



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de un actuador electromecánico ergonómico para  
torres de sujeción de la empresa ALLMATIC-Jakob  
Spannsysteme GmbH**

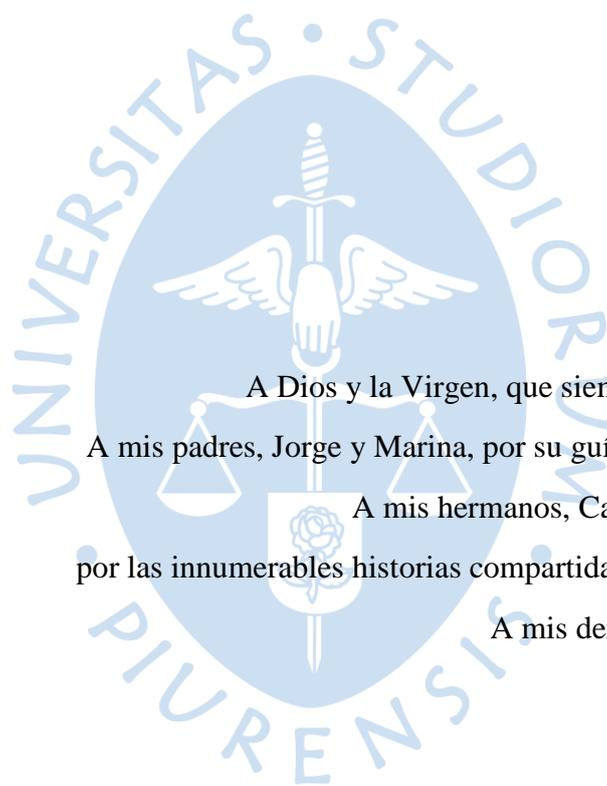
Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

**Jorge Alejandro Reyes Farías**

**Asesor:**  
**Dr. Ing. Carlos Ojeda Díaz**

**Piura, febrero de 2020**





A Dios y la Virgen, que siempre cuidan a mi familia.

A mis padres, Jorge y Marina, por su guía y apoyo incondicional.

A mis hermanos, Carlos, Javier y Guillermo,  
por las innumerables historias compartidas, y por las que vendrán.

A mis demás familiares y amigos.



## Resumen Analítico-Informativo

**Diseño de un actuador electromecánico ergonómico para torres de sujeción de la empresa ALLMATIC-Jakob Spannsysteme GmbH**

**Jorge Alejandro Reyes Farías**

**Asesor(es): Dr. Ing. Carlos Ojeda Díaz**

**Tesis.**

**Título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico**

**Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.**

**Piura, 14 de Febrero de 2020**

**Palabras claves:** actuador/diseño/ergonomía/sujeción/motor/industria

**Introducción:** En el presente trabajo se expone el diseño de un sistema un sistema electromecánico ergonómico que acciona las torres de sujeción producidas en la empresa ALLMATIC-Jakob Spannsysteme GmbH. Dicho sistema tiene como fines simplificar el proceso a los operarios y reducir los tiempos de operación. La tesis fue desarrollada en ALLMATIC como parte del proyecto Bediengerät (“Dispositivo de operación”, o “actuador”). La tesis inicia con una reseña histórica de las máquinas herramientas, que brinda la perspectiva del impacto del proyecto en el mercado alemán, seguida del marco teórico, donde se presenta algunos términos importantes y se define el alcance de la tesis. En el cuerpo de la tesis se exponen los pasos seguidos para el diseño del producto, correspondientes al sistema mecánico y al método de control.

**Metodología:** Se tomó como referencia un proyecto antiguo para el planteamiento de los objetivos, pero realizando el diseño mecánico y electrónico desde cero. En SolidWorks se diseñó un prototipo del sistema para realizar varias pruebas preliminares. Dicho prototipo fue mejorándose constantemente con muchas funciones adicionales hasta el diseño final. Las pruebas realizadas extrajeron datos esenciales para el diseño, mediante varios métodos, como el puerto serial del microcontrolador Teensy o sensores externos de fuerza y posición.

**Resultados:** Los datos recopilados se agrupan en dos tipos: los procesados por el Teensy y los procesados por un código en Python. Los más relevantes fueron la comparación entre las mediciones de corriente en el sistema y las mediciones de fuerza entre las mordazas. Estos presentaron una correlación lineal con un gran ajuste, con un ECM de 0,0217 en el caso del husillo TITAN 2. Otro resultado destacable es la mejora en eficiencia, gracias al uso de piezas más modernas, lo que aceleró el proceso de 9 segundos a 0.5 segundos (Pág. 68). Finalmente, se destaca que realizar mantenimiento a este sistema es mucho más sencillo que el anterior, puesto que no se ha tercerizado, dejando así bien documentado todo el diseño del sistema; y también porque no se realizó modificaciones a piezas estándar como la caja reductora.

**Conclusiones:** Se cumplieron todos los objetivos planteados: programación de un control más práctico y eficiente, diseño ergonómico e industrial, evaluación de la conveniencia de una medición de momentos, un diseño modular y la reducción de costos. Se propusieron también unas mejoras para aquel que desee desarrollar más el producto.

**Fecha de elaboración del resumen:** 23 de enero de 2020

## Analytical-Informative Summary

**Design of an ergonomic electromechanical actuator for clamping towers from ALLMATIC-Jakob Spannsysteme GmbH**

**Jorge Alejandro Reyes Farías**

**Advisor: Dr. Ing. Carlos Ojeda Díaz**

**Thesis**

**Title of Mechanical-Electrical Engineer**

**Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.**

**Piura, February 14th, 2020**

**Keywords:** actuator/design/ergonomics/clamping/motor/industry

**Introduction:** This work presents the design of an ergonomic electromechanical system to drive the tombstone fixtures produced by ALLMATIC-Jakob Spannsysteme GmbH. The main purposes of this system are to simplify the handwork of the operators and to reduce operating times. The thesis was developed at ALLMATIC as part of the Bediengerät project ("operating device", or "actuator"). The thesis begins with a historical overview of the machine tools, which provides the reader with an insight to the impact of the project on the German market, followed by the theoretical framework of the research project, as some important terms are introduced, and the scope of the thesis is defined. The chapters 3 and 4 are the main part of the thesis, as the stages of the design of the product are exposed, divided in the mechanical system and the control method, respectively. As a concluding evaluation, the chapter 5 describes the end-system and evaluates the fulfilment of the objectives set.

**Methodology:** This work refers to an old project to define its main objectives but starts both the mechanical and electrical designs from scratch. In SolidWorks, a prototype for preliminary tests was designed, before the design of the final model. This prototype was upgraded constantly, until all the additional functions for the final model were designed. The tests provided essential information for the design, via several methods, such as the serial port of the Teensy microcontroller and other external devices for force and position sensing.

**Results:** The extracted data is divided in two groups: those processed by Teensy and others processed in Python. The most relevant results are the comparison between the current measured in the system and the clamping force generated. They presented a lineal correlation with a great adjustment: a MSE of 0.0217 when tested on the spindle TITAN 2. Another important result is the efficiency improvement, thanks to the use of modern parts, which accelerated the process from 9 seconds to 0.5 seconds. Finally, the maintenance to the designed device is faster than the previous one, because no third-party companies were involved in the design, everything is let properly documented and no modifications to standard parts, like the gearbox, were made.

**Conclusions:** All the main objectives were achieved: Programming of a more practical and efficient control, design of an ergonomic industrial model, evaluation of the need for a torque measurement, a modular design, and costs reduction. Future improvements were proposed, together with the documentation, for the further development of the designed product.

**Summary date:** Jan 23th, 2020.

## **Prefacio**

Esta tesis fue orientada al diseño de un producto comercial para la industria de la metalmecánica alemana. La oportunidad de desarrollar una tesis en Alemania y ponerla en práctica en un entorno industrial fue brindada por la empresa ALLMATIC-Jakob Spannsysteme GmbH (a partir de ahora ALLMATIC). Dicha oportunidad generó gran entusiasmo por significar un paso grande en la vida laboral, marcando el inicio de la vida profesional. Alemania es definitivamente un lugar ideal para realizar el presente trabajo de titulación: la ingeniería mecánica alemana tiene una posición líder en el mercado mundial, y es una de las ramas más importantes de la industria en Alemania.

De la presente experiencia, se considera relevante mencionar la importancia de los idiomas en la realidad actual. Ahora se tiene acceso a una variedad enorme de información, y limitarse a investigar en fuentes que estén en la lengua materna es un sesgo que pronto será inadmisibles. En el Perú, el idioma inglés ha pasado de ser una herramienta conveniente a ser necesaria en la vida universitaria. En este caso en particular, el inglés ayudó a integrarse en la vida alemana, hasta que llegó un punto en el que se trabajó solamente con el idioma alemán. Cualquier idioma se puede aprender, si se dispone de voluntad y motivación.

Deseo expresar mi agradecimiento especial a Luis Paiba, jefe del área de desarrollo de ALLMATIC por su orientación en el desarrollo de la tesis y su invaluable amistad, y a mi asesor durante la carrera y la tesis, Dr. Ing. Carlos Ojeda. Finalmente, quiero agradecer a la Universidad de Piura por la formación académica y personal brindadas.



## Tabla de contenido

<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1.....</b>	<b>3</b>
<b>Estado del arte: Sistemas de sujeción para centros de mecanizado horizontal .....</b>	<b>3</b>
1.1. Las máquinas herramientas .....	3
1.1.1. Definición .....	3
1.1.2. Historia y evolución .....	4
1.1.3. Influencia de las MH en el progreso .....	6
1.1.4. Impacto de los avances tecnológicos en las máquinas herramientas .....	6
1.1.5. Principales tipos de máquinas herramientas .....	8
1.1.6. Principales accesorios de las máquinas herramientas .....	8
1.2. Las mordazas de máquina .....	8
1.2.1. Definición y descripción .....	9
1.2.2. Materiales.....	9
1.2.3. Normas técnicas .....	9
1.2.4. Diagnóstico de su funcionamiento.....	10
<b>Capítulo 2.....</b>	<b>11</b>
<b>Proyecto de investigación .....</b>	<b>11</b>
2.1. La empresa ALLMATIC Jakob Spannsysteme GmbH.....	11
2.1.1. Tipo de industria .....	11
2.1.2. Productos comerciales .....	12
2.1.3. Proyectos.....	13
2.2. Proyecto antecedente “ <i>Handhabungsgerät</i> ” .....	14
2.2.1. Alcance .....	14
2.2.2. Funcionamiento.....	15
2.2.3. Mejoras propuestas por los autores.....	16
2.3. Proyecto “ <i>Bediengerät</i> ” .....	17
2.3.1. Objetivos .....	17
2.3.2. Método del trabajo .....	18

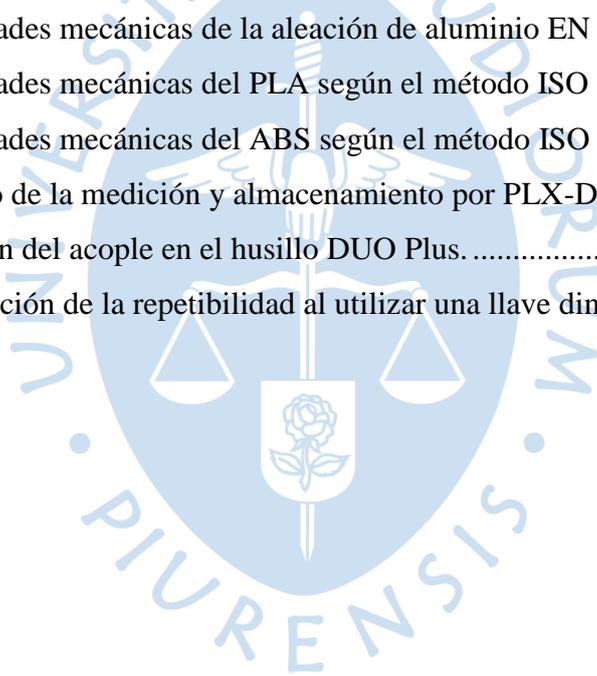
2.3.3.	Características mecánicas de los materiales utilizados .....	19
2.3.4.	Normas de seguridad que rigen el diseño del <i>Bediengerät</i> .....	21
2.4.	Otros sistemas similares .....	22
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>23</b>	
<b>Diseño y fabricación de un prototipo .....</b>	<b>23</b>	
3.1.	Cálculo de parámetros principales .....	23
3.1.1.	Torque en el motor .....	24
3.1.2.	Velocidad angular en el motor .....	25
3.1.3.	Potencia pico y corriente pico del motor .....	25
3.1.4.	Sección del eje principal .....	26
3.1.5.	Corriente a carga continua .....	26
3.2.	Selección de componentes de compra.....	28
3.2.1.	Motor.....	28
3.2.2.	Controlador .....	29
3.2.3.	Ejes de absorción de momentos .....	29
3.3.	Diseño y fabricación de piezas.....	30
3.3.1.	Diseño en SolidWorks .....	31
3.3.2.	Elaboración de planos y asignación de tolerancias.....	31
3.3.3.	Selección del “material en bruto” .....	31
3.3.4.	Impresión y fabricación .....	32
3.4.	Prototipo resultante .....	32
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>35</b>	
<b>Diseño e implementación del método de control.....</b>	<b>35</b>	
4.1.	Planificación del control.....	35
4.2.	Diseño y fabricación de tarjeta electrónica .....	37
4.2.1.	Componentes y herramientas .....	37
4.2.2.	Metodología .....	40
4.3.	Pruebas preliminares .....	41
4.3.1.	Pruebas en “Modo manual” .....	42
4.3.2.	Pruebas en “Modo automático” .....	42
4.4.	Código resultante.....	46
4.4.1.	Lectura de los parámetros predefinidos por el usuario .....	47
4.4.2.	Cálculo de parámetros según el husillo y fuerza seleccionados .....	48
4.4.3.	Solución al problema del Kupplung .....	50
4.4.4.	Lectura de parámetros externos al Teensy .....	54
4.4.5.	Arranque del motor sin interrupciones .....	55
4.4.6.	Detención automática del <i>Bediengerät</i> .....	56

4.4.7.	Activación del motor.....	57
4.4.8.	Envío de parámetros relevantes en tiempo real .....	58
4.4.9.	Control de los paneles indicadores LED.....	58
4.4.10.	Reinicio de la variable temporal en caso ocurra un rollover .....	59
<b>Capítulo 5.....</b>		<b>61</b>
<b>Análisis de resultados .....</b>		<b>61</b>
5.1.	Cumplimiento de objetivos .....	62
5.1.1.	Programación de un control más práctico y eficiente.....	62
5.1.2.	Diseño ergonómico e industrial .....	63
5.1.3.	Evaluación de la conveniencia de una medición de momentos.....	63
5.1.4.	Diseño modular.....	65
5.1.5.	Reducción de costos.....	65
5.2.	Propuestas de mejora.....	66
5.3.	Documentación del proyecto.....	66
5.3.1.	Alcance .....	66
5.3.2.	Plazo.....	67
5.3.3.	Costos.....	67
5.3.4.	Análisis Modal de Fallas y Efectos.....	67
5.3.5.	Estructura de Descomposición del Trabajo (EDT).....	68
<b>Referencias bibliográficas .....</b>		<b>69</b>
<b>Anexos .....</b>		<b>73</b>



## Lista de tablas

Tabla 1. Composición química del acero 16MnCr5.....	19
Tabla 2. Ensayo de tracción del acero 16MnCr5.....	19
Tabla 3. Ensayo Jominy del acero 16MnCr5.....	20
Tabla 4. Composición química de la aleación de aluminio EN AW-6060.....	20
Tabla 5. Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio EN AW-6060.....	20
Tabla 6. Propiedades mecánicas del PLA según el método ISO 527.....	21
Tabla 7. Propiedades mecánicas del ABS según el método ISO 527.....	21
Tabla 8. Ejemplo de la medición y almacenamiento por PLX-DAQ.....	43
Tabla 9. Duración del acople en el husillo DUO Plus.....	52
Tabla 10. Evaluación de la repetibilidad al utilizar una llave dinamométrica.....	64





## Lista de figuras

Figura 1. <i>Stand</i> de ALLMATIC en la feria EMO Hannover 2017. ....	7
Figura 2. Esquema de funcionamiento de los sistemas de sujeción de Allmatic. ....	12
Figura 3. Un trabajador de Allmatic utilizando el sistema <i>Handhabungsgerät</i> . ....	14
Figura 4. Interfaz del sistema de <i>Handhabungsgerät</i> . ....	15
Figura 5. Gráfica real del proceso de cerrado (SPANNEN) graficada por el interfaz. ..	16
Figura 6. Sistema similar del grupo ROEMHELD. ....	22
Figura 7. Diagrama auxiliar para las nomenclaturas del apartado 3.1. ....	24
Figura 8. Rangos de funcionamiento intermitente. ....	27
Figura 9. Juego de ejes y balancines de la marca Wiedmann. ....	29
Figura 10. Modelo en SolidWorks del primer prototipo <i>Bediengerät</i> . ....	30
Figura 11. Prototipo <i>Bediengerät</i> con el primer diseño de la parte electrónica. ....	33
Figura 12. Primera prueba de funcionamiento del <i>Bediengerät</i> . ....	33
Figura 13. Interfaz de programación del software libre ESCON Studio. ....	36
Figura 14. Disposición de pines del Teensy 3.2. ....	38
Figura 15. Esquemático de la primera placa fabricada. ....	39
Figura 16. Apariencia final del <i>Bediengerät</i> listo para su uso. ....	39
Figura 17. Esquemático final de la placa del <i>Bediengerät</i> . ....	40
Figura 18. Laptop mostrando los datos obtenidos mediante PLX-DAQ. ....	44
Figura 19. Primer resultado gráfico experimental de la tesis. ....	44
Figura 20. Relación lineal de Fuerza-Corriente observada en una prueba manual. ....	46
Figura 21. Perillas del <i>Bediengerät</i> para la definición de parámetros. ....	48
Figura 22. Regresión lineal de las mediciones obtenidas con un husillo TITAN 2. ....	49
Figura 23. Regresión lineal de las mediciones obtenidas con un husillo NC8. ....	50
Figura 24. Regresión lineal de las mediciones obtenidas con un husillo DUO Plus. ....	50
Figura 25. Gráfica experimental de corriente vs tiempo en el husillo NC8. ....	51
Figura 26. Curva de corriente durante el acople del multiplicador en el husillo NC8. ..	52

Figura 27. Proceso tras solución al problema del Kupplung, ejemplo 1. ....	53
Figura 28. Proceso tras solución al problema del Kupplung, ejemplo 2. ....	54
Figura 29. Proceso tras solución al problema del Kupplung, ejemplo 3. ....	54
Figura 30. Arranque satisfactorio bajo límites de corrientes reducidos. ....	55
Figura 31. Límite de arranque modificado en una mordaza DUO Plus. ....	56
Figura 32. <i>Bediengerät</i> montado en la plataforma de torres de sujeción de Allmatic....	61
Figura 33. Prueba de la repetibilidad del <i>Bediengerät</i> con cuarenta repeticiones. ....	64
Figura 34. Cronograma de actividades propuesto en el plan de tesis. ....	67
Figura 35. Estructura de descomposición del trabajo (EDT).....	68



## Introducción

En la industria en general, la productividad y la seguridad son dos temas cruciales que, para ser optimizados, parecen contraponerse. En el diseño mecánico, la tarea del diseñador es construir o mejorar sistemas para aumentar la productividad, respetando las normas internacionales de seguridad industrial. Dentro de dicho marco, la empresa ALLMATIC produce mordazas de sujeción de componentes de fresado, las que cuentan con un multiplicador de fuerza en su interior. Dicho mecanismo permite reducir el torque requerido en el husillo hasta menos de la quinta parte, y mejora así la precisión de la fuerza de sujeción. Sin embargo, para su aplicación en torres de sujeción, a pesar del torque reducido, el uso de una manivela resulta perjudicial para el hombro por lo alto que se ubica el extremo del husillo. Esto limita la cantidad de operarios experimentados, pues con la edad, este movimiento se vuelve aún más complicado. Por la ley alemana, los operarios podrían recibir descanso médico, lo que significa una gran pérdida de productividad. Aunque parezca lo contrario, la productividad y la seguridad siempre van de la mano. Así, el proyecto de la presente tesis se enfocó y logró brindar mejoras en ambos aspectos.



## Capítulo 1

### Estado del arte: Sistemas de sujeción para centros de mecanizado horizontal

En este capítulo se desarrolla una breve reseña histórica sobre las máquinas herramientas, un gran conjunto de sistemas que permiten la fabricación de todas las otras máquinas que requieren el uso de sistemas de sujeción. En el presente trabajo se plantea accionar los sistemas de sujeción destinados al mecanizado horizontal fabricados por ALLMATIC, la empresa en la que dicho trabajo fue realizado.

#### 1.1. Las máquinas herramientas

##### 1.1.1. Definición

La definición de máquina-herramienta engloba una amplia variedad de máquinas dedicadas a fabricar productos o sus componentes. Reciben comúnmente el nombre de “máquinas madre”, porque su función es la fabricación de todas las máquinas, incluyéndose a sí mismas (ICEX España Exportación e Inversiones, 2018).

El nombre de máquina herramienta engloba a cualquier máquina estacionaria accionada por un motor, empleada para conformar piezas metálicas o de otros materiales. Mediante un gran peso y rigidez, permiten la fabricación y acabado de piezas con una alta precisión. Las principales técnicas generales empleadas en su manufactura son: (McGeough & McCarthy, 2019)

- Cortar el exceso de material de la pieza en forma de astillas o virutas. Las máquinas herramientas de este tipo incluyen tornos, conformadoras y cepilladoras, taladros, fresadoras, rectificadoras y sierras eléctricas.
- Cizallar el material.

- Presionar las piezas metálicas para dar la forma requerida; ya sea en frío, como en la fabricación de utensilios de cocina, carrocerías de automóviles y similares con punzonadoras; como en caliente, al rojo vivo en matrices de prensas de forja.
- Aplicar electricidad, ultrasonido o productos químicos corrosivos al material. Esta última técnica incluye los procesos modernos de mecanizado de metales de alta calidad.

### **1.1.2. Historia y evolución**

El torno inventado alrededor de 1751 por Jacques de Vaucanson se puede considerar la primera máquina herramienta de la historia, dado que fue el primero que incorporó el instrumento de corte en una cabeza ajustable mecánicamente, evitando el contacto manual del operario (EcuRed, 2019).

