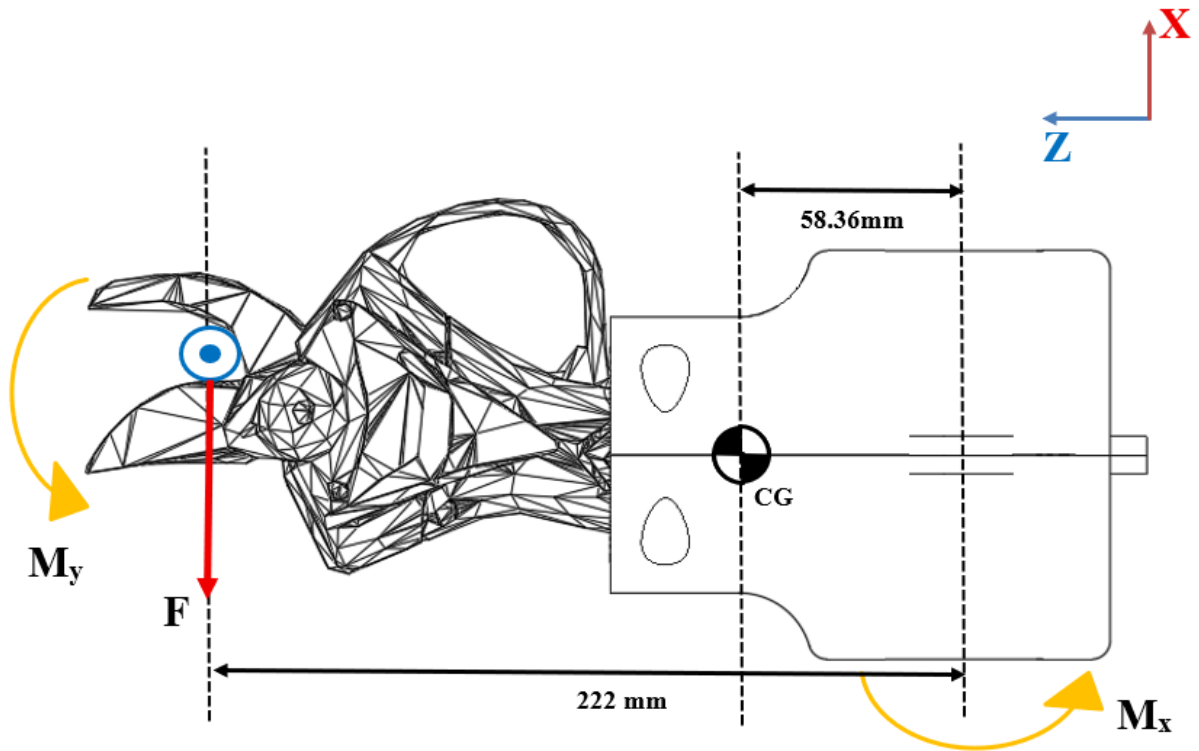


*Esfuerzos principales en Z*



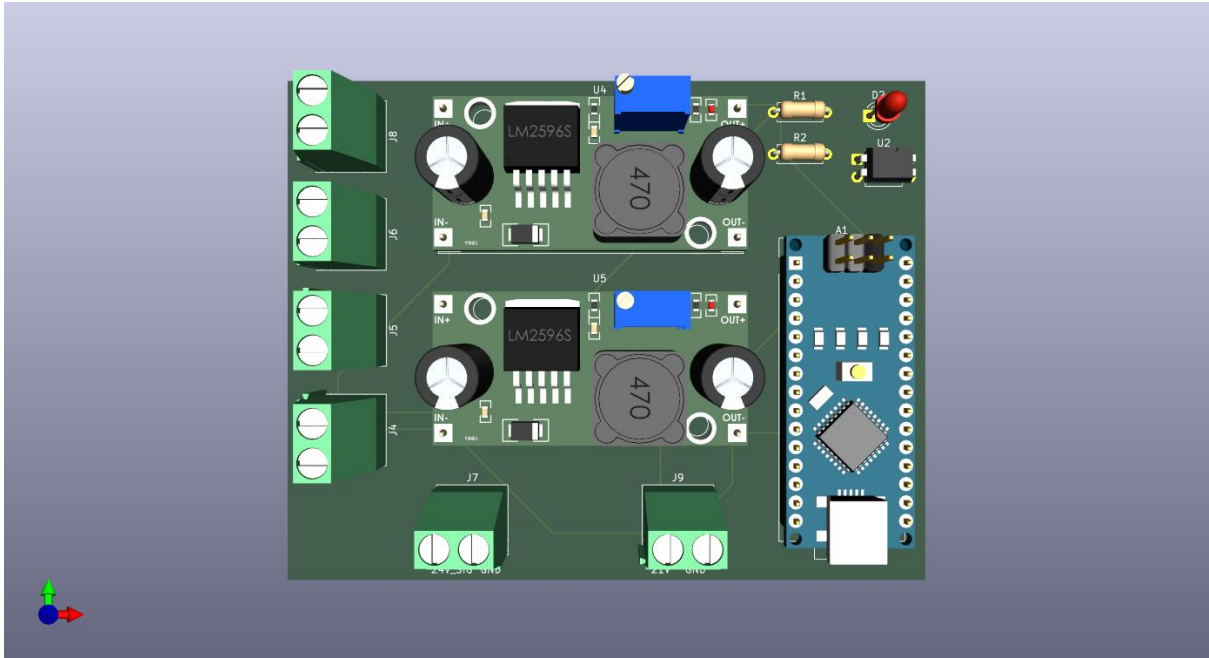


Apéndice G  
Diagrama de cuerpo libre de la herramienta

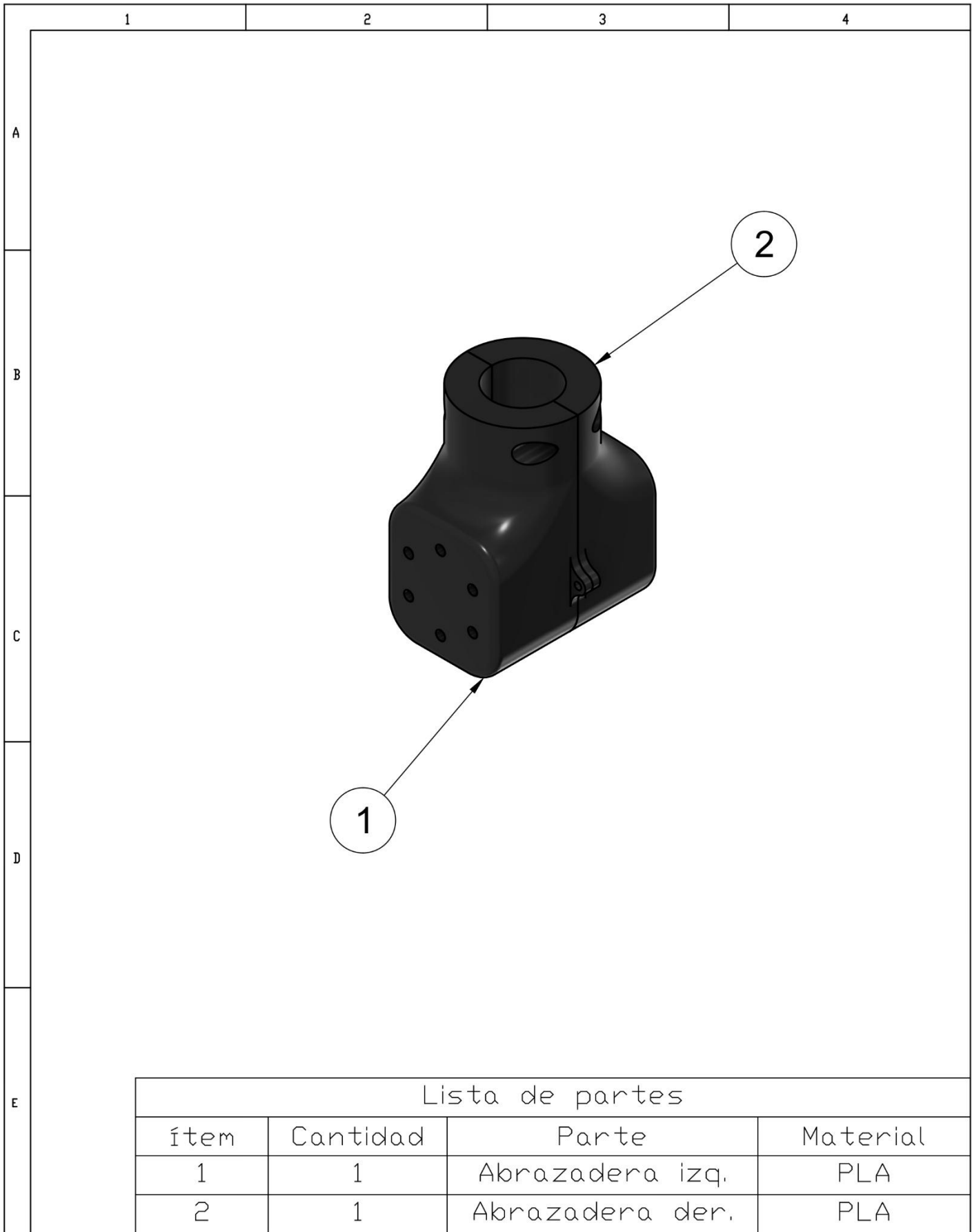


## Apéndice H

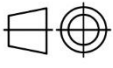
### Placa PCB



**Apéndice I**  
**Planos del diseño mecánico**



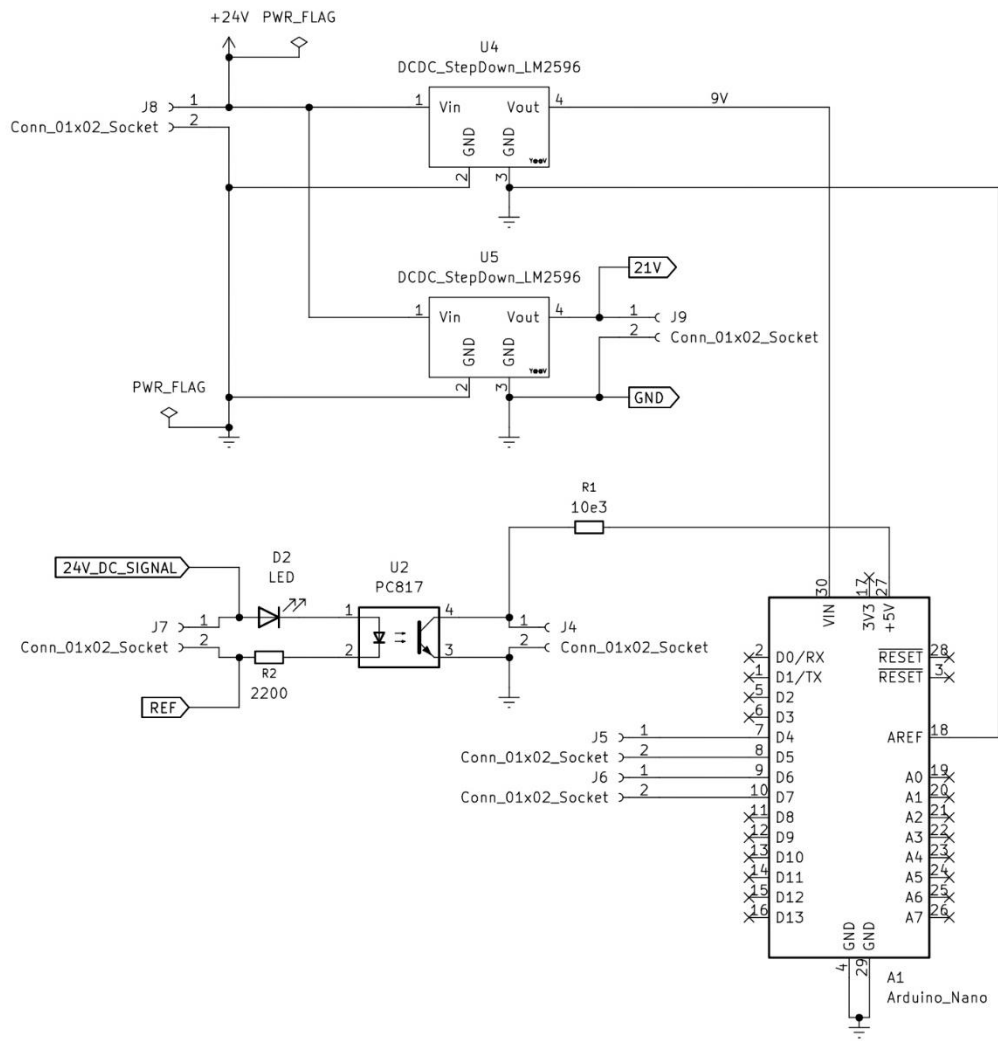
Lista de partes			
ítem	Cantidad	Parte	Material
1	1	Abrazadera izq.	PLA
2	1	Abrazadera der.	PLA

				TOLERANCIAS	PESO	MATERIALES			
						Plástico PLA			
						FECHA	NOMBRE	DENOMINACIÓN	ESCALA
				DIB.	27/1/26	Sotomayor-Banchón		Ensamble del soporte	1:2.5
				REV.		Ing. Marcelo Fajardo			
				APROB.					
						Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL		NÚMERO DEL DIBUJO	MCT-01
EDI- CIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE			SUSTITUYE A:			





**Apéndice J**  
**Diagrama esquemático del circuito electrónico**



**Denominación: Esquemático electrónico**

Número: MCT-04

27/1/26 Diseñado por: Xavier Banchón-Marcelo Sotomayor

27/1/26 Revisado por: Ing. Marcelo Fajardo Pruna

- Aprobado por:

Escuela Superior  
Politécnica del Litoral

ESPOL

Rev: 1

Tamaño: A4