A lo largo de la Historia, las máquinas herramienta utilizaron una variedad de fuentes de energía. La energía humana y la energía animal son opciones posibles, como lo es la energía obtenida a través del uso de ruedas hidráulicas. La primera revolución industrial tuvo su inicio en Gran Bretaña en el siglo XVIII y se expandió al resto de Europa y Norteamérica hasta mediados del siglo XIX. Esto marcó un importante hito en la forma de producir bienes como barcos, carros, muebles y enseres en general.

Antes de la mencionada revolución, la fabricación se realizaba con herramientas de mano. Con la máquina de vapor, elemento base de esta revolución, se empezó a producir con máquinas motorizadas que sólo podían ser fabricadas por máquinas herramienta, dada su capacidad de producir piezas intercambiables de gran precisión dimensional y en grandes cantidades, así como plantillas y accesorios de guía y sujeción. Sin embargo, las primeras versiones de las máquinas de vapor tenían el problema de la imprecisión de las máquinas herramienta, y las perforaciones se hacían de manera imprecisa por máquinas impulsadas por ruedas hidráulicas. Posteriormente, se desarrollarían máquinas herramienta con todas las características fundamentales necesarias para el maquinado de piezas, algunas de ellas eran adaptaciones de máquinas de carpintería (McGeough & McCarthy, 2019).

En 1775 John Wilkinson en Inglaterra construyó una máquina de precisión para mandrinar cilindros de motor. En 1797 Henry Maudslay, también en Inglaterra, construyó un torno de motor para cortar tornillos, que perfeccionó 3 años más tarde para cortar roscas de

varios pasos. El modelador o formadora<sup>1</sup> fue inventado por James Nasmyth, que había trabajado con Maudslay. En 1839, Nasmyth inventó el martinete o martillo de vapor para forjar piezas pesadas. Otro discípulo de Maudslay, Joseph Whitworth, inventó o mejoró un gran número de máquinas herramienta, por lo que, en la Exposición Universal de Londres en 1862, su empresa destacó en el área dedicada a las máquinas herramienta. A pesar de los esfuerzos de Gran Bretaña por mantenerse como líder tecnológico, las herramientas británicas se exportaron a Europa continental y a los Estados Unidos, promoviendo su desarrollo en esos lugares (McGeough & McCarthy, 2019).

Es así como los británicos fueron superados por los norteamericanos, quienes fabricaron en 1818 la fresadora y a mediados del siglo XIX el torno de torreta, totalmente automático en algunas operaciones, como la fabricación de tornillos. Muchos fabricantes construían sus máquinas y equipos con elementos de dimensiones específicas patentadas para evitar que terceros fabriquen sus accesorios. Sin embargo, el empleo de medidas normalizadas permitió la fabricación de componentes en serie y el abaratamiento de las máquinas. Surgieron las fábricas especializadas que beneficiaron en costo y calidad (History & Maps, 2019).

En 1862, el norteamericano J.R. Brown desarrolló la primera fresadora universal. En 1896, su compatriota F.W. Fellows diseñó un moldeador de engranajes que podía producir casi cualquier tipo de engranaje, con lo que varias máquinas de corte de engranajes mejoraron notablemente. A finales del siglo XIX, surgieron las rectificadoras, gracias al uso de los abrasivos artificiales, permitiendo hacer en minutos el trabajo de horas (McGeough & McCarthy, 2019).

Durante el siglo XX ha habido importantes mejoras en las máquinas herramienta y se han introducido técnicas no convencionales, como el maquinado electroquímico y por ultrasonidos (McGeough & McCarthy, 2019). Este desarrollo fue potenciado por la introducción de las cerámicas y los aceros especiales en la fabricación de herramientas. En los años 70 la introducción del control numérico por computador y la robótica poco tiempo después supusieron un fuerte impulso a la industria, permitiendo fabricar productos estandarizados a bajo costo, empleando mano de obra no calificada. Sin embargo, esto tenía la limitación de carecer de la flexibilidad necesaria para variar de productos o de estándares de fabricación, problema que se evitó con el empleo de equipos de control numérico solucionaron estos problemas con máquinas herramienta que podían manejar varias

---

<sup>1</sup> Es una máquina de corte de metal en la que la pieza se sujeta a una mesa y puede ser operada manualmente o accionada mecánicamente en ángulo recto con respecto a la trayectoria de una herramienta de corte.

herramientas simultáneamente y con sensores que permiten conocer las dimensiones de las piezas que se están fabricando, controladas por computadora. Estas máquinas son capaces de pasar de la fabricación de una pieza a otra en el poco tiempo en que se carga el programa informático correspondiente. Estos avances en las máquinas de control numérico han logrado la aparición de nuevas tecnologías de mecanizado que permiten una integración total de los procesos de diseño y fabricación (CAD/CAM). Asimismo, la robótica ha permitido automatizar procesos antes manuales como pintura, ensamblado y atornillado (History & Maps, 2019).

### **1.1.3. Influencia de las MH en el progreso**

La revolución industrial acontecida en el siglo XIX tuvo lugar en los países más avanzados de Europa y América. El uso de la máquina de vapor en la industria y el transporte, la minería y metalurgia intensivas demandaban equipos cada vez más potentes y sofisticados, lo que implicaba todo un reto para los fabricantes de máquinas herramientas (History & Maps, 2019).

A mediados de siglo, herramientas que realizaban de manera totalmente automática algunas operaciones ya auguraban un desarrollo importante para el siglo siguiente, como fue el caso del torno de torreta con la fabricación de tornillos. Ya a finales del siglo XIX el trabajo y la conformación de los metales habían cambiado de manera drástica, revolución que creó las bases para la producción en masa y una sociedad industrializada (McGeough & McCarthy, 2019).

Los países europeos y Estados Unidos basaron su desarrollo en la fabricación y comercialización de máquinas, herramientas y productos industriales y en una carrera armamentista que avanzaba a la par de su industria (History & Maps, 2019).

### **1.1.4. Impacto de los avances tecnológicos en las máquinas herramientas**

Con una posición líder en el mercado mundial, la ingeniería mecánica alemana es una de las ramas más importantes de la industria en Alemania. En 2018, el volumen de ventas de la ingeniería mecánica alemana asciende a unos 233 mil millones de euros. De ello, las ventas en el mercado interno se estimaron en 101 mil millones de euros (Statista, 2019).

Prueba de este liderazgo son las ferias tecnológicas que Alemania realiza en diferentes ciudades, destacando entre las de mayor envergadura (ICEX España Exportación e Inversiones, 2019):

- METAV - Feria Internacional de la Mecanización de los Metales, Düsseldorf (10-14 de marzo de 2020)
- AMB - Feria Internacional del mecanizado de metales, Stuttgart (15-19 de septiembre de 2020)
- EMO - Feria mundial bienal para máquinas herramienta y metalurgia. La feria EMO Hannover, que se acaba de realizar en septiembre de 2019, es la muestra más importante del mundo de las empresas fabricantes de máquinas herramienta. En esta feria se presenta el abanico completo del procesamiento de metal, en el mayor recinto ferial del mundo. Las principales secciones son las de máquinas herramienta, herramientas de precisión, componentes de automatización, así como los sistemas diseñados según las necesidades del cliente. Entre los organizadores se encuentra la asociación alemana de fabricantes de máquina herramienta, VDW. En la Figura 1 se puede observar el Stand de ALLMATIC, la cual participa en la feria.

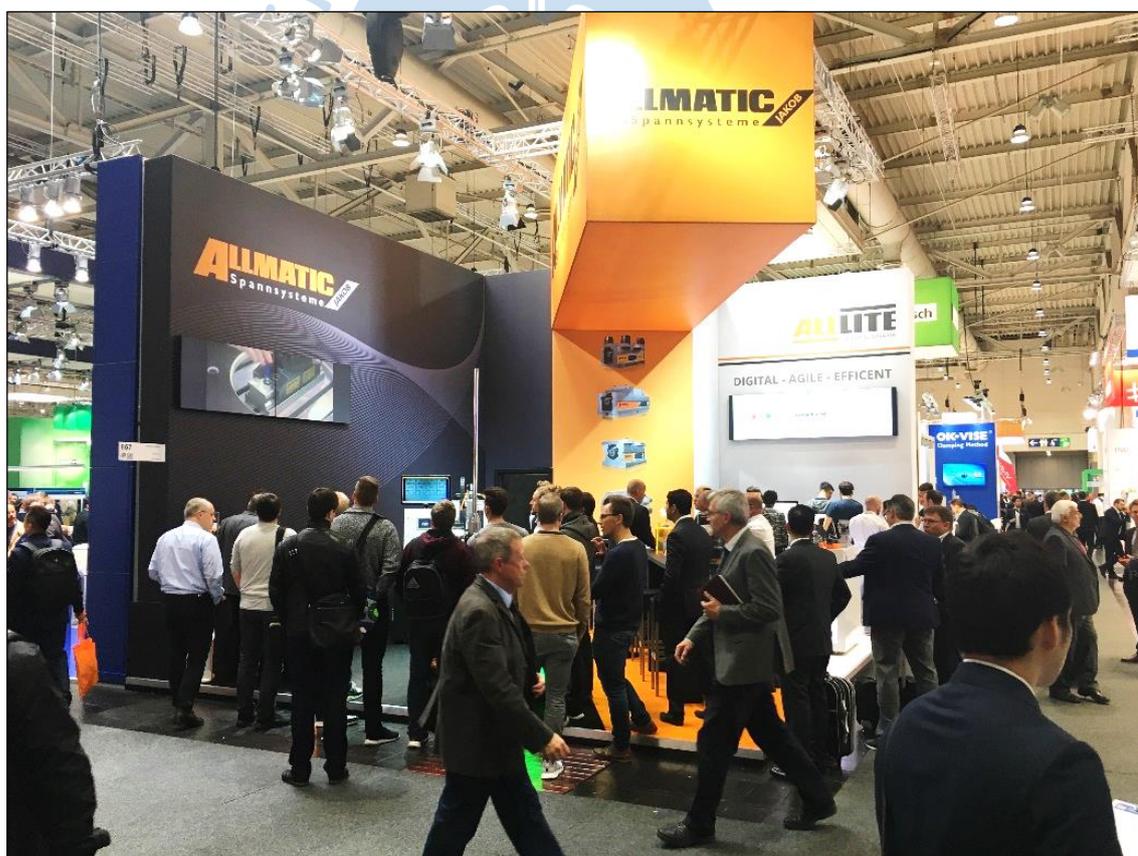


Figura 1. Stand de ALLMATIC en la feria EMO Hannover 2017.  
Fuente: Área de marketing de ALLMATIC.

Como plataforma de innovaciones para la tecnología de producción, en la feria EMO Hannover se han presentado las tendencias previstas para los próximos años. El lema “la

tecnología inteligente impulsa la producción futura” refleja fielmente los desafíos a los que tiene que hacer frente actualmente la industria. Terminología actual como las plataformas de *Internet of Things* (IoT), aplicaciones, *digital twins*, inteligencia artificial (IA) y *Edge and cloud computing* estuvo presente en todo momento en la feria. Asimismo, ha sido en la EMO 2019 donde se han presentado las primeras aplicaciones de IA en la zona de startups y en los stands de las empresas pioneras en esta tecnología (ICEX España Exportación e Inversiones, 2019).

### **1.1.5. Principales tipos de máquinas herramientas**

La industria moderna emplea una amplia gama de máquinas herramienta metálicas, desde pequeñas máquinas montadas en bancos de trabajo hasta enormes máquinas de producción de varios cientos de toneladas. Atendiendo a las características básicas de sus antepasados del siglo XIX y principios del XX, siguen siendo clasificadas de acuerdo con el siguiente esquema: (1) tornos, (2) moldeadoras y cepilladoras, (3) taladros, (4) fresadoras, (5) rectificadoras, (6) sierras eléctricas y (7) prensas (McGeough & McCarthy, 2019).

Algunas máquinas herramienta tienen el objetivo de acelerar la producción. Aunque estas herramientas incluyen características de las máquinas herramienta básicas y realizan las mismas operaciones, incorporan modificaciones que les permiten operar con mayor rapidez. Algunos ejemplos son: (1) tornos de torreta, incluidas las máquinas de tornillo; (2) máquinas de estación múltiple; (3) taladros de conjuntos; y (4) fresadoras de producción (McGeough & McCarthy, 2019).

### **1.1.6. Principales accesorios de las máquinas herramientas**

Los diferentes tipos de máquinas herramienta emplean sus propios accesorios. Sin embargo, la gran mayoría requiere accesorios de sujeción, los cuales pueden ser para la pieza de trabajo o para la herramienta de corte. Entre los primeros, los de mayor utilización son las mordazas. En el acápite siguiente se hará una detallada explicación de este tipo de accesorio.

## **1.2. Las mordazas de máquina**

Como el sistema de la presente tesis fue diseñado específicamente para el accionamiento de mordazas, se presenta a continuación una breve reseña sobre las mordazas de máquina.

### 1.2.1. Definición y descripción

Una mordaza es una herramienta de sujeción. Una mordaza de máquina consta de dos elementos paralelos para sujetar mediante fricción, en forma continua, una pieza de trabajo. En las mordazas mecánicas, una de las bocas está fija y la otra se moviliza mediante un tornillo, una palanca o una leva (Tikkanen, 2019). La parte fija de la mordaza se fijan a una plataforma en la máquina, normalmente mediante pernos. Este tipo de mordazas constan de dos elementos principales:

- **Las bocas:** Estos elementos son los que transmiten la presión hacia la pieza de trabajo. Pueden tener diferentes geometrías de superficie, según la posibilidad de deslizamiento entre la pieza y las bocas durante el fresado. Dicho movimiento es producido por fuerzas paralelas al plano definido por estas caras, las cuales son causadas por el método utilizado para trabajar la pieza, como, por ejemplo, taladrado, fresado, etc. (Chumán, 2017). En las mordazas, una de las bocas estará fija al cuerpo de la mordaza, y recibe el nombre de “boca fija”. La otra boca recibe el nombre de “boca móvil”, y se encuentra montada sobre una plataforma que se traslada linealmente según el tornillo del husillo.
- **El husillo:** Es un tornillo que transforma un movimiento de rotación a movimiento lineal, y el torque de entrada a fuerza axial. Esta fuerza axial es la fuerza que sujeta la pieza para su posterior maquinado, normalmente depende solo de la geometría del husillo, aunque en el caso de las mordazas de la empresa en la que se llevó a cabo la presente tesis, constan de un tercer componente importante, llamado Kraftverstärker, o “Multiplicador de fuerzas”, que se explica más adelante en el apartado 2.1.1.

### 1.2.2. Materiales

Las mordazas utilizadas para sujetar las piezas de trabajo en las mesas de las máquinas-herramienta tienen normalmente bocas de acero templado lisas, aunque se pueden utilizar bocas especiales cuando la sujeción con una boca lisa no es factible (Tikkanen, 2019). El cuerpo de la mordaza suele ser de materiales diferentes, siendo la más común la fundición gris.

### 1.2.3. Normas técnicas

En la Unión Europea, las mordazas de máquina reciben normas similares a las prensas. De las normas y directivas referentes a máquinas, las más relevantes respecto al diseño y operación de mordazas son:

- ISO 12100:2010. Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction (anula a EN 292)
- ISO 13857:2008. Safety of machinery - Safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs.
- EN 692:2005+A1:2009. Machine tools - Mechanical presses - Safety.
- Directiva 2006/42/EC del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea.

#### **1.2.4. Diagnóstico de su funcionamiento**

Las mordazas de máquina para fresado de piezas de gran precisión requieren una fuerza de sujeción específica, que depende de la rapidez con la que el material es removido del bloque de material en bruto. Esto se debe a las vibraciones. Si un material no es adecuadamente fijado, este vibrará durante el fresado, lo que resultará en acabados superficiales muy toscos. Por ello, estas mordazas son accionadas manualmente con llaves dinamométricas. Sin embargo, el torque de entrada es tan alto que se han buscado soluciones alternativas, como el diseño de mordazas con accionamientos hidráulicos. Las mordazas que fabrica ALLMATIC cuentan con multiplicadores de fuerza mecánicos en su interior. De esta manera, el torque de entrada puede seguir siendo aplicado con una llave dinamométrica de manera mucho más sencilla, y alcanzando una repetibilidad superior.

## **Capítulo 2**

### **Proyecto de investigación**

#### **2.1. La empresa ALLMATIC Jakob Spannsysteme GmbH**

ALLMATIC Spannsysteme es una empresa alemana dedicada al diseño y fabricación metalúrgica de sistemas de sujeción para mecanizados de precisión, principalmente fresado. Está ubicada en el sur de Alemania, en un pequeño pueblo llamado Unterthingau, que pertenece al estado de Baviera (o Bayern). Cuenta con 73 trabajadores, entre directivos, ingenieros, técnicos, personal administrativo y otros, además de alrededor de 15 practicantes. Fue fundada en 1973, actualmente factura aproximadamente 510 millones de euros al año, con lo que cae dentro de la clasificación de la Unión Europea de pequeña empresa. Desde el 2001, pertenece a un grupo de 6 empresas medianas llamado Jakob Gruppe, donde todas se dedican a la fabricación de componentes mecánicos para la industria de manufactura. Estas empresas tienen una gran variedad de clientes en toda Alemania, desde empresas gigantes hasta microempresas y negocios personales. Además, las empresas del Jakob Gruppe participan en ferias nacionales de desarrollo tecnológico dedicadas principalmente a universidades e institutos técnicos.

##### **2.1.1. Tipo de industria**

En la industria de la fabricación de piezas metálicas de precisión realizada por máquinas fresadoras, la precisión del mecanismo de sujeción de las piezas que se están maquinando es tan importante como la precisión de las mismas máquinas fresadoras. Las mordazas convencionales para sujeción de piezas son utilizadas ampliamente en todo el mundo. Dichas mordazas se ajustan mediante un torque elevado en el tornillo principal, que se aplica manualmente mediante una palanca de tamaño variable, según la fuerza requerida para la operación. Esta fuerza sobre la pieza depende directamente del torque aplicado manualmente, y la carrera del tornillo es bastante grande, por lo que no se puede alcanzar una precisión o

repetibilidad suficientes para procesos de fabricación por control numérico, debido principalmente a la aparición de vibraciones impredecibles.

Los sistemas de sujeción que fabrica ALLMATIC, son destinados a trabajos que requieren gran precisión. Estos presentan un eje con mecanismos internos que reducen la carrera longitudinal, con los que son capaces de aplicar fuerzas superiores a las de una mordaza convencional, y reducen el torque requerido en el husillo hasta menos de la quinta parte. Dichas cualidades brindan una elevada precisión y repetibilidad en la sujeción.

### 2.1.2. Productos comerciales

Los principales productos de la empresa son los sistemas de sujeción con multiplicador de fuerzas (*Kraftverstärker*), cuyo diseño es información confidencial. Estos se ubican en el interior del tornillo mayor de la mordaza, consisten en sistemas reductores de carrera longitudinal, que son presionados axialmente en un extremo por un segundo husillo interno, mientras su otro extremo se desplaza hasta cinco veces menos. Este desplazamiento reducido es transmitido directamente hacia la pieza mediante las bocas de mordaza, y se le conoce como “Carrera útil”. Este proceso se puede apreciar esquemáticamente en la Figura 2:

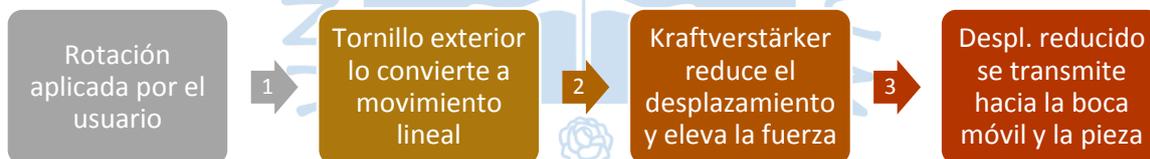


Figura 2. Esquema de funcionamiento de los sistemas de sujeción de Allmatic.  
Fuente: Elaboración propia.

Los sistemas de sujeción se pueden agrupar en tres tipos, según su mecanismo de multiplicación de fuerza:

- **Gripp:** Esta es la serie de mordazas diseñada para la sujeción versátil. Puede aplicar la presión mediante caras planas (sujeción convencional) o mediante pequeñas garras que se incrustan en la pieza (Gripp). Para ello, esta serie de mordazas consta de una elevada carrera útil en el husillo (entre 2.7 y 3.8 mm).
- **NC:** Esta serie de mordazas surgió de la fusión de las antiguas mordazas LC y TC de Allmatic. Consta de una limitación de sujeción regulable en 4 niveles, aunque por ello, su carrera útil es de 1.35 mm, por lo que es utilizable solo para sujeción convencional.
- **HD:** Las siglas provienen de Hoch Drück. Son mordazas diseñadas para elevadas presiones, como su nombre lo indica en alemán. Su carrera útil es aprox. 1 mm.

El multiplicador de fuerzas se ubica en el interior del husillo, y es acoplado en el momento que la boca móvil inicia el apriete de la pieza de trabajo. El tornillo convencional deja de rotar, y el movimiento de rotación es ahora convertido en desplazamiento por un segundo tornillo interno. Dicho tornillo presiona un extremo del multiplicador de fuerzas, quien se desplaza menos en su otro extremo, debido a su geometría interna patentada. De esta forma, logra aumentar la fuerza axial aplicada sobre la pieza, y disminuir el torque de entrada requerido.

Adicionalmente, la empresa se dedica a la fabricación de productos adicionales que ofrecen una amplia gama de posibilidades a los clientes. Entre dichos productos, destacan:

- Torres de sujeción: Consisten en Monoblocks sobre los que se puede instalar los diferentes tipos de husillos anteriormente mencionados.
- Repuestos y complementos para sus propios sistemas de sujeción.
- Clamp assist: Tecnología desarrollada conjuntamente por Allmatic y la empresa Tecnotron, para supervisar la fuerza de sujeción sobre las piezas de la mordaza durante el proceso de mecanizado (Vasquez, 2019). Este sistema en la versión 2.0 utiliza Bluetooth 5.0.

### 2.1.3. Proyectos

Las empresas alemanas suelen contar con un área dedicada a la actualización de sus diseños existentes y al desarrollo de nuevos productos. Dicha área es conocida en alemán como *Konstruktion*, o en español referida como “área de desarrollo”. Esta área en Allmatic cuenta con varios proyectos de desarrollo e investigación, entre ellos, el proyecto que abarca la presente tesis: *Bediengerät*<sup>2</sup>. Como parte del área de desarrollo el tesista tuvo a cargo la dirección de dicho proyecto. Esto incluyó todas las actividades realizadas para la presente tesis, con libertad de decisión, pero bajo la asesoría del jefe del área de desarrollo. Esta área también se encarga de que los sistemas en actual comercialización cumplan con las normas de seguridad laboral actuales pertinentes.

La tercerización de procesos es ampliamente común, y su ventaja principal es la realización de cada actividad por especialistas en dicha área. Sin embargo, el abuso de tercerización también puede acarrear largos tiempos de espera y elevados costos de desarrollo. En Allmatic se apunta hacia el desarrollo *Low Cost* que, mediante la integración de un grupo

---

<sup>2</sup> *Bediengerät* significa “Dispositivo de operación” o “Actuador”, este término será utilizado en el presente documento para referirse al sistema diseñado.

de investigación variado en habilidades y conocimientos, y la reducción sustancial de la tercerización, alcanza tiempos y costos reducidos sin sacrificar calidad. Además, se acumula *Know How*, lo que asegura una diferencia competencial importante en el mercado.

## 2.2. Proyecto antecedente “*Handhabungsgerät*”

Este proyecto, cuyo nombre alemán significa “Dispositivo de manejo”, sirve de referencia para el diseño del *Bediengerät*. Fue realizado mediante la tercerización a la empresa Knestel Elektronik. Dicho proyecto inició en 2011 a cargo de Thomas Bader, jefe de proyecto y trabajador de la firma Knestel.

Se presenta en la Figura 3 un trabajador de Allmatic utilizando el sistema de dicho proyecto, en el mismo lugar donde posteriormente se ha instalado el sistema desarrollado en la presente tesis.



Figura 3. Un trabajador de Allmatic utilizando el sistema *Handhabungsgerät*.  
Fuente: (Allmatic, 2012).

### 2.2.1. Alcance

El proyecto *Handhabungsgerät* abarcó las siguientes actividades (Allmatic, 2012):

- Análisis del comportamiento de los sistemas de sujeción de Allmatic
- Diseño del control mediante medición de corriente
- Diseño del sistema mecánico
- Diseño y programación de un panel de control
- Selección de los rieles de soporte
- Cumplimiento de Normas DIN-EU / Análisis de riesgos

- Características del producto: 24VDC, rango de temperatura 0-60°C, panel con 6 botones y display de 128x64, mango con botón, comunicación RS232 para control y configuración, rieles para absorción de momentos

### 2.2.2. Funcionamiento

El sistema *Handhabungsgerät* es capaz de aplicar hasta 40 Nm sobre el husillo. El dispositivo debe estar montado sobre rieles lineales. Consta de una interfaz con los botones mencionados a continuación y presentados en la Figura 4 (Allmatic, 2012):

- **Botones “+” y “-”:** El par de desconexión del comando “SPANNEN” es seleccionable mediante estos botones. Esto se realiza gráficamente mediante la observación de una línea gruesa en el display.
- **Botón ZU:** Desplaza al husillo en el sentido de las agujas del reloj con un par de apriete relativamente bajo hasta que se produzca la resistencia, es decir, se alcance el embrague de desembrague. Este proceso se realiza con el motor a 3400 rpm.
- **Botón SPANNEN:** Tensa el Kraftverstärker (multiplicador de fuerza) en el sentido de las agujas del reloj hasta que se alcance el par seleccionado. La curva de par se muestra gráficamente en la pantalla. Este proceso se realiza con el motor a 2000 rpm. Si el botón se suelta antes de alcanzar el par seleccionado, el dispositivo se detiene y muestra error en el display.
- **Botón LÖSEN:** Giro contrario a las agujas del reloj con un par relativamente bajo hasta que el embrague se acople de nuevo. Este proceso se realiza con el motor a 1800 rpm.
- **Botón AUF:** Giro contrario a las agujas del reloj con un par relativamente bajo hasta que se suelte el botón. Este proceso se realiza con el motor a 3000 rpm.



Figura 4. Interfaz del sistema de *Handhabungsgerät*.  
Fuente: (Allmatic, 2012).

La caja reductora del proyecto fue el “*Minigetriebemotoren Reihe G2*”, de la empresa Heytec *Antriebstechnik*. Dicha caja reductora sólo contaba con un torque nominal de 30 Nm. Por ello, fue modificada mediante el intercambio de uno de sus engranajes de dientes rectos. En la documentación (Allmatic, 2012) se muestran varias modificaciones que fueron probadas, todas ellas con una relación de transformación de alrededor de  $i = 120$ .

Esto significa que, el proceso de cerrado de mordazas sin carga sería realizado a una velocidad angular del husillo de 28,33 rpm, y al apriete de la pieza a 16,67 rpm. La Figura 5 presenta una gráfica real del proceso de cerrado (SPANNEN).

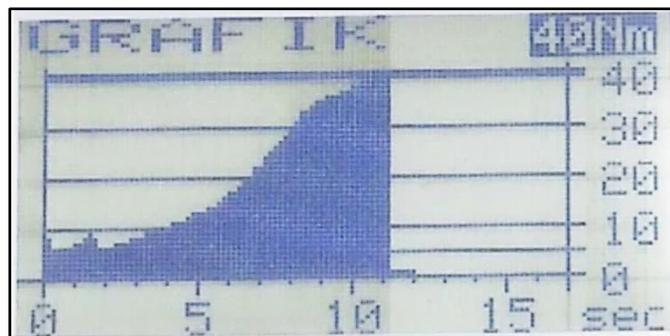


Figura 5. Gráfica real del proceso de cerrado (SPANNEN) graficada por el interfaz.  
Fuente: (Allmatic, 2012).

Como se puede apreciar, se requieren 11 segundos para completar el cerrado (SPANNEN). Esto no toma en cuenta el tiempo que se tarda en mover la boca móvil hasta entrar en contacto con la pieza (ZU). Este tiempo de operación se compara en el capítulo 5, de análisis de resultados, con el período de operación obtenido en el proyecto de la presente tesis.

### 2.2.3. Mejoras propuestas por los autores

Mediante la cooperación entre Allmatic y Knestel, se culminó el proyecto en un producto comercial y se propuso una lista de mejoras que el proyecto no llegó a incorporar (Allmatic, 2012):

- Reducción de los botones de control
- Enchufe de control para la extensión opcional del brazo
- Posición segura del dispositivo para los sistemas de plataforma intercambiable
- Instalación del programa (Nueva electrónica)
- Montaje con baterías (Funcionamiento autónomo)
- Conexión mediante internet para diagnósticos

- USB para actualización de software, diagnóstico, etc.
- Comunicación Profibus o Wireless (RS232 - UNIGATE)
- Automatización
- Enchufe para alimentación

### 2.3. Proyecto “*Bediengerät*”

La presente tesis forma parte del proyecto *Bediengerät*, que pertenece al área de desarrollo de ALLMATIC. La tesis y el proyecto comparten los mismos objetivos, que son presentados en este apartado. El proyecto *Bediengerät* planteó el diseño de un sistema que reemplace al del proyecto antecedente. El tesista recibió del proyecto todas las herramientas, piezas, acceso a información y otros beneficios necesarios para la culminación de los objetivos comunes.

#### 2.3.1. Objetivos

El objetivo principal de la presente tesis es diseñar un producto comercial consistente en un sistema electromecánico para el accionamiento práctico y ergonómico de las torres de sujeción de la empresa ALLMATIC, que reemplace el accionamiento mediante manivela, para evitar la fatiga a las articulaciones del hombro y espalda alta de los operarios. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos que incluyen mejoras respecto del proyecto previo:

- **Programación de un control más práctico y eficiente.** El antiguo tiene cuatro botones, y requiere de cuatro comandos: dos para cerrar la mordaza y presionar la pieza, y otros dos para liberar la presión y abrirla. El nuevo diseño debe realizar la sujeción con un solo comando y liberar la pieza con otro, es decir, un total de dos comandos. Por otro lado, debe ser más rápido, se plantea operar al máximo permitido por la norma de seguridad, y debe presentar una repetibilidad suficiente para las exigencias del proceso.
- **Diseño ergonómico e industrial.** La motivación principal del proyecto es reemplazar un proceso manual tedioso, consistente en girar la manivela en una posición incómoda, con un sistema tan ligero y versátil como sea posible. El producto está orientado a reemplazar también al actuador electromecánico actual de la empresa mencionado anteriormente.
- **Evaluación de la conveniencia de una medición de momentos.** Esto implica una serie de pruebas en el sistema con medición de corriente para evaluar su desempeño en

repetibilidad y precisión frente a los grandes costos adicionales de agregar un sensor de momentos para cerrar el lazo, reemplazando esta función de la medición de corriente. Las dos exigencias principales son la repetibilidad a lo largo del tiempo, para que el sistema no requiera ser calibrado frecuentemente, y la precisión en la sujeción, cuyo valor de error permisible es de  $\pm 1\text{kN}$ .

- **Diseño modular.** Es la más importante de todas las propuestas. Se da prioridad al uso de piezas estándar, y se busca que todo quede correctamente documentado. De este modo, se facilita la adaptación del sistema a aplicaciones similares en proyectos futuros, especialmente si el proyecto es tomado por un diseñador distinto. El antiguo diseño contó con una documentación poco precisa, planos u otra información de utilidad, lo que exigió empezar el nuevo diseño desde cero, tanto en la parte mecánica como en la electrónica.
- **Reducción de costos.** Al simplificar al diseño mediante piezas estándar y componentes más prácticos, se reduce los costos de fabricación y mantenimiento. La meta planteada se orienta al costo de fabricación del producto final, y se establece en 2000 € (7473 soles peruanos), que es el costo de fabricación del Handhabungsgerät.

### 2.3.2. Método del trabajo

El tesista definió el alcance y los parámetros de diseño a partir del planteamiento de mejoras con respecto al proyecto *Handhabungsgerät*, cálculo matemático de resistencia de materiales, y consultas con los *Stakeholders*, o clientes potenciales. Se inició con una semana en el taller de montaje de la empresa, para familiarizarse con los mecanismos existentes en las mordazas, como los multiplicadores de fuerza.

Ya teniendo una visión más completa del problema por resolver, se definió un cronograma de actividades bastante específico, que se presenta en la Figura 34. Dicho cronograma no solo sirvió para fijar plazos, sino para esquematizar las actividades que debían ser realizadas durante la estadía en la empresa. Esto fue crucial, pues muchas actividades exigen tiempos de espera, como la fabricación de piezas metálicas o el pedido de componentes electrónicos. Gracias a este cronograma, se pudo coordinar tareas de modo que se aproveche el tiempo disponible de manera óptima. El presupuesto fue definido por el jefe del área, según se presenta en el apartado 5.3.3.

Se procedió luego a seguir el cronograma lo mejor posible. Mediante cálculo matemático se definió una referencia suficiente para seleccionar los componentes de compra, y luego en SolidWorks diseñar algunas piezas necesarias para el montaje de los componentes

escogidos. Cuando se terminaron las piezas, las piezas plásticas fueron fabricadas mediante impresión 3D, y para las piezas metálicas se dibujaron planos con cotas y tolerancias, que fueron enviados al taller de la empresa para su fabricación, lo que tardaría alrededor de 1 mes y medio. Durante la espera de esta etapa, se inició la planificación del método de control, escogiendo también las herramientas por utilizar. Se diseñó y fabricó una tarjeta electrónica de acuerdo con lo planificado. Cuando esta tarjeta fue terminada, llegaron los componentes mecánicos, y se procedió a montar el primer modelo del *Bediengerät*.

Con este modelo, se realizaron muchas pruebas para la programación de un código efectivo que cumpla con los objetivos propuestos. Dichas pruebas fueron realizadas de manera manual tanto como automática. Una gran cantidad de ciclos de cerrado y apertura de mordaza permitió evaluar la repetibilidad, el diseño de las piezas mecánicas, etc.

Finalmente, se diseñó una carcasa ergonómica en impresión 3D, y se agregó componentes de control adicionales para interactuar con los parámetros de control sin requerir una laptop.

### 2.3.3. Características mecánicas de los materiales utilizados

Se utilizaron dos materiales metálicos. Uno de ellos fue el acero de cementación 16MnCr5 (nomenclatura DIN) o 1.7131 (nomenclatura EN 10084:2010). Los aceros de cementación están diseñados para recibir un endurecimiento superficial y mantener su núcleo con una elevada tenacidad.

Su composición química se presenta en la Tabla 1, sus características frente al ensayo de tracción en la Tabla 2 y su templabilidad Jominy en la Tabla 3.

Tabla 1. Composición química del acero 16MnCr5.

Análisis sobre colada						
Contenido (%)						
C	Si	Mn	P <sub>máx.</sub>	S <sub>máx.</sub>	Cr	Cu <sub>máx.</sub>
0,14 - 0,19	0,15 - 0,40	1,00 - 1,30	0,025	0,035	0,80 - 1,10	0,40

Fuente: (Ipargama, 2019)

El otro material metálico fue la aleación de aluminio EN AW 6060. Este material puede ser endurecido y anodizado. Tiene una resistencia promedio entre las aleaciones de aluminio endurecibles, pero destaca su resistencia a la corrosión (Thyssenkrupp, 2019).

Su composición química se presenta en la Tabla 4, y sus propiedades mecánicas se resumen en la Tabla 5.

Tabla 2. Ensayo de tracción del acero 16MnCr5.

Ensayo de tracción <sup>1)</sup>				
Estado de cementación simulada <sup>2)</sup>				
Diámetro nominal (mm)		d ≤ 16	16 < d ≤ 40	40 < d ≤ 100
Límite elástico	R <sub>p0,2</sub> (Mpa)	≥735	≥637	≥490
Resistencia a la tracción	R <sub>m</sub> (MPa)	930 - 1225	784 - 1078	637 - 930
Alargamiento	A (%) L <sub>0</sub> =5d	≥9	≥10	≥12
Estricción	Z (%)	≥35	≥35	≥40

1) Ensayo realizado sobre probeta templada a 870-930° C y revenida a 200° C.

2) Características a título orientativo.

Fuente: (Ipargama, 2019)

Tabla 3. Ensayo Jominy del acero 16MnCr5.

Templabilidad Jominy <sup>1)</sup>														
Distancia desde el extremo (mm)		1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40
	Dureza HRC <sup>2)</sup>	máx.	47	46	44	41	39	37	35	33	31	30	29	28
	min.	39	36	31	28	24	21	-	-	-	-	-	-	-

1) Temperatura de austenización de la probeta de ensayo: 880°C.

2) Los valores de dureza se calculan a las distancias señaladas desde el extremo templado de la probeta.

Fuente: (Ipargama, 2019)

Tabla 4. Composición química de la aleación de aluminio EN AW-6060.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0,30-0,6	0,10-0,30	≤ 0,10	≤ 0,10	0,35-0,6	≤ 0,05	≤ 0,15	≤ 0,10	Rest

Fuente: (Thyssenkrupp, 2019)

Tabla 5. Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio EN AW-6060.

Designación de estado	Espesor t [mm]	Límite elástico	Tensión de rotura	Alargamiento de rotura		Dureza <sup>1)</sup> HBW
		R <sub>p0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	A [%]	A <sub>50</sub> [%]	
T4	≤ 25	≥ 60	≥ 120	≥ 16	≥ 14	50
T5	≤ 5	≥ 120	≥ 160	≥ 8	≥ 6	60
	5 < t ≤ 25	≥ 100	≥ 140	≥ 8	≥ 6	60
T6	≤ 5	≥ 150	≥ 190	≥ 8	≥ 6	70
	5 < t ≤ 25	≥ 140	≥ 170	≥ 8	≥ 6	70
T64	≤ 15	≥ 120	≥ 180	≥ 12	≥ 10	60
T66	≤ 5	≥ 160	≥ 215	≥ 8	≥ 6	75
	5 < t ≤ 25	≥ 150	≥ 195	≥ 8	≥ 6	75

Fuente: (Thyssenkrupp, 2019)

Para las impresiones 3D, se utilizaron dos tipos de materiales. El primero es el Ácido Poliláctico (PLA), un material muy versátil, de alta precisión dimensional y buen acabado superficial. Ofrece una buena resistencia a la tracción, aunque no es adecuado para

aplicaciones con temperaturas superiores a 50°C (Ultimaker, 2019). Sus propiedades mecánicas se pueden observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Propiedades mecánicas del PLA según el método ISO 527.

	Valor típico
Módulo de elasticidad a la tracción	2346,5 MPa
Esfuerzo de tracción a la deformación	49,5 MPa
Esfuerzo de tracción a la rotura	45,6 MPa
Alargamiento a la deformación	3,3 %
Alargamiento a la rotura	5,2 %

Fuente: (Ultimaker, 2019)

El otro material de impresión fue el Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Este es un material muy conocido por sus excepcionales propiedades mecánicas, pues cuenta con gran adhesión entre capas de impresión (Ultimaker, 2019). Sus propiedades mecánicas se pueden observar en la Tabla 7.

Tabla 7. Propiedades mecánicas del ABS según el método ISO 527.

	Valor típico
Módulo de elasticidad a la tracción	1681,5 MPa
Esfuerzo de tracción a la deformación	39,0 MPa
Esfuerzo de tracción a la rotura	33,9 MPa
Alargamiento a la deformación	3,5 %
Alargamiento a la rotura	4,8 %

Fuente: (Ultimaker, 2019)

#### 2.3.4. Normas de seguridad que rigen el diseño del *Bediengerät*

- EN 692:2005+A1:2009. Machine tools - Mechanical presses - Safety.
- ISO 12100:2010. Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction (anula a EN 292)

- ISO 13849-1:2015. Safety of machinery - Safety-related parts of control systems - Part 1: General principles for design.

#### 2.4. Otros sistemas similares

En la empresa Allmatic, existen dos sistemas para la automatización del accionamiento de las mordazas. El primero recibe el nombre de *AutoClamp*, un proyecto que sigue en desarrollo y permite al usuario controlar electrónicamente el husillo con un control de posición y un sistema motor-caja reductora implementados en la propia mordaza. Tiene un objetivo distinto, por lo que se aprecia muchas ventajas en términos de control y supervisión por encima del *Bediengerät*, pero solo permite el accionamiento del husillo sobre el que está montado. El segundo sistema se llama *Hydraulisch*, y es un husillo comercial, con un cabezal que permite realizar la sujeción mediante presión hidráulica por parte de una unidad de bombeo. “*El ajuste continuo de la fuerza de sujeción se realiza regulando la presión hidráulica en la unidad hidráulica, y el ajuste aproximado del margen de cierre se realiza a través de una herramienta.*” (Allmatic, 2019).

Existen otros sistemas para accionar husillos, como uno de la empresa *HILMA* del grupo *ROEMHELD*, que presenta una funcionalidad muy similar a la del presente proyecto, como se puede apreciar en la Figura 6. El grado de complejidad es, sin embargo, muy inferior al del *Bediengerät*. Esto se debe a que está diseñado para accionar husillos “convencionales”, es decir, sin mecanismos internos de multiplicación de fuerza. El sistema del *Bediengerät* permite controlar las mordazas de Allmatic que cuentan con un “*Kraftverstärker*”, cuyas implicaciones se presentan en detalle en el diseño del método de control.



Figura 6. Sistema similar del grupo ROEMHELD.  
Fuente: (ROEMHELD Gruppe, 2017)

## Capítulo 3

### Diseño y fabricación de un prototipo

La parte central de la presente tesis muestra el proceso seguido para obtener un prototipo, cuyo diseño mecánico se mantendría casi inalterado durante la realización de pruebas. Este capítulo se centra en el diseño mecánico, mientras que la parte electrónica se presenta a detalle en el capítulo siguiente. Los apartados a continuación se presentan en orden cronológico.

#### 3.1. Cálculo de parámetros principales

El punto de partida fue una mordaza *Gripp* (ver 2.1.2), específicamente la TITAN 2 M. Las especificaciones comerciales de dicha mordaza se pueden encontrar en la página web oficial de la empresa, y como Anexo 1 (Allmatic, 2019). Dichas especificaciones, en conjunto con algunas pruebas preliminares y la documentación del proyecto anterior, sirvieron de base para seleccionar varios parámetros de diseño.

Los parámetros de diseño en esta primera etapa fueron:

- Obtención de un torque de salida de 30 Nm
- Velocidad lineal máxima de 10 mm/s en la boca móvil (EN 692:2005+A1:2009)
- Ninguna modificación a las piezas estándar
- Aplicación del torque en el eje vertical a una altura aproximada de 1,80 m
- Mínimo peso posible, alrededor de 5 kg
- Precisión de la fuerza obtenida entre las bocas de  $\pm 1$  kN (margen de error de  $\pm 2,5\%$ )
- Repetibilidad del torque de salida en el tiempo
- Accionamiento de la mordaza mediante un dado hembra hexagonal de 14 mm
- Uso de rieles lineales del almacén de la empresa

Esos parámetros son utilizados y mencionados en el resto de la presente tesis. Luego de su planteamiento, la primera acción realizada fue la definición de los componentes que primer sistema requeriría en su totalidad:

- Motor
- Caja reductora
- Llave hembra hexagonal
- Rieles de la empresa
- Base para montar el sistema a los rieles
- Acoples
- Botones eléctricos
- Placa electrónica
- Impresión 3D para montar la placa sobre el sistema

A continuación, se presentan los cálculos realizados para, partiendo de los parámetros de diseño, obtener las especificaciones requeridas para una correcta selección de componentes de compra y el diseño de componentes de fabricación. En dichos cálculos, se refiere con 1 al punto entre el motor y la caja reductora (rotación rápida), con 2 entre la caja reductora y el husillo de la mordaza (rotación lenta), y con 3 a la *Spindelmutter*, o base de la boca móvil (traslación). Esto se puede apreciar de manera esquemática en la Figura 7.

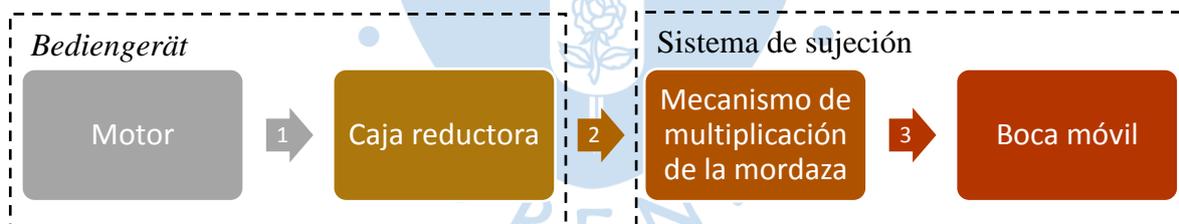


Figura 7. Diagrama auxiliar para las nomenclaturas del apartado 3.1.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1. Torque en el motor

El punto de partida es la caja reductora PLE060-032, de la compañía Neugart. Como se mencionó anteriormente, la caja reductora del proyecto de referencia es una de engranajes rectos. Es una caja grande, ruidosa y pesada, además de que tuvo que someterse a modificaciones internas para su uso. Se planteó como punto de partida el uso de una caja reductora epicicloidal, o de engranajes planetarios. La caja reductora de Neugart PLE060-032 (Neugart, 2017) ya se encontraba en almacén de la empresa por otro proyecto de

investigación, por lo que se decidió tomarla como punto de partida para los cálculos que se presentan a continuación:

Relación de transformación de la caja reductora ( $n$ ):  $n = 32$

Torque objetivo ( $T_2$ ):  $T_2 = 30 \text{ Nm}$

Torque que debe brindar el motor ( $T_1$ ):

$$T_1 = \frac{T_2}{n} = \mathbf{939 \text{ mNm}}$$

### 3.1.2. Velocidad angular en el motor

Este cálculo busca conocer la velocidad máxima del motor (antes de la reducción de velocidad) teniendo en cuenta la velocidad máxima permitida por la norma europea, y utilizando la caja reductora antes mencionada de relación de velocidad  $n = 32$ .

El punto de partida es la velocidad lineal ( $V_3$ ) permitida de hasta 10 mm/s en la boca móvil de la prensa (EN 692:2005+A1:2009).

Paso de la rosca del husillo ( $p$ ):  $p = 6 \text{ mm/vuelta}$

Velocidad angular en la llave hexagonal ( $\omega_2$ ):

$$\omega_2 = \frac{V_3}{p} = 1,667 \text{ vueltas/s} = 100 \text{ rpm}$$

Velocidad angular en el motor ( $\omega_1$ ):

$$\omega_1 = \omega_2 * n = \mathbf{3200 \text{ rpm}}$$

### 3.1.3. Potencia pico y corriente pico del motor

Las especificaciones de los motores suelen señalar potencia o torque continuo. Para la presente aplicación, el torque máximo solo se produce durante un breve instante comparado al ciclo de trabajo. Por ello, se optará por estimar un ciclo de trabajo para realizar la selección del motor. Para ello, el valor de potencia pico ( $P_1$ ) y corriente de pico ( $I_1$ ) serán útiles.

Punto de partida:  $V_{CC} = 24 \text{ V}$

Potencia pico ( $P_1$ ):

$$P_1 = T_1 * \omega_1 = 314,66 \text{ W}$$

Corriente pico ( $I_1$ ):

$$I_1 = \frac{P_1}{V_{CC}} = 13,1 \text{ A}$$

Entre los objetivos y propuestas de la presente tesis, se menciona utilizar un motor de 48 V en vez de uno de 24 V. La corriente calculada se puede considerar bastante elevada, y cabe mencionar que el dispositivo será utilizado también en mordazas que exigen un mayor torque que TITAN 2. Además, este cálculo no considera las importantes pérdidas mecánicas y eléctricas en los componentes del sistema. Por ello, en la práctica la corriente sería con seguridad, superior a los 13,1 A calculados. De esta manera, se calcula la corriente pico ideal para un motor de 48 V:

$$I_1 = \frac{P_1}{V_{cc}} = 6,6 \text{ A}$$

### 3.1.4. Sección del eje principal

El diámetro del eje de salida del *PLE060* es de 14 mm, por lo que se toma como punto de partida este diámetro para el eje de la llave hexagonal. No habría ventajas apreciables en reducir su valor por debajo de estas dimensiones.

Punto de partida: Diámetro (D) de 14 mm, radio (c) de 7 mm.

Inercia del eje ( $I_e$ ):

$$I_e = \left(\frac{\pi}{32}\right) * D^4 = 3771,5 \text{ mm}^4$$

Esfuerzo máximo ( $\sigma$ ):

$$\sigma = \frac{M_2 * c}{I_e} = \frac{30000 \text{ N mm} * 7 \text{ mm}}{3771,5 \text{ mm}^4} = 55,7 \text{ MPa}$$

Se consideró realizar el cálculo de vida útil ante fatiga, pero dado el bajo valor de esfuerzo máximo comparado a la fluencia del 16MnCr5 templado y revenido (900 MPa) se consideró innecesario.

### 3.1.5. Corriente a carga continua

Como se mencionó en el apartado 3.1.3, el torque máximo solo se produce durante un breve instante comparado al ciclo de trabajo. Para estos casos, la empresa Maxon Motor dispone al cliente un método para estimar ciertos parámetros útiles en la selección del motor.

En la Figura 8 se presenta un cálculo de Maxon Motor para seleccionar el motor para aplicaciones que requieran un funcionamiento de corta duración. Acompañando a dicha Figura, se presenta en el Catálogo la ecuación para relacionar cuatro parámetros importantes:  $I_{ON}$  (corriente en operación),  $I_N$  (Corriente nominal del motor),  $T$  (Período del ciclo) y  $t_{ON}$  (Tiempo de operación).

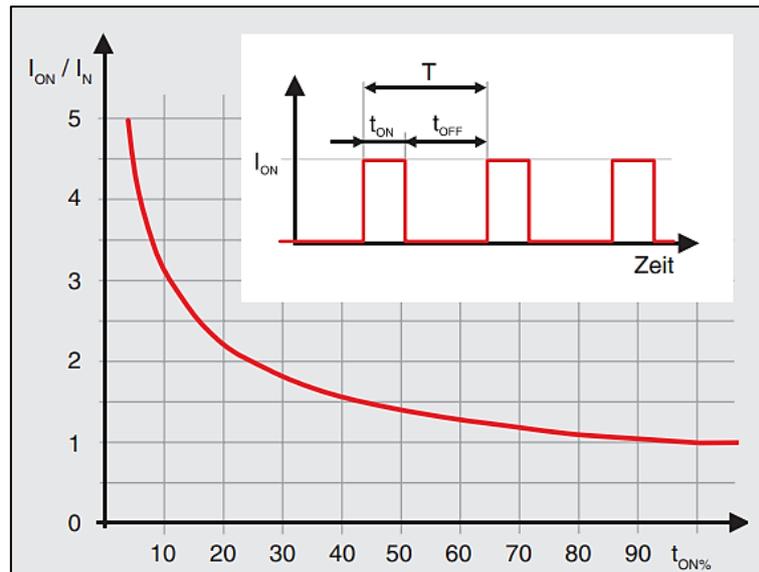


Figura 8. Rangos de funcionamiento intermitente

Fuente: "Micromotores y sistemas de alta precisión" (Maxon Motor, 2019, pág. 56)

Con dicha ecuación, se puede estimar el valor de corriente nominal que debe tener el motor para cumplir su función de manera adecuada.

$$I_N = I_{ON} * \sqrt{\frac{t_{ON}}{T}}$$

La sujeción mediante un TITAN 2 toma entre 1 a 3 vueltas en completarse, dependiendo de la pieza a sujetar. Esto equivale a alrededor de  $t_{ON} = 2$  s, si se realiza a  $\omega_2 = 100$  rpm.

Para estimar el período del ciclo T, se realizaron dos estimaciones:

- El jefe del taller manifestó que se estima que el sistema debería ser utilizado unas 100 mil veces hasta que aparezca una falla. Además, manifestó que, en una empresa alemana promedio, se realiza la apertura y cierre de mordazas de alrededor de 80 mil veces al año (según la cantidad de piezas fabricadas). En Alemania el año 2019 tiene 220 días laborales, y se trabaja 7,6 horas diarias. Esto resulta en un período de ciclo estimado en:

$$T = \frac{220 \text{ días} * 7,6 \text{ h} * 60 \text{ min}}{80 \text{ 000 ciclos}} = 1,3 \text{ min/ciclo}$$

- Se acudió al taller en Allmatic donde se instalaría el sistema, y se observó que los trabajadores del taller tardan 5 minutos para la sujeción de la pieza de fresado con mayor utilización del Bediengerät, y realizan el cerrado de la mordaza 4 veces. Esto se debe a que primero colocan la pieza sin centrar, luego se acoplan piezas de centrado progresivamente, uno tras otro, para realizar los centrados correspondientes de la pieza

con respecto del sistema de sujeción. Estos acoples exigen desajustar y reajustar la pieza en el sistema de sujeción. Esto resulta en un período medio de **1,25 min/ciclo**.

De esta manera, se asume un período de ciclo menor a las estimaciones, de  $T = 1$  min. La corriente admisible en carga continua que debe superar el motor 48 V es:

$$I_{N,Titan\ 2,ideal} = I_{ON,Titan\ 2,ideal} * \sqrt{\frac{t_{ON}}{T}} = 6,6\ A * \sqrt{\frac{2\ s}{60\ s}} = 1,2\ A$$

Posteriormente se supo, mediante experimentación, que la mordaza *DUO Plus* exige la máxima corriente de las mordazas de Allmatic. Este valor real de corriente fue de 12,67 A, lo que da lugar a:

$$I_{N,DUO\ Plus,real} = I_{ON,DUO\ Plus,real} * \sqrt{\frac{t_{ON}}{T}} = 12,67\ A * \sqrt{\frac{2\ s}{60\ s}} = 2,3\ A$$

### 3.2. Selección de componentes de compra

En esta sección se explica el razonamiento seguido para la selección de los componentes de compra, de acuerdo con los cálculos realizados en la sección anterior.

#### 3.2.1. Motor

La empresa Maxon Motor fabrica motores eléctricos para aplicaciones variadas. Ofrece una línea de motores *EC Flat*, motores sin escobillas que destacan por su forma aplanada y bajo peso respecto de los otros modelos para equivalente torque. Las siglas en inglés “EC” hacen referencia a Conmutación Electrónica. El catálogo presenta en la línea *EC Flat*, motores que van desde Ø 10 mm hasta Ø 90 mm, y de 0,5 W hasta 600 W (Maxon Motor, 2019).

Entre las páginas 267 y 269 del catálogo de Maxon Motor (Maxon Motor, 2019), se presentan los motores *EC flat Ø60 mm*. Se escogió dicho diámetro por los siguientes motivos:

- El motor de diámetro inmediato inferior (Ø45 mm) no satisface el criterio de  $I_N > 1,2\ A$
- Es el mismo diámetro de la caja reductora que se planeaba utilizar.
- Hay mordazas de Allmatic que exigen mayor torque que TITAN 2 (como DUO Plus)
- Los cálculos ignoran las pérdidas mecánicas y eléctricas

Entre los motores de Ø60, existen tres opciones, con potencias nominales: 100 W, 150 W y 200 W; cada uno en las opciones de voltaje: 12 V, 24 V y 48 V. Maxon Motor tiene su propia línea de servocontroladores llamada ESCON. Para minimizar el costo del controlador, se opta por minimizar la corriente, y, por lo tanto, se elige usar un motor de 48 V.

De los tres motores de 48 V, el de menor capacidad (100 W) tiene un valor de corriente nominal de **2,61 A**, que supera a los parámetros  $I_{N,Titan\ 2,ideal}$  y  $I_{N,DUO\ Plus,real}$  calculados en la sección 3.1.5 del presente capítulo.

Finalmente, se selecciona así el motor EC flat Ø60 48V 100W, cuyo código de producto del catálogo Maxon Motor es **647692**. En referencias se presenta el catálogo “*Micromotores y sistemas de alta precisión*” (Maxon Motor, 2019) donde aparece la ficha técnica del motor escogido.

### 3.2.2. Controlador

Maxon Motor recomienda utilizar sus controladores ESCON. Dicha familia de servocontroladores ofrece varios controladores según la potencia requerida y las condiciones de trabajo. Considerando la corriente nominal, corriente máxima, peso, disipación de temperatura y protección contra ambientes hostiles (grasa, polvo), se decide utilizar el **ESCON Module 50/8 HE**. En referencias se presenta la página de catálogo “*ESCON Overview*” donde aparece dicho controlador (Maxon motor, 2018).

### 3.2.3. Ejes de absorción de momentos

El proyecto antiguo abarcó la compra de un juego de ejes y balancines de la marca Wiedmann. Dichos ejes se encuentran ampliamente sobredimensionados y, por tanto, muy costosos. Por ello, se planea como mejora una nueva selección o un propio diseño de los ejes para que se ajusten mejor a las demandas de la presente aplicación. Para la presente tesis, se utilizó este juego de ejes y balancines que ya estaba en el almacén de Allmatic (Figura 9).



Figura 9. Juego de ejes y balancines de la marca Wiedmann.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. Diseño y fabricación de piezas

Debido a que el modelo busca ser ergonómico, económico, ligero y modular, se utilizó la mínima cantidad de material posible. El proceso seguido para fabricar una pieza en la empresa es el siguiente:

- Realizar el diseño en SolidWorks
- Realizar el plano y asignar tolerancias
- Seleccionar un material “en bruto” de los materiales Allmatic
- Imprimir y enviar al área de producción

Los pasos de este proceso son detallados más adelante en esta misma sección. Cabe mencionar que se fabricó varias piezas durante el desarrollo de la presente tesis, y no todas fueron finalmente utilizadas. Las piezas que sí fueron utilizadas en el modelo preliminar se pueden observar en la Figura 10, y fueron las siguientes:

- Placa de presión / Drückplatte
- Acople 14 mm / Kupplung 14 mm
- Eje auxiliar / Hilfswelle
- Extensión / Verlängerung
- Impresiones 3D / 3D-Druckteile

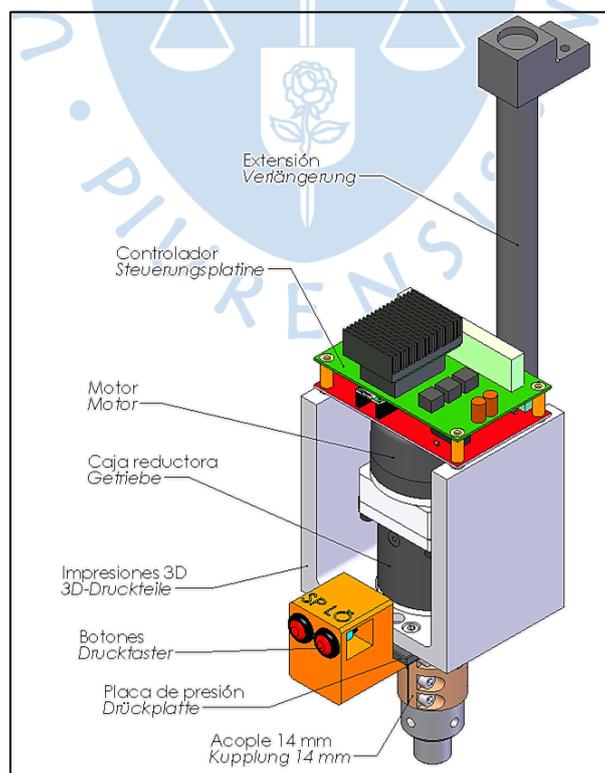


Figura 10. Modelo en SolidWorks del primer prototipo *Bediengerät*.  
Fuente: Elaboración propia.

La placa de presión es aquella pieza sobre la cual se monta el sistema Motor – Caja reductora, la pieza de impresión 3D, y el eje de extensión. Ella se encarga de transmitir el momento de reacción hacia los ejes de apoyo. El acople fue diseñado siguiendo los diseños de acoples comerciales, pero se prefirió fabricar uno para optimizar las dimensiones. El eje auxiliar sirve para montar el dado hexagonal utilizado para transmitir el torque hacia el husillo del sistema de sujeción.

La extensión es una barra soldada a ambos extremos con unas piezas que se encargan de anexas la placa de presión con los ejes. Finalmente, las impresiones 3D no transportan fuerzas del sistema. Su función es sostener las placas electrónicas, botones, diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés) y otros componentes para el control del motor.

### **3.3.1. Diseño en SolidWorks**

La realización de los diseños en SolidWorks exigió un gran número de modificaciones. El diseño en software es una herramienta muy útil que permite optimizar tamaños al observar los ensamblajes de manera interactiva mediante las relaciones de posición. Además, hizo sencillo ir agregando progresivamente diferentes elementos según se consideraba necesario, como agujeros roscados o redondeos para evitar concentración de esfuerzos.

### **3.3.2. Elaboración de planos y asignación de tolerancias**

Para la elaboración de planos, lo más destacable fue la designación del tipo de acabado superficial. Por defecto, si una cota no es acompañada por sus tolerancias, se aplican las de una tabla ubicada en el rotulado del plano. De la misma forma con el acabado superficial, que se le asignó un valor de 2.2, que hace referencia a la máxima desviación entre los puntos de una cara, en micrómetros. Este acabado genera una superficie bastante lisa al tacto y a la vista.

### **3.3.3. Selección del “material en bruto”**

La empresa cuenta con varias máquinas de torneado, fresadoras, y centros de torneado-fresado. El material en bruto se tiene en largas barras con secciones circulares y rectangulares de diferentes tamaños.

En el área de diseño se tiene un catálogo con todas las presentaciones de material que se tiene en el área de producción. De esta manera, para escoger un material, se trata de seleccionar aquella barra del material deseado que requiera retirar la mínima cantidad posible de material mediante mecanizado.

### 3.3.4. Impresión y fabricación

Ya teniendo los planos listos, se envían al área de producción, donde se asigna la pieza a alguno de los trabajadores del área. Cada uno de ellos se encarga de la producción de cierta pieza en su totalidad: al recibir un plano, realiza la programación de la secuencia para el control numérico de la máquina por utilizar (fresadora, torno, etc.). Luego, se solicita el material en bruto y se realiza los procesos que ha programado. Finalmente, la pieza pasa al área de control de calidad para evaluar el cumplimiento de las tolerancias establecidas por el diseñador.

Según el nivel de prioridad, las piezas pueden estar listas en un período entre 2 a 6 semanas. Si la pieza requiere algún tipo de tratamiento térmico, entonces es enviada a una empresa externa, ya que es el único proceso de fabricación que Allmatic no realiza. Esto puede hacer que las piezas demoren una semana más en ser terminadas. Las piezas del presente proyecto fueron entregadas en 5 semanas, tiempo que se aprovechó para el desarrollo de la parte electrónica, tema que es abarcado en el siguiente capítulo.

### 3.4. Prototipo resultante

Mientras se esperaba la fabricación de las piezas mecánicas, se procedió al diseño de la parte electrónica que se explica en el siguiente capítulo. Convenientemente, para el momento en el que todas las piezas estuvieron listas y fueron recibidas del taller, ya se contaba con una placa electrónica. Entonces, dichos componentes fueron inmediatamente montados en el “*Versuchsraum*” (Salón de pruebas) de Allmatic, y se equipó también los componentes electrónicos mediante una impresión 3D sencilla y sin fines estéticos. La parte mecánica no volvió a ser modificada hasta después de terminada la tesis, pues permitió obtener resultados experimentales confiables con todos los husillos Allmatic con los que fue probado: TITAN 2, NC8 y DUO Plus. Posterior a la culminación de la tesis, se realizaron apenas cambios menores para reemplazar los rieles de compensación de momentos mencionado en el apartado 3.2.3 del presente capítulo. En la Figura 11 se muestra el prototipo resultado de la parte mecánica, acompañado del primer sistema de control.

Dicho sistema de control sólo contaba con dos botones, cuyas funciones eran abrir y cerrar las mordazas, y permitía al usuario mediante un puerto serial definir el límite de corriente al que el motor debía detenerse.

Para dar por concluida la etapa de la tesis del diseño mecánico, se comprobó que el sistema era capaz de aplicar el torque necesario en los diferentes sistemas de sujeción. Dado que cada una de las tres mordazas (TITAN 2, NC8 y DUO Plus) tiene mecanismos internos

distintos, cada una requiere un valor diferente de torque de entrada para suministrar la misma fuerza de 40 kN entre las bocas de mordaza. Por ello, para esta prueba se utilizó un sensor de fuerza entre las bocas, y se verificó que el sistema alcance los 40 kN en cada uno de los tres sistemas mencionados. Para cada una de las mordazas, se elevó progresivamente el valor de corriente límite hasta observar la fuerza deseada, de manera que no se produzcan daños en la mordaza por exceso de carga. El husillo que exigió mayor corriente para generar 40 kN entre sus bocas fue el DUO Plus, de 12 A, mientras el NC8 fue el que exigió la menor, de 5.4 A.



Figura 11. Prototipo *Bediengerät* con el primer diseño de la parte electrónica.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 12 se observa al husillo NC8, que aplica presión sobre el sensor de fuerza, y a su lado izquierdo, la interfaz del sensor de fuerza con una lectura de 42,41 kN.



Figura 12. Primera prueba de funcionamiento del *Bediengerät*.  
Fuente: Elaboración propia.



## Capítulo 4

### Diseño e implementación del método de control

El diseño del control estuvo fuertemente influenciado por muchos de los parámetros calculados en el apartado 3.1 del capítulo anterior, buscando cumplir con todos los objetivos planteados en el apartado 2.3.1. Para mantener el bajo costo del sistema de control, se planteó como lineamiento el lograr un control preciso y repetible en el tiempo, sin necesidad de un costoso sensor de momentos sobre el eje.

Para que el control fuera preciso, fueron necesarios los siguientes puntos:

- Que la medición de corriente sea tan limpia como sea posible.
- Que la medición sea en tiempo real y el lazo tenga un bajo tiempo de respuesta.
- Que la mordaza genere una relación lineal entre corriente límite y fuerza obtenida.

Para que el control fuera repetible en el tiempo, fueron importantes los siguientes puntos:

- Que la mordaza presente un comportamiento constante en el tiempo.
- Que la refrigeración del sistema *Bediengerät* (motor y placa) sea elevada.
- Que el diseño de las piezas mecánicas explicado en el apartado 3.3 haya sido correcto para que no se presente desgaste o fatiga.

En este capítulo se detalla en orden cronológico el proceso seguido para la implementación del lazo de control del *Bediengerät*. El punto de partida fue el controlador ESCON de Maxon Motor, a quien a partir de ahora se le referirá como “Módulo Escon”. Su ficha técnica se incluye en Referencias como “*ESCON Module 50/8 HE Hardware Reference*” (Maxon motor, 2018).

#### 4.1. Planificación del control

El módulo Escon es un controlador que se alimenta a 48V, y acepta entradas digitales y analógicas. Permite al diseñador la configuración de los puertos, mediante un software propio

de la misma empresa, el “ESCON Studio”. Una captura de la interfaz de dicho programa se puede observar en la Figura 13.

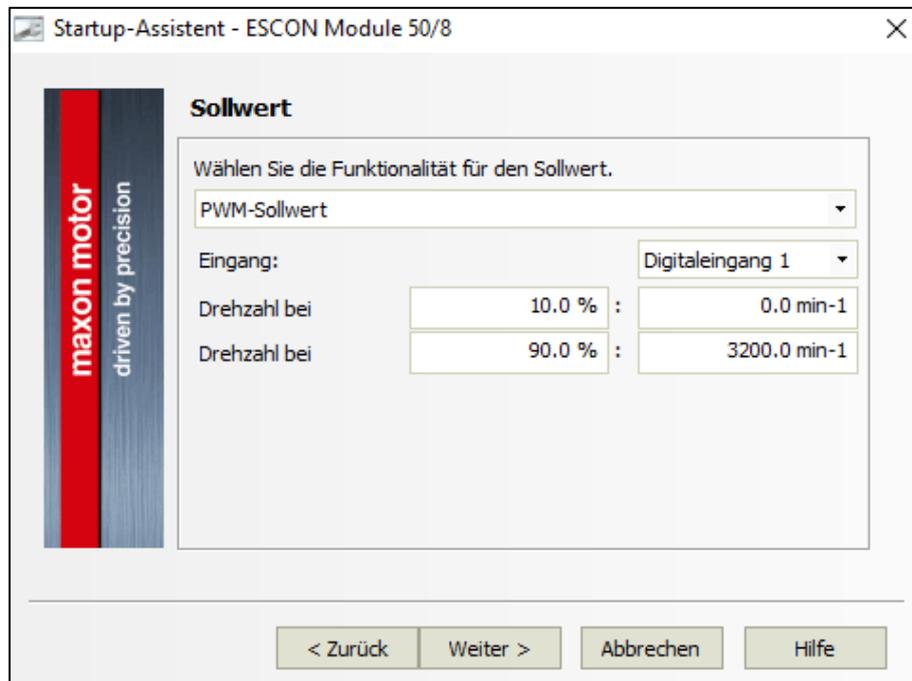


Figura 13. Interfaz de programación del software libre ESCON Studio.  
Fuente: Elaboración propia.

El módulo Escon consta de tres modos de controlador: Por corriente a lazo cerrado, por velocidad a lazo abierto, y por velocidad a lazo cerrado.

El control por velocidad a lazo cerrado es la opción más adecuada para el proyecto, debido a lo siguiente:

- Se puede mantener al sistema siempre al límite de velocidad permitido por norma (EN 692:2005+A1:2009). Si fuera por corriente, entonces la velocidad resultante dependería de las pérdidas mecánicas de cada husillo individual.
- El Módulo Escon permite el control de sus parámetros mediante otro controlador como un Arduino. Además, brinda salidas digitales y analógicas de varios parámetros en tiempo real, como es el caso del valor de corriente instantánea. De esta forma, el lazo de control por corriente se cierra a través de un controlador adicional, que le indica al Módulo Escon cuándo detenerse.
- El lazo de control por velocidad a lazo abierto exigía una calibración con carga, cosa que no es factible debido a que, como se ha mencionado anteriormente, los tres tipos de husillos evaluados tienen comportamientos distintos en cuanto a torque y carrera interna.

El primer prototipo fue pensado para realizar pruebas, y por ello no abarcó detalles de interfaz que mejorarían la experiencia del usuario, como LED indicadores de estado, alarmas, *Display* o perillas para ajustar ciertos parámetros.

## 4.2. Diseño y fabricación de tarjeta electrónica

Los parámetros de diseño para la tarjeta electrónica y el código fueron:

- Dos botones de contacto NA (normalmente abierto) para realizar la apertura y cierre de la mordaza
- Cerrado del lazo de corriente en un procesador aparte al Módulo Escon
- Alimentación desde la misma fuente que alimenta al Módulo Escon, de 48 VDC. Así, ambas tarjetas se alimentan de la misma fuente y no una de la otra. Este punto tiene como fin el evitar la transmisión de ruidos de las señales de modulación por ancho de pulsos (PWM, por sus siglas en inglés) a las mediciones, y aplicar “buenas prácticas” en tarjetas de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés).
- Evaluación del ruido en la medición de corriente del Módulo Escon para el diseño de un filtro pasa-bajo.
- Unión de tierras con el Módulo Escon.

### 4.2.1. Componentes y herramientas

El programa utilizado para el diseño fue el *software* libre “KiCAD”. Este *software* permite trabajar un diseño esquemático de los componentes y conexiones que se deseen, para posteriormente escoger de una librería las “huellas” de cada componente. Estas huellas son diagramas en tamaño real de los componentes, y se ubican de manera interactiva en el mismo *software* KiCAD.

El diseño de la primera tarjeta, si bien debía seguir todos los parámetros mencionados, fue bastante sencillo, pues su único objetivo fue la prueba del método de control planificado. El procesador utilizado fue el Teensy 3.2, un *Development Board* con el mismo lenguaje de programación del Arduino, de la empresa PJRC, con ciertas ventajas de funcionamiento como dimensiones y capacidad de procesamiento. Su voltaje de operación es de 3.3 V, pero debe ser alimentado a 5V, de manera que el procesador realiza el rectificado de tensión. La mayor facilidad es que sigue utilizando el mismo entorno de Arduino para programar y cargar el código a la tarjeta mediante un cable USB. En la Figura 14 se presenta la disposición de los pines de dicho procesador, a quien se refiere abreviadamente en adelante como “Teensy”.



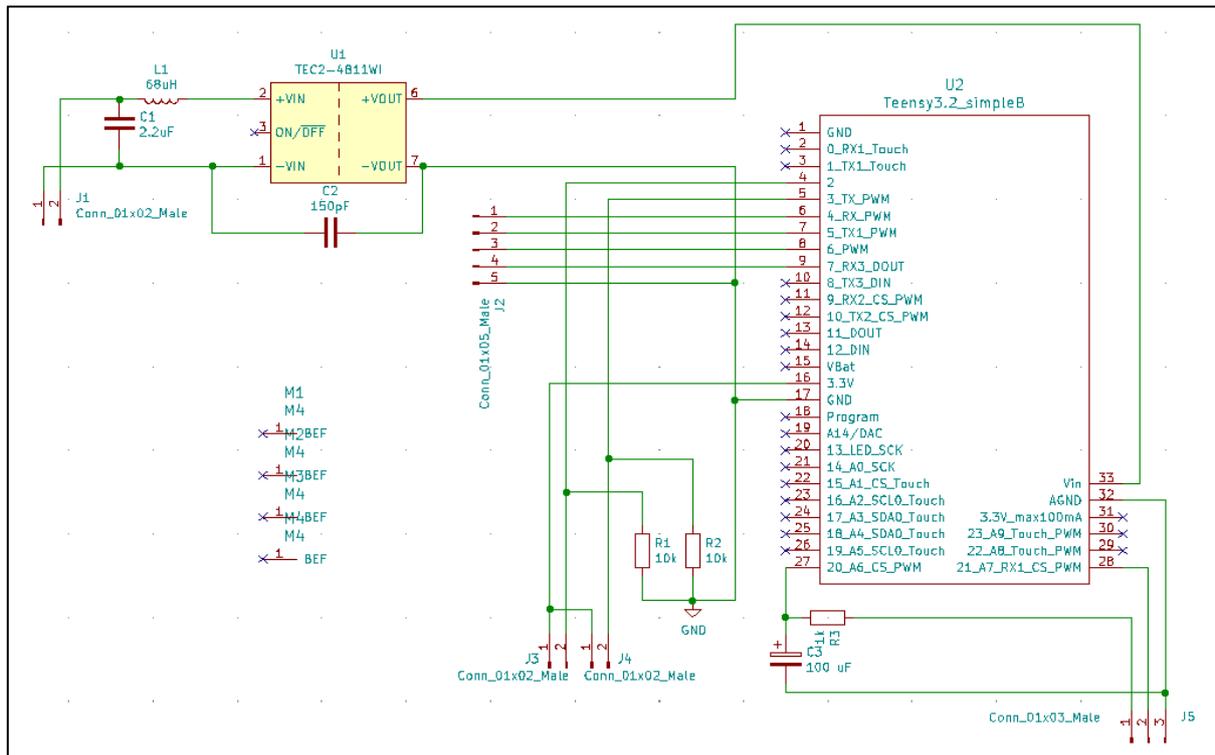


Figura 15. Esquemático de la primera placa fabricada.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 16. Apariencia final del *Bediengerät* listo para su uso.  
Fuente: Elaboración propia.

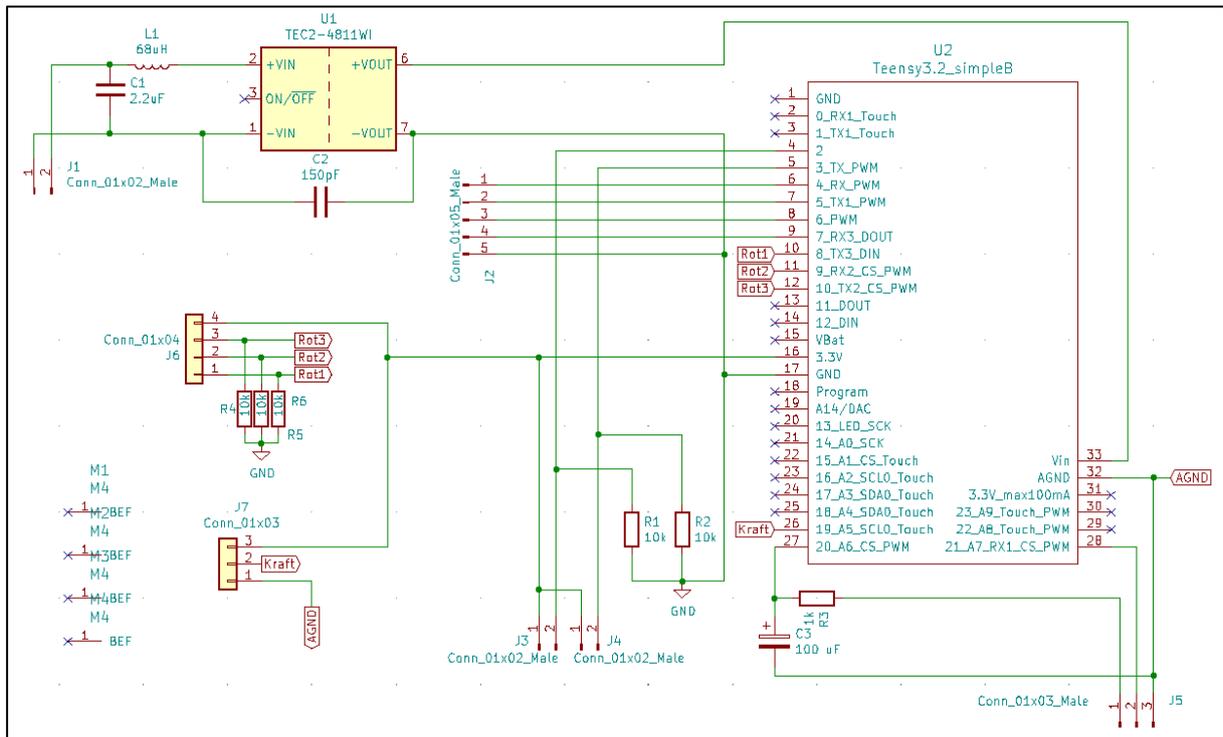


Figura 17. Esquemático final de la placa del *Bediengerät*.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2. Metodología

El Módulo Escon realiza un control de la velocidad a lazo cerrado, y puede suministrar hasta un máximo de 15 A de corriente instantánea, como protección al sistema. El motor entonces recibirá la corriente que sea necesaria para girar a la velocidad exigida. Se configuró al sistema para que realice una aceleración constante de 3200 rpm/s, lo que hace que el sistema alcance en 1 segundo su velocidad máxima permitida por norma, calculada en el apartado 3.1.2. Esta aceleración permite al usuario realizar un avance lento de la boca móvil mediante la pulsación intermitente del botón. Esto es de mucha utilidad cuando el usuario desea colocar piezas en bocas *Gripp* (de contacto dentado) o para piezas que requieren un proceso de centrado de varios pasos.

El Módulo Escon permite extraer lecturas de varios parámetros internos. Para la experimentación, fueron importantes la medición de corriente y la velocidad instantáneas en el motor. El Teensy recibe mediante los puertos analógicos, las lecturas de dichos parámetros, que son extraídos mediante el puerto serial del Teensy hacia el puerto USB de una laptop. Mediante el software de Arduino se graficó dichos parámetros en tiempo real y se observó la respuesta del sistema en corriente y en velocidad ante la carga del husillo TITAN 2.

Mediante un complemento para Excel llamado PLX-DAQ, de software libre, se puede conectar una hoja de Excel al puerto serial del Teensy. Este complemento recibe las líneas

que el Teensy envía mediante `Serial.print()`, y las almacena como celdas en Excel. Un salto de fila puede ser realizado mediante `Serial.println()`.

Por otro lado, se utilizó el sensor de Fuerzas Ahlborn, colocándolo entre las bocas de la mordaza. Su medición se puede observar en la interfaz del sensor, y también puede ser extraído mediante comunicación serial. En este caso, se utilizó un código en Python para la lectura y almacenamiento de dichas mediciones, y también envía dichos datos hacia un archivo de Excel, en simultáneo y de manera independiente al proceso del PLX-DAQ.

Se consideró relevante también conocer la energía consumida por el sistema desde su inicio hasta que haya alcanzado la fuerza deseada, con fines de evaluar la repetibilidad en el tiempo y el consumo energético del sistema. Este valor es calculado mediante una integración por el método de los trapecios en el Teensy.

Finalmente, se agregó a la boca móvil un sistema de medición de desplazamiento que está diseñado para balancear ejes. Se evaluó los desplazamientos máximos obtenidos en la boca móvil luego de retirar la fuerza, para evaluar si dicho parámetro guardaba relación con las fluctuaciones de la medición de fuerza observadas en el sensor Ahlborn.

En resumen, las mediciones extraídas fueron:

- **Teensy – PLX-DAQ:** Corriente instantánea en el motor, velocidad instantánea en el motor y energía consumida en el ciclo de cerrado.
- **Python:** Fuerza obtenida entre las bocas de mordaza en cada ciclo de cerrado, posición inicial relativa de cada ciclo.

Cabe destacar que todas las mediciones mencionadas no fueron implementadas inmediatamente, sino que en cada prueba se fue realizando pequeños cambios y agregando progresivamente dichas mediciones según se veía conveniente. Por ejemplo, no fue hasta la cuarta prueba donde recién se comenzó a medir la fuerza entre las bocas.

### 4.3. Pruebas preliminares

El objetivo principal de las pruebas realizadas fue conocer el comportamiento de los parámetros mencionados durante el proceso de cerrado de la mordaza TITAN 2. Sin embargo, también se deseaba conocer la capacidad mecánica de mantener un desempeño constante a lo largo del tiempo y la vida de las piezas diseñadas. Por ello, se decidió que lo más apropiado era programar un itinerario de funcionamiento automático, donde el sistema trabaje día y noche en constante apertura y cierre de bocas de mordaza. Por ello, se pueden diferenciar dos tipos de pruebas realizadas durante esta etapa de la tesis.

#### 4.3.1. Pruebas en “Modo manual”

Son aquellas realizadas directamente por el usuario presionando los botones para abrir y cerrar la mordaza en tiempo real. Estas pruebas se enfocaron en la observación de fenómenos inmediatos, aquellos que se pueden observar en el primer proceso de cerrado desde que se modifica el código. Por ejemplo, la modificación del límite de corriente para obtener una fuerza distinta, o la inclusión de cierto fragmento de código para alterar el funcionamiento del lazo.

El procedimiento seguido en este tipo de pruebas consistió en modificaciones sucesivas del código, es decir, cada cambio que funcionaba de manera correcta se mantenía y cada cambio que no resultaba como se esperaba era eliminado. De esta manera, solo se contó con un código que recibió constantes modificaciones. Además, se implementó también de manera continua los resultados positivos de las pruebas en “Modo automático”, concepto que se detalla a continuación.

#### 4.3.2. Pruebas en “Modo automático”

Son pruebas de larga duración, con un itinerario específico según la información que se deseaba extraer. Estas pruebas tuvieron una duración de uno a tres días, todas realizando un ciclo de cierre-apertura de mordaza por minuto. De este modo, se realizaron aproximadamente 15 000 ciclos, lo que sirvió también para evaluar el comportamiento de los componentes mecánicos ante la fatiga. Las mediciones fueron almacenadas automáticamente en la memoria de una laptop que estuvo conectada al *Bediengerät* en todo momento, solo recibiendo la información que Teensy y los otros sensores le enviaban. Todo el itinerario de la prueba estuvo implementado en el programa del Teensy, por lo que el *Bediengerät* era capaz de realizar dichas pruebas incluso sin tener la laptop conectada, pero de esta forma no almacenaba ningún dato de medición.

En total, se realizaron 12 pruebas automáticas. El código utilizado para cada prueba sí se conservó, a diferencia de las pruebas en “Modo manual”. Los resultados de dichas pruebas permitieron ir agregando sucesivamente porciones satisfactorias de código al programa de las pruebas de control manual. Cada prueba se enfocó en un cambio en específico, tal como se menciona a continuación:

1. Prueba de almacenamiento con husillo TITAN 2
2. Almacenar el máximo valor de corriente (aporte descartado)
3. Almacenar la energía total del ciclo mediante integración de corriente
4. Medición y almacenamiento de fuerza mediante Python-Excel

5. Control del husillo NC8
6. Relación de la corriente de parada vs fuerza obtenida
7. Aumento del tiempo de muestreo
8. Control del husillo DUO Plus
9. Curva F-I en TITAN 2
10. El problema del *Kupplung*
11. Curvas F-I en los tres husillos superando el problema del *Kupplung*
12. Un solo código capaz de controlar los tres husillos

El primer tipo de medición mencionado, es decir, el que se realizó mediante el puerto serial del Teensy, almacenó valores medidos por el Escon. Los resultados de la primera prueba estuvieron enfocados en verificar la correcta extracción de valores, comprobar que el tiempo de muestreo es adecuado, y verificar que el sistema mecánico puede funcionar durante toda la noche sin fallar. Los resultados observados en el archivo de Excel, generados por la extensión PLX-DAQ tuvieron una apariencia como se puede apreciar en la Tabla 8.

Tabla 8. Ejemplo de la medición y almacenamiento por PLX-DAQ.

Time	Second	State	Current[mA]	Speed[rpm]	TCycles
13:23:08	3,988	SPANNEN	0	0	1
13:23:09	4,016	SPANNEN	775	16	1
13:23:09	4,047	SPANNEN	452	17	1
13:23:09	4,078	SPANNEN	1034	19	1
13:23:09	4,109	SPANNEN	1066	23	1
13:23:09	4,141	SPANNEN	840	25	1
13:23:09	4,172	SPANNEN	1002	26	1
13:23:09	4,203	SPANNEN	840	31	1
13:23:09	4,230	SPANNEN	1002	32	1

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, el tiempo de muestreo seleccionado fue de 31 ms, aunque en algunos casos este era realizado tras 27 ms. Esto fue corregido a partir de la séptima prueba automática, ya que además se consideró necesario reducir el tiempo de muestreo. En la Figura 18 se observa la pantalla de la laptop utilizada con el PLX-DAQ en funcionamiento.

La primera gráfica experimental de la presente tesis se puede observar en la Figura 19. En ella, es posible observar los fenómenos más importantes de la programación, que se describen a continuación.

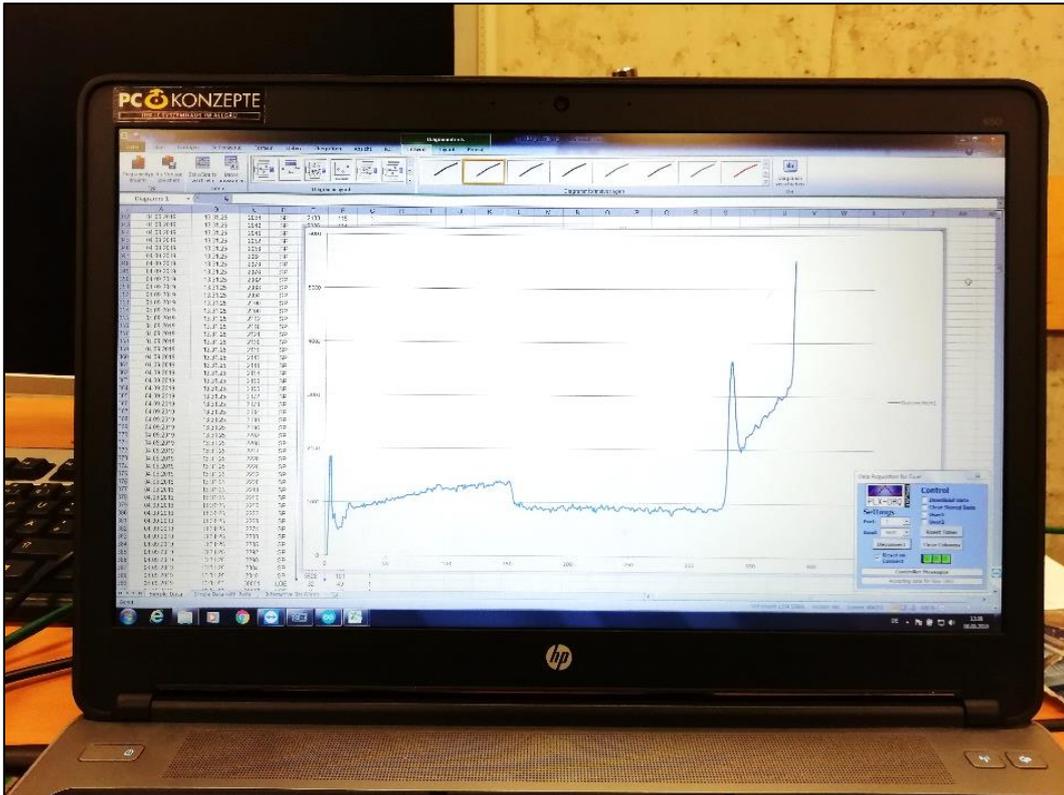


Figura 18. Laptop mostrando los datos obtenidos mediante PLX-DAQ.  
Fuente: Elaboración propia.

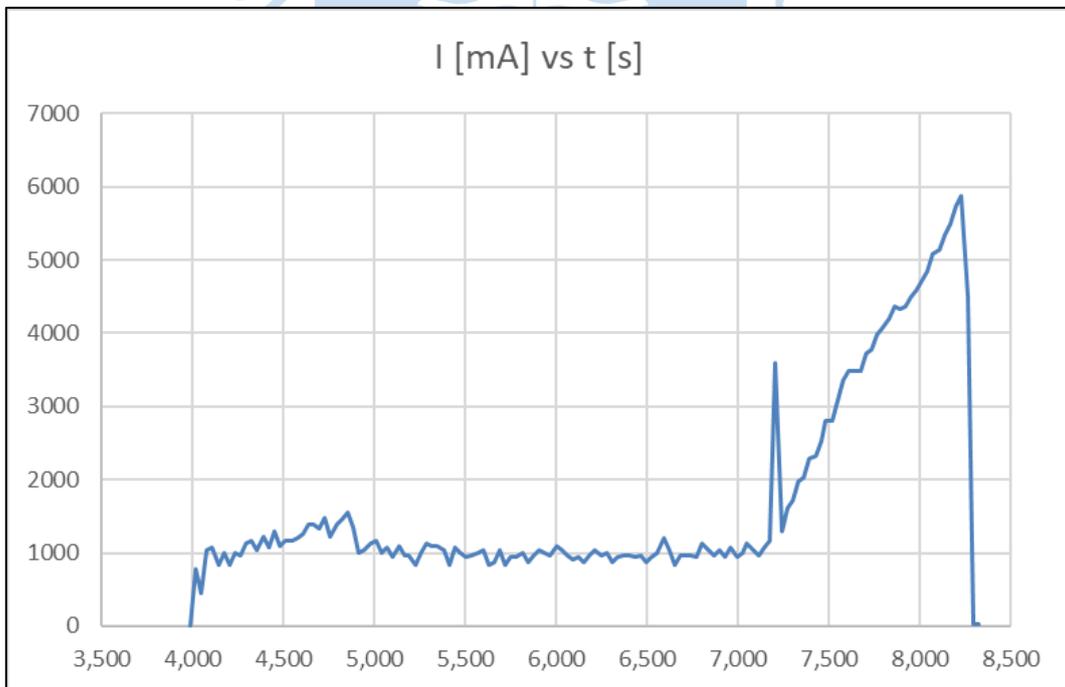


Figura 19. Primer resultado gráfico experimental de la tesis.  
Fuente: Elaboración propia.

El proceso de cerrado de dicha figura tuvo una duración de 4.4 segundos. En orden cronológico, el primer comportamiento observable en esta imagen es la carencia de un pico de

arranque de motor. Esto se debe al “lento” tiempo de muestreo utilizado de 31 ms, pero dicho pico se pudo observar en pruebas posteriores.

El segundo fenómeno observable es la caída de corriente alrededor del segundo 4.9, y se debe a que el motor ha alcanzado la velocidad impuesta en el código, por lo que deja de acelerar y continúa su operación a una velocidad constante de 3200 rpm. Esta velocidad constante corresponde al proceso de acercar la boca móvil hacia la pieza que se va a sujetar. En el caso de esta prueba, realizada con el husillo TITAN 2, dicha fase requiere una corriente constante de 1 A.

El tercer fenómeno observable fue el más desafiante, pero no fue abordado hasta la décima prueba automática. Esto se refiere al pico de corriente en el segundo 7.2, que se debe al acople del *Kraftverstärker* (multiplicador de fuerza). Esto significa, el momento en el que la boca móvil toca la pieza y se acopla el multiplicador de fuerza al interior del husillo. En el apartado 4.4 del presente capítulo se detalla las implicaciones de dicho fenómeno y cómo se abordó en la programación.

Seguido del pico de corriente mencionado, se observa la zona donde la corriente crece de manera casi lineal con respecto del tiempo. En este momento, el *Kraftverstärker* está realizando su carrera útil, hasta que el Escon envía al Teensy una lectura de corriente superior al límite establecido en el código, y el Teensy responde con la orden de detener el motor. Para este proceso, no se le exigió al controlador que realice un frenado, sino solamente cesar la alimentación al motor.

Para el control de la tesis, no es tan importante la linealidad observada en la Figura 19 de Corriente-Tiempo, sino la linealidad Fuerza-Corriente, evaluada por primera vez en una prueba manual de 56 ciclos, cuyo resultado se puede observar en la Figura 20.

En dicha figura puede observarse una ecuación de la regresión lineal realizada, cuyas variables son “x” en [A] e “y” en [kN]:

$$y = 4.4893x + 2.9626$$

Varias ecuaciones obtenidas de manera equivalente, pero mediante una cantidad de ciclos del orden de los miles, fueron luego utilizadas para el control del *Bediengerät* brindando un entorno amigable al operario, para que no deba escoger el valor de corriente límite, sino la fuerza a ser aplicada en la pieza. Sin esto, el sistema no tendría una aplicación práctica, pues el valor de corriente en el *Bediengerät* no tiene significado cara a la calidad de la sujeción de los husillos.

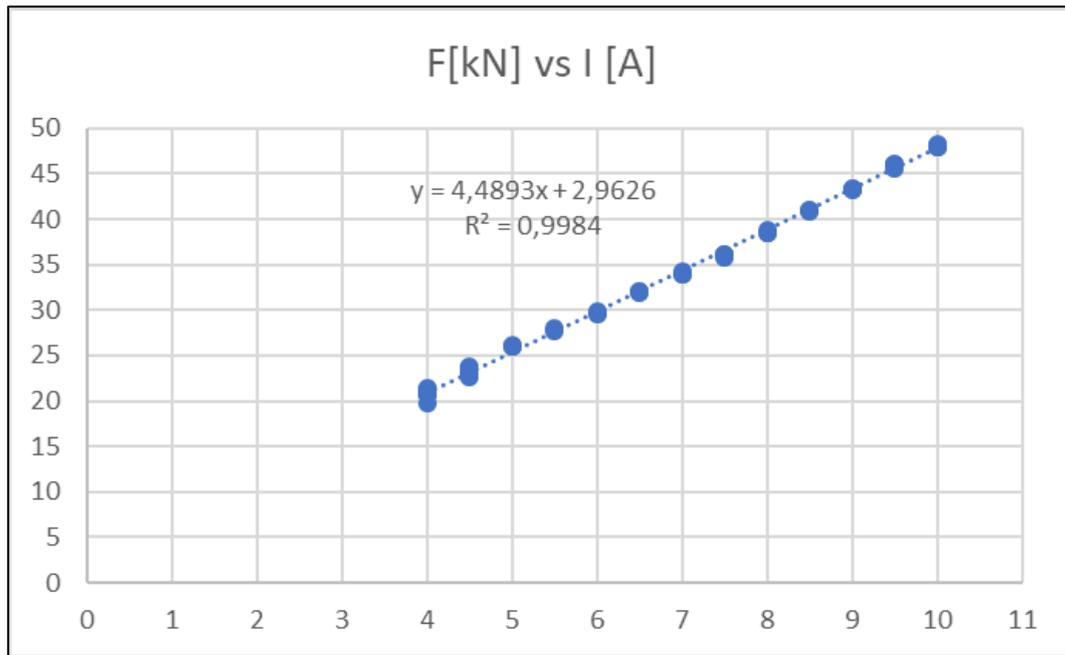


Figura 20. Relación lineal de Fuerza-Corriente observada en una prueba manual.  
Fuente: Elaboración propia.

Se sabe también que cada tipo de husillo cuenta con una curva distinta, por lo que, en el código de control final, tres ecuaciones fueron implementadas en el programa para que el Teensy calcule la corriente a la que debe detenerse según una configuración de doble entrada: el tipo de husillo por operar y la fuerza deseada.

Los aportes provenientes de cada una de las pruebas automáticas, junto a los aportes de las pruebas manuales realizadas en conjunto, dieron origen al código resultante que se presenta en el apartado a continuación.

#### 4.4. Código resultante

En este apartado, el código final se explica detalladamente, mencionando la metodología seguida para el manejo de la información proveniente de las pruebas manuales y automáticas, y adjuntando las gráficas correspondientes. El orden en el que se explica cada parte del código corresponde a la secuencia por filas de inicio a fin del código.

El código completo no se puede adjuntar, debido al acuerdo de confidencialidad de información con la empresa, sin embargo, un fragmento se presenta como Anexo 2. El primer bloque contiene la declaración de variables y pines. Dicha declaración también está dividida en subgrupos según la porción de código a la que hacen referencia.

Dentro del “*void setup*”, se inicia la comunicación serial, se determinan los pines como entradas o salidas, se definen algunos parámetros que requieren valores iniciales, se inician

las variables dependientes del tiempo, y se asigna un “*attachInterrupt*”. El “*void loop*” contiene un total de 10 bloques de código:

1. Lectura de los parámetros predefinidos por el usuario: el husillo que será controlado y el valor de fuerza deseada.
2. Cálculo de parámetros según el husillo y fuerza seleccionados.
3. Solución al problema del *Kupplung*: almacenamiento de nueve últimos valores de corriente.
4. Lectura de parámetros externos al Teensy: mediciones del Escon y estado de los botones de accionamiento *Spannen* y *Lösen*.
5. Arranque del motor sin interrupciones.
6. Detención automática del *Bediengerät*: al alcanzar el límite de corriente o hallar una condición anómala.
7. Activación del motor: al detectar un botón de accionamiento presionado y cumplir con todas las condiciones de operación.
8. Envío de parámetros relevantes en tiempo real: mediante el puerto serial.
9. Control de los paneles indicadores LED.
10. Reinicio de la variable temporal en caso ocurra un *rollover*.

La ubicación de todos los bloques no es totalmente fija, aunque hay dependencia entre las variables de algunos bloques, que también se mencionan más adelante. A continuación, se presenta el razonamiento seguido para la redacción de cada bloque junto a varias gráficas que demuestran el funcionamiento de dicho código.

#### 4.4.1. Lectura de los parámetros predefinidos por el usuario

Los parámetros definidos por el usuario son dos: el husillo que será controlado y el valor de fuerza deseada. El husillo se selecciona mediante un interruptor rotatorio, que permite escoger entre los husillos TITAN 2, DUO Plus y NC8. La fuerza se selecciona mediante un potenciómetro que envía un valor de tensión entre 0 y 3,3 V hacia un puerto analógico del Teensy. Dichos componentes se aprecian en la Figura 21 ya montados sobre la carcasa impresa en 3D.

La medición analógica del potenciómetro es realizada en 10-bit por el puerto analógico del Teensy, lo que significa que transforma la lectura del potenciómetro de 0V–3,3V a 0–1023. El Teensy luego realiza un mapeo sencillo de dicho valor hacia una escala de fuerza en kN. Al implementar el potenciómetro sobre la impresión 3D del *Bediengerät*, se encontró comportamientos no lineales cerca de los valores extremos del potenciómetro, por lo que se

optó por restringir su rotación con la impresión 3D a un ángulo menor, como se puede apreciar también en la Figura 21.

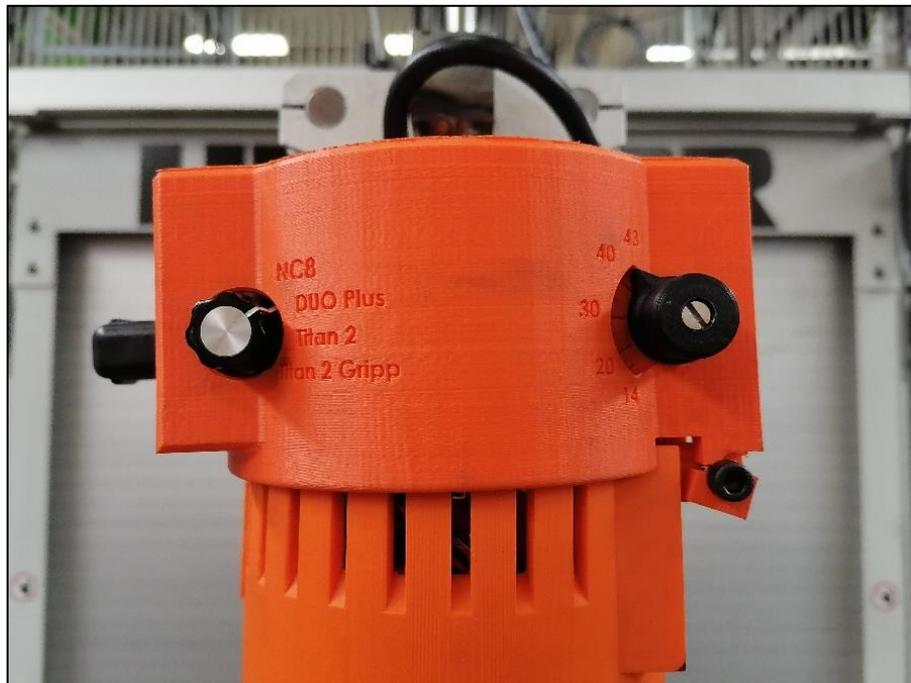


Figura 21. Perillas del Bediengerät para la definición de parámetros.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe aclarar que en la misma figura se aprecia una cuarta configuración con la etiqueta “Titan 2 Gripp” que no había sido mencionada en la tesis hasta el momento. Se creía posible la necesidad de agregar una calibración especial del *Bediengerät* para el TITAN 2 cuando se equipa con bocas con punzones, por lo que se dejó una posición más en el interruptor rotatorio. Sin embargo, no pertenecía al alcance de la tesis, por lo que se programó al Teensy para que no accione al motor cuando el interruptor se encuentre en dicha posición.

#### 4.4.2. Cálculo de parámetros según el husillo y fuerza seleccionados

Mediante una función condicional en la línea 138, se asignan diferentes valores para cada tipo de husillo. Esto permitirá que el Teensy sepa cuál conjunto de parámetros debe evaluar.

Tras cada condición se encuentran cuatro líneas de código por cada husillo, las dos primeras dedicadas al problema del *Kupplung*, un fenómeno que respecta al límite inferior de corriente y que será explicado en el siguiente bloque. La tercera línea es una ecuación lineal de una sola variable de entrada: la fuerza deseada en kN. Cada husillo tiene su propia

ecuación, que fue obtenida mediante pruebas las automáticas con miles de iteraciones y realizando una regresión lineal. Las pruebas automáticas utilizadas para la obtención de estas ecuaciones fueron programadas para operar con diferentes valores de corriente límite y relacionarlo con la fuerza obtenida. Para el husillo TITAN 2, se realizó una calibración a partir de dos pruebas automática que suman un total de 3240 ciclos. El límite de corriente de la primera prueba se varió en pasos de 500 mA entre el rango de 4 A hasta 9 A, y la segunda prueba se realizó posteriormente, estableciendo el límite de corriente en 2,5 A, cuando ya se había solucionado el problema del *Kupplung*. En la Figura 22, se observa la gráfica Fuerza vs Límite de corriente, obtenida de las pruebas mencionadas, junto a la regresión lineal de los valores.

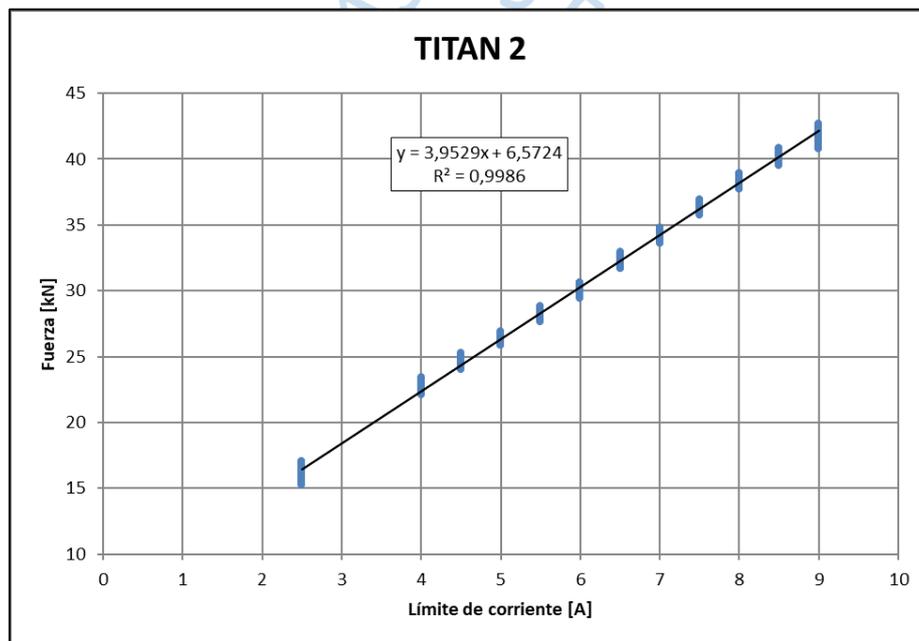


Figura 22. Regresión lineal de las mediciones obtenidas con un husillo TITAN 2.  
Fuente: Elaboración propia.

En la ecuación obtenida, “y” equivale a fuerza, mientras “x” a corriente. Para utilizar dicha ecuación en el código, se despeja “x”, para que la variable de entrada sea la fuerza solicitada por el usuario, y la variable de salida sea la corriente que el Teensy debe tomar como límite para la ejecución del cerrado de mordazas.

Posterior a la solución del problema del *Kupplung*, se realizó pruebas para los husillos NC8 y DUO Plus. Los resultados obtenidos de dichas pruebas generaron los datos que se muestran gráficamente en la Figura 23 y la Figura 24, junto a sus ecuaciones de regresión lineal. Se puede apreciar que los valores obtenidos son bastante más continuos por haber disminuido el paso del límite de corriente.

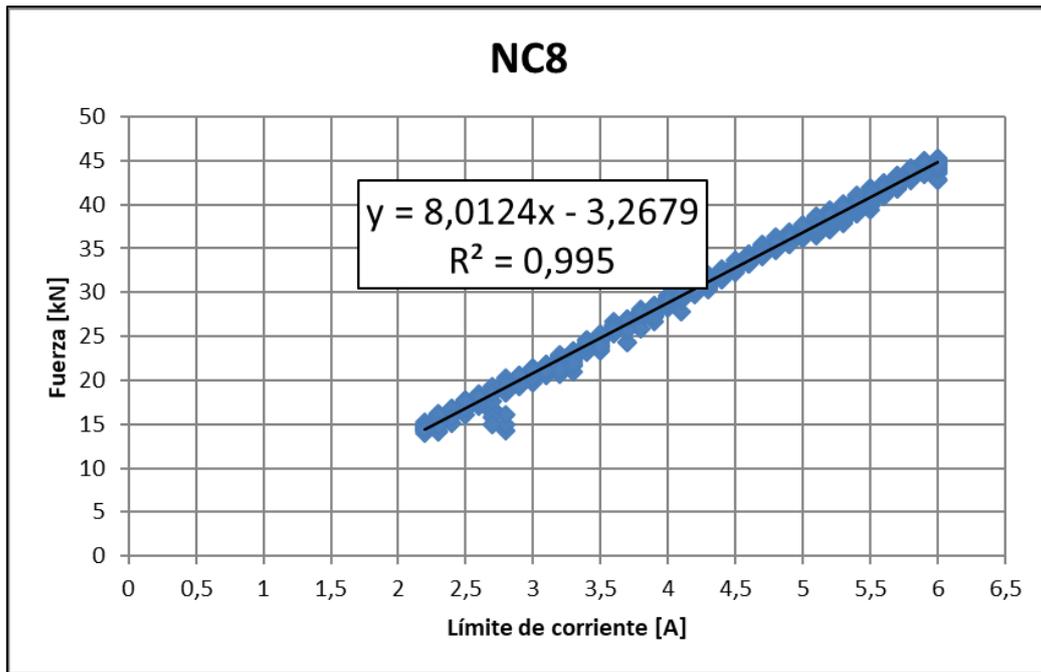


Figura 23. Regresión lineal de las mediciones obtenidas con un husillo NC8.  
Fuente: Elaboración propia.

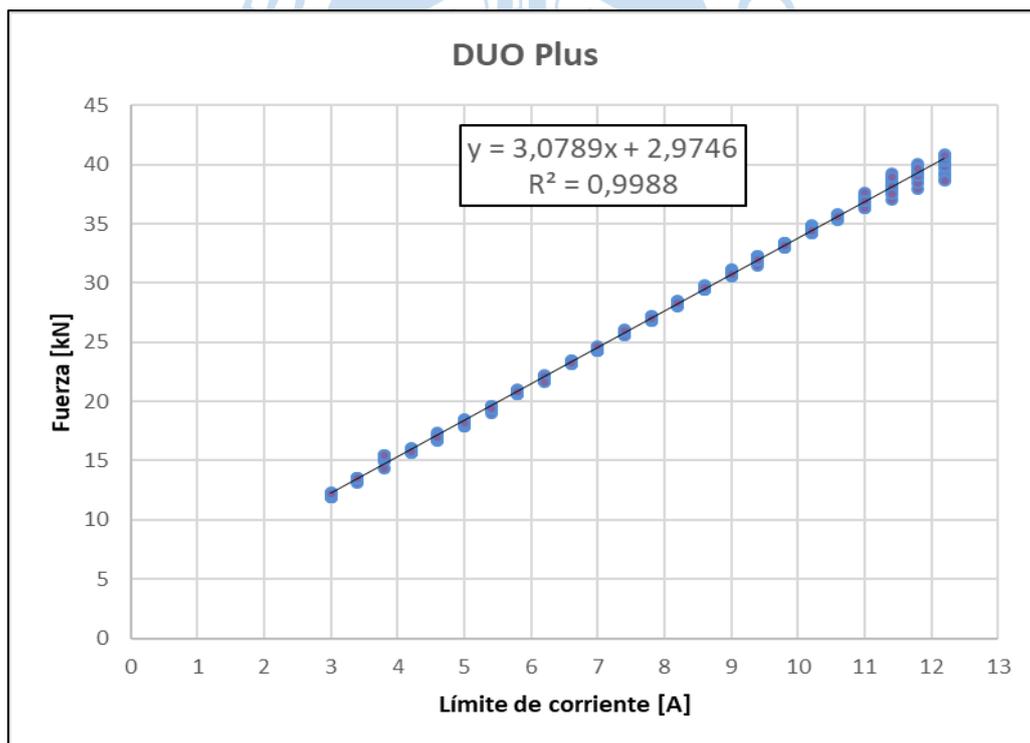


Figura 24. Regresión lineal de las mediciones obtenidas con un husillo DUO Plus.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.3. Solución al problema del Kupplung

Este problema, como se mencionó anteriormente, ocasiona dificultad en la operación con límites de corriente bastante bajos. Se refiere al pico de corriente que fue observado en la

Figura 19, ocasionado por el *Kupplung* (acople) del *Kraftverstärker* (multiplicador de fuerza). Todos los husillos de Allmatic con un *Kraftverstärker* presentan este pico de corriente al ser operados mediante un motor eléctrico. Es generado por el propio sistema interno del husillo, del cual no se puede dar más detalle por ser información confidencial. El *Bediengerät* debe detenerse al encontrar un valor de corriente superior al definido como límite, y si este pico es superior al valor de corriente deseado, el sistema se detendrá al encontrarse con el acople, como se muestra en la Figura 25.

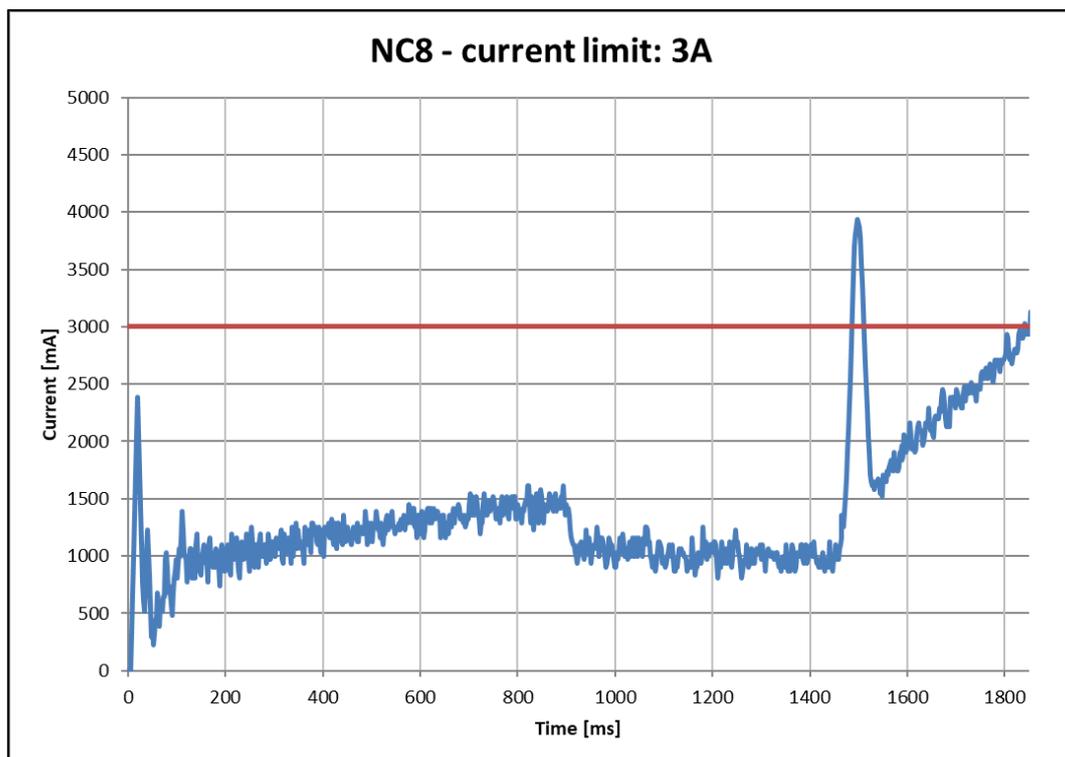


Figura 25. Gráfica experimental de corriente vs tiempo en el husillo NC8.  
Fuente: Elaboración propia.

La gráfica muestra una línea roja horizontal en 3A. Según las pruebas de corriente-fuerza, detener la corriente en 3A en el NC8 (ocurriendo en  $t=1842\text{ms}$ ) generaría una fuerza de 20 kN. Sin embargo, el pico de corriente hace que el sistema se detenga en el momento que se acopla el multiplicador de fuerza (ocurriendo en  $t=1488\text{ms}$ ). Por ello, se requirió implementar un código que permita al Teensy reconocer el pico e ignorarlo. Lo primero fue analizar el comportamiento general del acople, y qué tan constante es este pico de corriente a lo largo de varios ciclos. A continuación, se analiza las características del problema que se pueden observar en la Figura 26, el acercamiento de la curva de corriente en un husillo TITAN 2 al momento del acople.

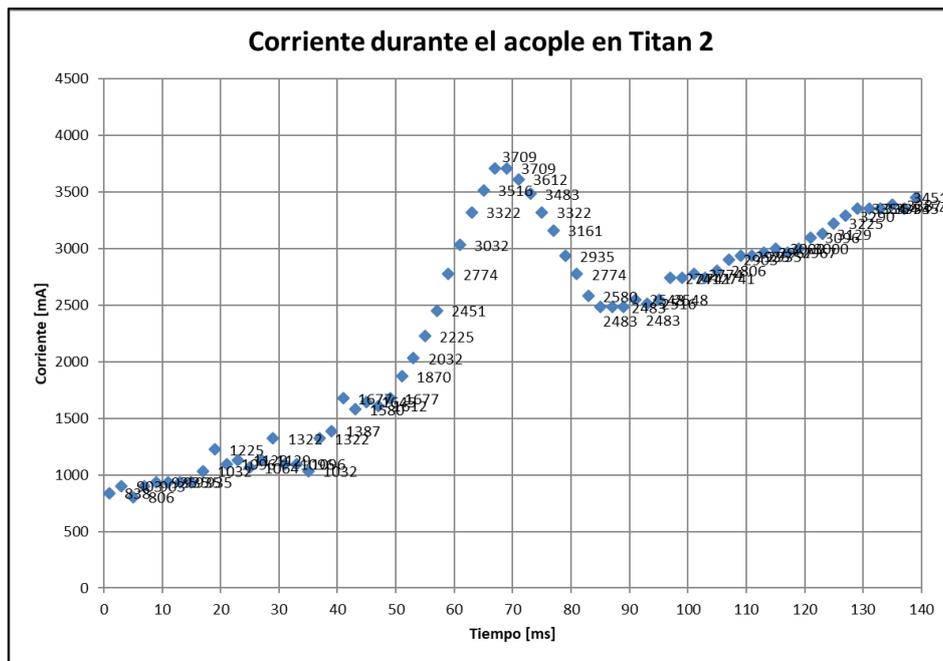


Figura 26. Curva de corriente durante el acople del multiplicador en el husillo NC8.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 26 se observa que la fase de relación lineal fuerza-corriente se ubica a partir de  $t=1300\text{ms}$ , partiendo de un valor de corriente de 2483 mA. Se repitió la prueba varias veces, obteniendo que algunas veces la corriente cae hasta casi 2000 mA, pero tal que un comportamiento lineal no inicia sino hasta alrededor de 2500 mA. Por otro lado, se observa que previo al acople, la corriente no se eleva por encima de 1600 mA.

Para tener la capacidad de detenerse lo más rápido posible, se definió un código para reconocer el inicio del acople: si la corriente es superior a 1600 mA, entonces el sistema se encuentra durante o después del acople, pero no antes. Por ello, a partir de ese momento, tendrá permiso de detenerse sólo transcurrido un tiempo aproximado de la duración del pico del acople. Después de evaluar varias curvas como las de la Figura 26, se observa que el tiempo transcurrido entre la primera medición de 1600 mA y el inicio de la zona lineal es, en promedio, de 36 ms. De esta forma, se definen los parámetros  $K_{permission}$  y  $K_{windowWidth}$ . El mismo método fue realizado para los otros husillos. Por ejemplo, para el DUO Plus, se obtuvo las mediciones presentadas en la Tabla 9.

Tabla 9. Duración del acople en el husillo DUO Plus.

	Concesor: 2800mA	Permitido: 3000mA	Tiempo de acople
Curva 1	374	438	64
Curva 2	925	993	68
Curva 3	391	459	68

Fuente: Elaboración propia.

Se define entonces los parámetros correspondientes para el problema del *Kupplung* de la siguiente manera: El valor concesor, llamado “*K\_permission*” en el código, es aquel valor que nunca aparece antes de encontrarse con el acople, y que marca su inicio. El tiempo de acople, es un tiempo aproximado desde que se observa el valor concesor hasta que se inicie la curva lineal de fuerza-corriente. En el código, esto se programó mediante el almacenamiento de nueve puntos, numerados con “*K\_p#*”, separados con un tiempo de muestreo variable, definido con la variable “*K\_windowWidth*”. Esta variable se asigna entonces de modo que el tiempo de acople sea igual o menor al producto del número de puntos (nueve) por la variable “*K\_windowWidth*”.

Luego, se incluyen dos acciones para permitir el almacenamiento de los nueve puntos. Para evitar que el pico de arranque del motor sea confundido con el inicio del acople, se agrega en el código la condición de sólo actualizar el historial de puntos cuando la velocidad de rotación del husillo sea superior a 30 rpm. Para asegurar que las mediciones de un cerrado anterior no interfieran con el siguiente ciclo, se agrega en el código unas líneas que aseguran que el sistema tendrá permiso de detenerse si no existen mediciones anteriores.

Así, un ciclo con un límite de corriente reducido se realiza tal y como se aprecia en las figuras que se observan a continuación: Figura 27, Figura 28 y Figura 29.

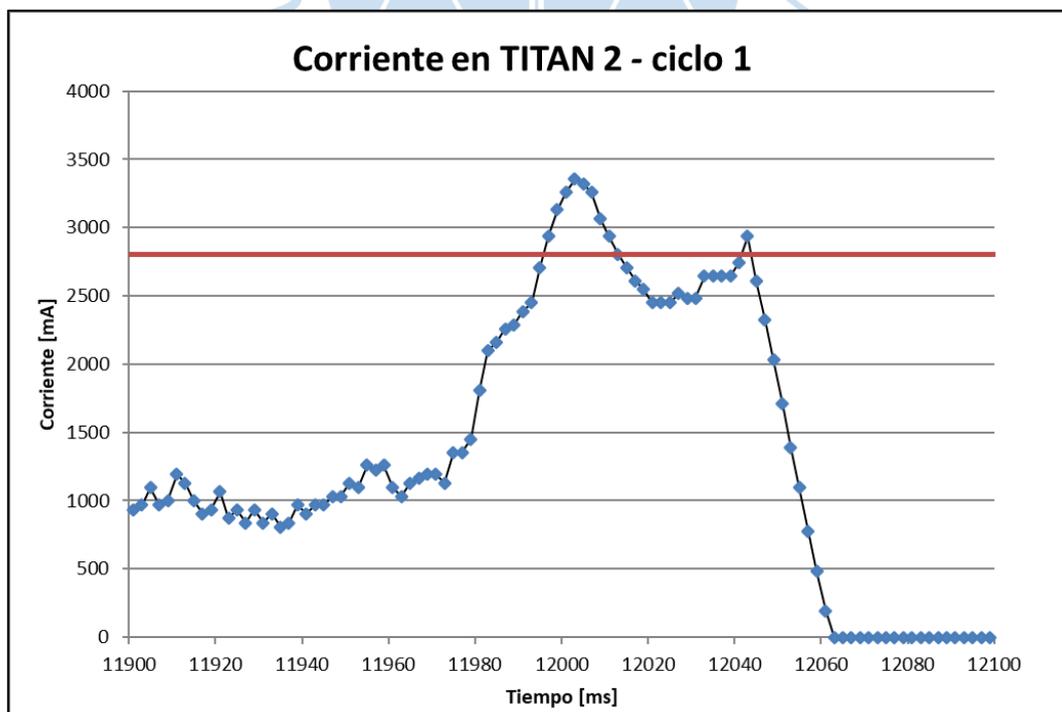


Figura 27. Proceso tras solución al problema del Kupplung, ejemplo 1.  
Fuente: Elaboración propia.

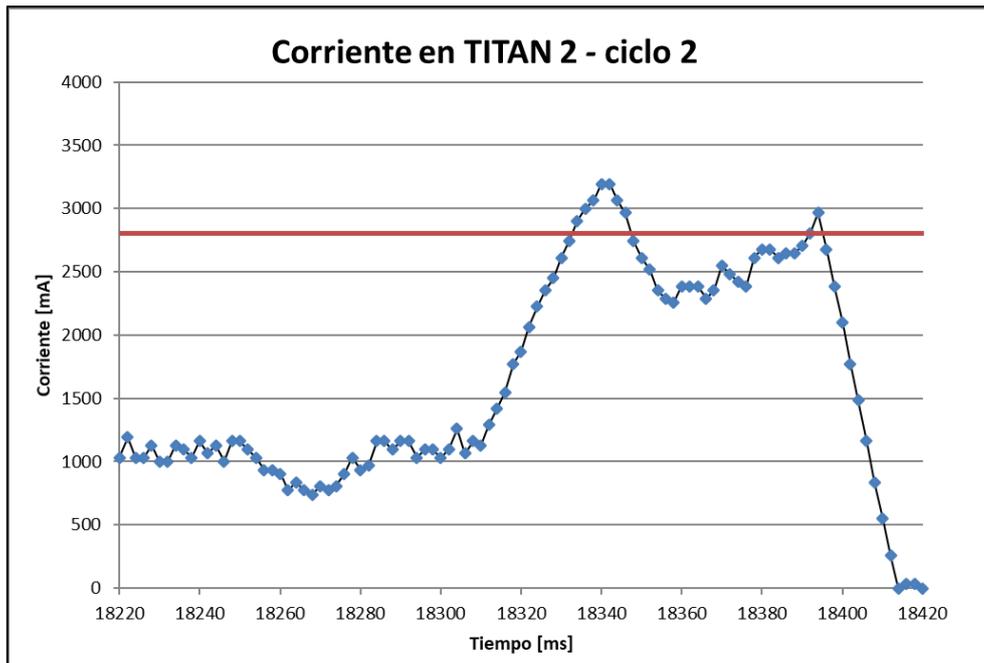


Figura 28. Proceso tras solución al problema del Kupplung, ejemplo 2.  
Fuente: Elaboración propia.

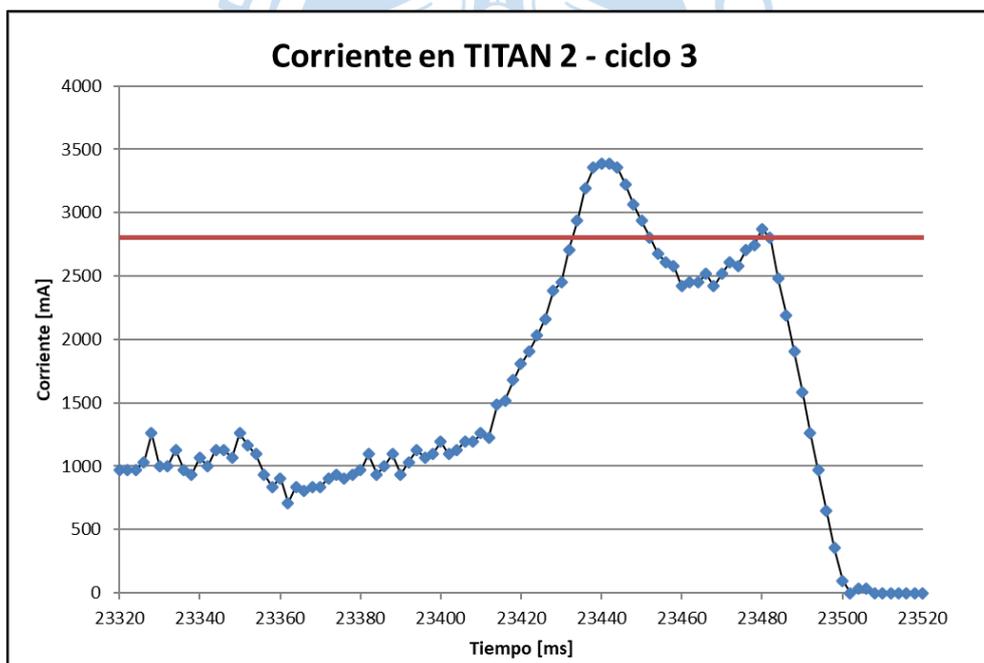


Figura 29. Proceso tras solución al problema del Kupplung, ejemplo 3.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.4. Lectura de parámetros externos al Teensy

En esta parte del código se realizan las mediciones de las variables que envía el Escon: corriente y velocidad, y se les convierte mediante la función *map* de la medida analógica en 10 bits a las escalas de mA y rpm.

También se actualiza el estado de los botones de accionamiento *Spannen* y *Lösen*, y además se define en este instante del *void loop* la actualización de la variable de tiempo “*currentMillis*” a la que hacen referencia todas las operaciones dependientes del tiempo.

#### 4.4.5. Arranque del motor sin interrupciones

Por un motivo similar al del problema del *Kupplung*, se le debe especificar al sistema una manera de reconocer el arranque del motor, para no restringir la operación, aunque el pico del motor supere el límite de corriente correspondiente a la fuerza deseada. Para ello, se agregó una función de interrupción, que evalúa el tiempo transcurrido desde el inicio de un ciclo, y brindan un límite de corriente superior al establecido normalmente. Sin embargo, este límite tampoco debe ser muy alto, para que el sistema logre detenerse si el pico de arranque fuera anómalamente elevado. Por ello, se evalúan los picos de corriente de arranque observados en los husillos, encontrando que nunca se alcanza el valor de 3500 mA, ni supera un tiempo de 32 ms. De esta manera, tal y como se aprecia en la Figura 30, se consigue culminar un ciclo con un límite de corriente bastante reducido (de 2A) mediante la programación de un límite dinámico (línea roja).

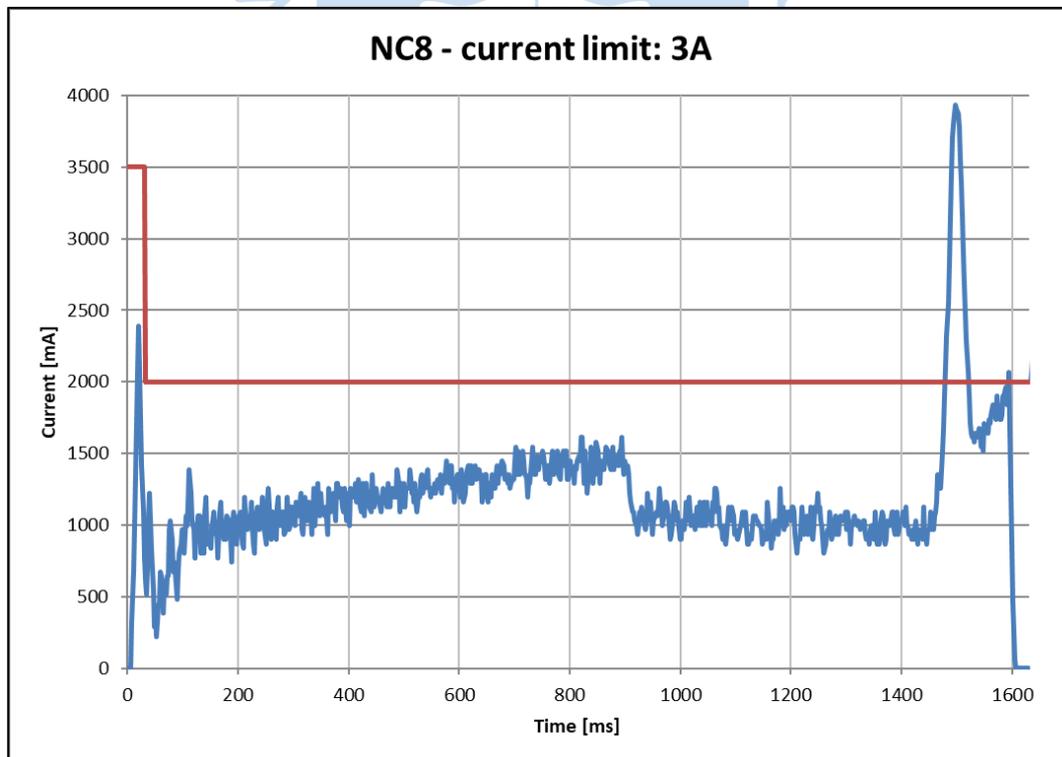


Figura 30. Arranque satisfactorio bajo límites de corrientes reducidos.  
Fuente: Elaboración propia.

Esto también permite reaccionar frente a arranques inusuales, es decir, que requieran más de 3.5 A, pero que podrían ser ignorados si son menores al límite de corriente por ser muy elevado. En la Figura 31, se presenta un ejemplo del funcionamiento del límite implementado cuando se trabaja con un husillo DUO Plus a 12.2 A.

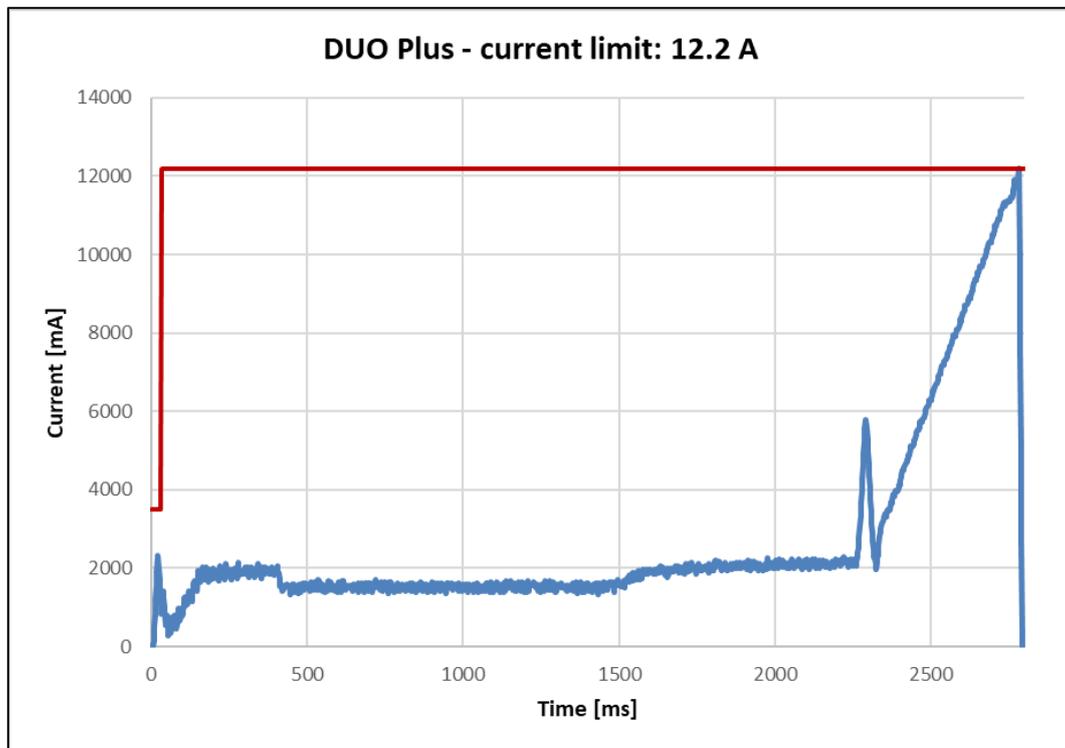


Figura 31. Límite de arranque modificado en una mordaza DUO Plus.  
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en esta última figura, el pico de corriente de arranque no se compara al pico generado por el acople ( $T=2300\text{ms}$ ). Esto significa que el motor puede sin problemas acelerar aún más rápido que lo establecido en el programa ESCON Studio, es decir, 3200 rpm/s. Sin embargo, esto no fue aplicado porque las velocidades bajas tienen una gran ventaja: cuando el operario quiere mover la boca de mordaza apenas una distancia muy pequeña, lo realiza con presionar brevemente el botón, de manera intermitente. Esto, para el sistema tomado de referencia (*Handhabungsgerät*) estaba prohibido en el manual. Sin embargo, por la programación que tiene el *Bediengerät* y los componentes que utiliza, no tiene ningún problema para operar en dicha condición.

#### 4.4.6. Detención automática del *Bediengerät*

Esta parte del código se encarga de revisar que se cumplan las condiciones impuestas anteriormente para realizar la detención del sistema. Existen tres circunstancias en las que el

sistema se detendrá. Para el cerrado de mordazas, se debe cumplir las siguientes condiciones para que el *Bediengerät* se detenga: que se lea un valor de corriente mayor al límite establecido, que el sistema esté girando en el sentido de cierre de la mordaza, y que el noveno valor de corriente almacenado sea mayor al establecido en el bloque 3 del código.

La segunda manera es que se detecte un valor de corriente superior a 3.5 A durante la apertura de la mordaza. Para que esto suceda, debe rotarse el husillo hasta su extremo abierto, haciendo chocar la boca móvil con el límite del husillo, atrapando entre ambas piezas a un jebe llamado *Dichtung* que brinda un grado de protección contra agua y polvo. Si es apretado demasiado fuerte, el sistema se atasca y podría romperse el jebe. Esto solo ocurriría si el operario se distrae y continúa pulsando el botón de apertura hasta este límite, ya que en ninguna circunstancia el *Bediengerät* se mueve sin estar pulsando ningún botón. Esta limitación de corriente evita entonces que el sistema continúe haciendo presión sobre el jebe por un descuido de un operario.

Finalmente, el último escenario donde el motor frenaría por su cuenta es indiferente de lo que esté realizando, solo con encontrar una corriente superior a 14 A. Esto se fijó así porque la máxima corriente hallada en operación normal fue de 12.7 A con el DUO Plus, por lo que se deja este margen de seguridad ante algún atasco o fallo mecánico que produzca dicho pico de corriente.

Este bloque de código precede al sétimo de activación del motor, pues modifica la variable *StopToken* que evita que el motor vuelva a activarse hasta cumplirse la condición de la función de interrupción. De este modo, cuando el bloque de parada actúa escribiendo un cero en dicha variable, el siguiente bloque no será ejecutado por su condicional *if*.

#### **4.4.7. Activación del motor**

Este bloque es aquel con el que el operario interactúa directamente durante el funcionamiento común. Mediante tres condicionales, el *Bediengerät* es capaz de reaccionar al estado de los botones de operación *Spannen* y *Lösen*, otorgando permiso al Módulo Escon para accionar al motor mediante los pines *Enable* y *Direction*. Se destaca que el condicional del botón de aplicar presión tiene una condición adicional, que depende de la variable mencionada en el bloque anterior, que evita que este condicional sea aceptado mientras no se active la función de interrupción. De este modo, cuando el sistema ha logrado culminar un apriete, no se volverá a accionar a menos que el usuario suelte el botón y lo vuelva a presionar.

Cuando ambos botones son presionados, se envía la señal de no realizar movimiento. En cualquier momento que no se esté accionando el motor, se reescriben las nueve mediciones del bloque 3 tal que contengan números que siempre superen el permiso necesario para la detención. Esto, como fue explicado anteriormente, para asegurar que el sistema no confundirá fenómenos de arranque con el verdadero *Kupplung*.

#### **4.4.8. Envío de parámetros relevantes en tiempo real**

Este bloque de código se encarga de enviar mediante el puerto serial varios parámetros que fueron muy útiles durante el desarrollo de la presente tesis. Se consideró apropiado dejarlos ahí debido a que el proyecto se mantiene en constante desarrollo, y la extracción de información será con seguridad útil en el futuro. Inicialmente, el código enviaba una fila de valores a Excel cada 30 ms aproximadamente, en todo momento. Luego se vio apropiado elevar la frecuencia de muestreo tanto como sea posible. Después del cambio, se recibía una fila de valores cada 2 ms. Sin embargo, esto dio problemas de almacenamiento, pues las mediciones se detenían al alcanzar 64999 filas. Probablemente era una limitación del PLX-DAQ (el complemento de Excel para recibir las lecturas del puerto serial), así que se debió decidir entre generar la salida en formato .txt o limitar las lecturas a los momentos donde se esté presionando el botón de *Spannen*. Lógicamente, las lecturas fuera de estos casos no eran útiles en absoluto, así que se programó así y se mantuvo las pruebas con PLX-DAQ.

El código final enviaba filas de código cuya información consiste en: Fecha, hora, milisegundos desde el arranque del Teensy, corriente real, velocidad real, fuerza deseada, tipo de husillo y estado del sistema (cerrado, apertura, espera).

#### **4.4.9. Control de los paneles indicadores LED**

Mediante una combinación de condiciones, se estableció varias secuencias de brillo para dos LED, cada uno con la capacidad de brillar de color verde o rojo. Ambos cuentan con un grado de protección IP67, aunque el *Bediengerät*, al tener una carcasa de impresión 3D, es vulnerable al agua. Esto se menciona en las propuestas de mejora, ya que son pocos los componentes que aún no tienen protección contra agua y polvo.

Se escogió la luz verde parpadeando lentamente para indicar que el sistema está disponible y listo para accionar, la luz amarilla cuando no se logre leer correctamente las configuraciones especificadas mediante las perillas, rojo parpadeando rápidamente cuando el sistema está activo y realizando el cerrado de la mordaza, verde parpadeando rápidamente

cuando está abriéndolas, y finalmente, verde siempre encendido cuando el sistema cumple una sujeción de pieza satisfactoria.

#### **4.4.10. Reinicio de la variable temporal en caso ocurra un rollover**

Esta porción final del código solamente cumple la función de reiniciar la variable temporal *previousStorage* si se detecta un *rollover*. Sin embargo, esto solo ocurre tras cincuenta días seguidos sin apagar el sistema, lo que no es común en absoluto.





## Capítulo 5

### Análisis de resultados

En este capítulo se presenta varios puntos importantes observados durante la operación del sistema una vez que fue implementado en el taller de la empresa. En este ambiente, el *Bediengerät* fue operado por técnicos de la empresa para realización de sus funciones cotidianas. Específicamente, el sistema desarrollado fue implementado sobre una plataforma de salida de un almacén de torres de sujeción automatizado.

Este almacén contiene una gran variedad de torres de sujeción, y según las piezas planificadas por el área de producción, se utilizan algunas con bocas de mordaza especiales o con sistemas centrantes. Un sistema de base móvil y rieles se dirige hacia cierta torre de sujeción y la traslada hacia la plataforma donde se encuentra el *Bediengerät*, como se puede apreciar en la Figura 32.

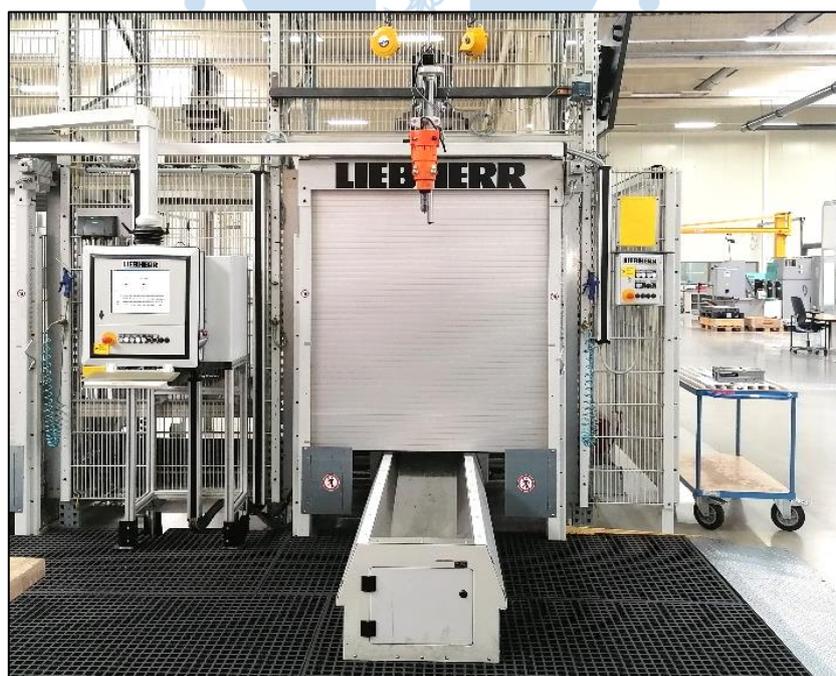


Figura 32. *Bediengerät* montado en la plataforma de torres de sujeción de Allmatic.  
Fuente: Elaboración propia.

Las torres de Allmatic tienen entre 2 a 4 husillos, y estos husillos pueden tener una capacidad de una pieza (TITAN 2, NC8) o dos piezas (DUO Plus), generando así un rango de dos a ocho piezas por torre de sujeción. Como se mencionó anteriormente, hay piezas que requieren accionar la mordaza más de una vez en el proceso de intercambiar las piezas, como, por ejemplo, piezas que requieren un centrado de varios pasos, o piezas que se sujetan por dos husillos en paralelo.

Al inicio del día, la torre de sujeción adecuada se ubica en la plataforma y el técnico coloca una a una las piezas correspondientes en la torre. A continuación, el sistema de rieles del almacén traslada la torre hacia un centro de fresado. Cuando el fresado de cada una de las piezas es concluido, la torre es trasladada nuevamente a la plataforma y el operario debe retirar todas las piezas terminadas y colocar aquellas por fresar.

El sistema *Bediengerät* reemplaza así una significativa actividad física de accionar repetidamente las torres mediante una manivela. De su operación tanto en el salón de pruebas como en el taller cumpliendo la función explicada, se obtuvo la información presentada a continuación, referente a las metas planteadas al inicio del proyecto.

## **5.1. Cumplimiento de objetivos**

En este apartado se comenta el grado de satisfacción de cada uno de los objetivos planteados en el proyecto, que se presentaron en el apartado 2.3.1.

### **5.1.1. Programación de un control más práctico y eficiente**

Se logró que el nuevo sistema complete la sujeción, consistente en el cerrado de mordazas y aplicación de fuerza, con solo mantener pulsado un botón, y que libere la pieza (retiro de carga y apertura de mordazas) manteniendo pulsado el otro, es decir, un total de dos comandos. La variación de carga es realizada con practicidad mediante una perilla potenciométrica en unidades de [kN]. El sistema cuenta con luces LED que indican el estado actual del sistema. Mediante un cable USB y una laptop se puede extraer información relevante sobre el funcionamiento y variables de operación.

Las mejoras en tiempos fueron otro punto muy destacable: si se compara la Figura 5 con la Figura 31, se puede apreciar la gran diferencia que existe entre ambos sistemas. Mientras el sistema del proyecto tomado como referencia, según se observa en la Figura 5, tarda un total de 9 segundos desde el *Kupplung* ( $t=2$ ) para aplicar 40 kN a la mordaza que hayan utilizado, en la Figura 31 se observa que el *Bediengerät* realiza el apriete de las piezas en un lapso de 0.5 segundos desde el *Kupplung* ( $t=2.3$ ). Cabe mencionar que dicha prueba fue realizada

sobre el DUO Plus, el husillo que exige la mayor corriente de entre todos los husillos comerciales de Allmatic. Esto conlleva a una mejora en tiempos del **1800%**. Aunque no se cuente con los tiempos que tarda un operario en accionar el sistema con una llave dinamométrica, es evidente que requiere más de medio segundo en completar el cerrado de la mordaza.

### **5.1.2. Diseño ergonómico e industrial**

El peso total del sistema es de 3,2 kg, incluyendo toda la parte mecánica y electrónica, pero sin incluir los rieles de absorción de momentos sobre los que debe ser montado. Las principales ventajas en el funcionamiento y ergonomía se resumen a continuación:

No requiere fuerza humana, pues los ejes de momentos absorben todo momento de reacción generado en el husillo. El operario solo debe ubicar el sistema sobre el husillo, cuyo peso es equilibrado por un balancín, y presionar el botón correspondiente.

Es más seguro. El trabajo en las torres de sujeción se realiza dedicando una mano para el accionamiento de la torre, ya sea una llave o el *Bediengerät*, y la otra mano ubica y sostiene la pieza en el lugar correcto hasta que la sujeción se realiza. Lógicamente presionar un botón requiere menos atención que girar una llave aplicando un momento de 30Nm, por lo que el operario puede así dedicar más atención a la correcta sujeción de la pieza.

Mediante impresión 3D se fabricó una carcasa ergonómica que provee un uso cómodo al usuario, y hace que el motor y la caja reductora estén fuera del alcance visual. Dicha carcasa puede recibir un tratamiento superficial para sellar las ranuras características de las impresiones en 3D. De esta manera, y reemplazando un par de componentes sencillos, el sistema quedaría totalmente protegido contra agua y polvo.

La empresa decidió que el prototipo pasaría a ser un producto comercial, después de aprobar los controles de normas y de ser ingresado al sistema de Allmatic. De esta manera, se reemplaza al sistema tomado como referencia, con lo que dejarán de brindarle servicios de mantenimiento para dar paso al *Bediengerät*.

### **5.1.3. Evaluación de la conveniencia de una medición de momentos**

Se encontró una repetibilidad satisfactoria de fuerza entre las bocas de mordaza mediante lazo de control por corriente, incluso superior a la precisión obtenida mediante el accionamiento manual con una llave dinamométrica, que es lo que actualmente se realiza. Esto se puede comprobar calculando el error cuadrático medio de pruebas de medición con

una llave dinamométrica y con el *Bediengerät* a cierto valor de corriente. En la Tabla 10 se puede observar el cálculo realizado.

Tabla 10. Evaluación de la repetibilidad al utilizar una llave dinamométrica.

Fuerza [kN]	Media	Diferencia al cuadrado	Error cuadrático medio
47,6	48,626	1,05	0,552
48,29		0,11	
47,65		0,95	
49,01		0,15	
48,71		0,01	
48,92		0,09	
48,06		0,32	
49,73		1,22	
49,66		1,07	

Fuente: Elaboración propia.

En la prueba observada en la Figura 33 se calculó del mismo modo el Error Cuadrático Medio para un husillo TITAN 2 con cuarenta mediciones, obteniendo un valor de 0,0217. Por tal nivel de repetibilidad alcanzada, se concluyó dos factores importantes: que la implementación de un sensor de momentos en el *Bediengerät* era innecesaria; y que se ha logrado una mejora muy alta en el grado de repetibilidad con respecto a los procesos de fabricación de Allmatic accionados por llaves dinamométricas, y se reitera que la precisión es un factor clave en esta área de la industria metalúrgica.

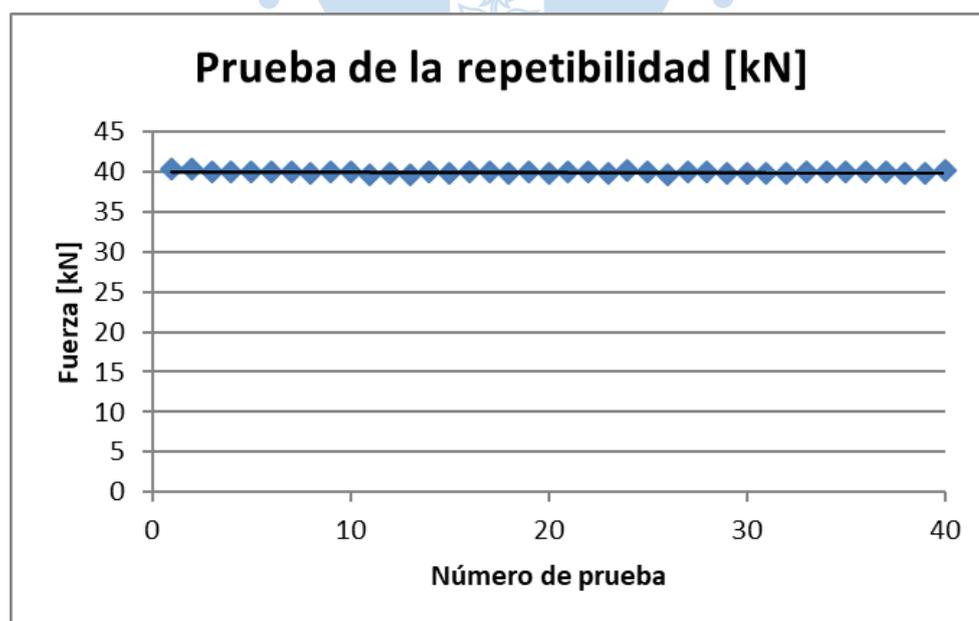


Figura 33. Prueba de la repetibilidad del *Bediengerät* con cuarenta repeticiones.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 5.1.4. Diseño modular

El sistema mecánico es formado en su mayoría por piezas de compra, y se resalta que ni el motor ni la caja reductora fueron sometidos a modificación alguna. Todas las piezas de fabricación cuentan con planos y modelos CAD en SolidWorks. Todos los componentes electrónicos fueron montados sobre piezas de impresión 3D, por lo que es fácil modificar su posición o incluso reemplazarlos por modelos diferentes. El código del programa en Teensy y el diseño de la tarjeta electrónica han quedado correctamente documentados para su sencilla modificación por terceros. Se ha pensado varias propuestas de mejora, mencionadas en el apartado 5.2 del presente capítulo, y se ha diseñado de manera que estas sean implementables sin que se requiera un rediseño total del *Bediengerät*.

Por ejemplo, inmediatamente posterior a la entrega del presente trabajo, se solicitó unos cambios al sistema, como colocar dos juegos de botones de operación, y una pantalla LCD para observar el estado de las variables de fuerza y momento. Esto ya fue realizado por el presente tesista, pero no se documenta en este trabajo pues ya no forma parte del alcance.

#### 5.1.5. Reducción de costos

El costo de fabricación del *Bediengerät* resultó de alrededor de 1300 Euros. Esto cumple el presupuesto planificado, donde se planeó que el sistema no supere un costo de fabricación de 2000 Euros, es decir, el costo de fabricación del proyecto de referencia, el *Handhabungsgerät*. El motivo de aproximar el costo de fabricación es las piezas fabricadas en el taller de la empresa, que no recibieron un cálculo del costo de fabricación por parte del área de producción, pues esta área solo realiza dicho cálculo para las piezas de componentes de venta. Las piezas utilizadas en el prototipo pertenecieron a la categoría de “piezas de desarrollo”, porque no formaban parte de una máquina registrada en el sistema de ventas de la empresa, sino de un prototipo del área de diseño. De este modo, el área de producción no llegó a realizar dicho cálculo al momento de la culminación de la presente tesis. Sin embargo, el precio estimado total equivale a los  $\frac{2}{3}$  del costo objetivo, por lo que se puede afirmar con seguridad que el nuevo sistema cumplió la meta. En cuanto a costos de mantenimiento, también se aprecian mejoras para ambas empresas involucradas: para la empresa Allmatic, que los componentes de compra, al no haber recibido modificaciones, mantienen todas sus garantías, lo que significa que, si un componente mecánico falla dentro de su operación normal, el que debe responder es la empresa fabricante de dicho componente.

Del mismo modo, para la empresa compradora del sistema, se dispone de manuales y normas estándar para el mantenimiento de los componentes.

## 5.2. Propuestas de mejora

Luego de haber cumplido los objetivos y dar por finalizado el prototipo de la presente tesis, se propuso algunos puntos sobre los que el prototipo puede ser mejorado, que ya no formaron parte del alcance del proyecto. Estas propuestas son:

- Reemplazo de varios componentes y carcasa para obtener un grado de protección IP contra agua y polvo.
- Extracción de información por medio de un puerto Ethernet, para conectar el *Bediengerät* directamente a un módem de internet y se pueda evaluar remotamente parámetros de funcionamiento desde las instalaciones Allmatic, sin realizar una visita a planta.
- Fabricación de los ejes de absorción de momentos en la empresa Allmatic, para no comprarlos a una empresa externa y así reducir costos.
- Control del sistema mediante un microprocesador industrial como los de la empresa Texas-Instruments, y no en una tarjeta de desarrollo como las de Arduino o Teensy.
- Implementación en el código las ecuaciones de corriente vs Fuerza de más husillos ALLMATIC, distintos a los tres utilizados para la presente tesis: TITAN 2, NC8 y DUO Plus.

## 5.3. Documentación del proyecto

En este capítulo se presenta información relevante acerca del desarrollo del proyecto, respetando las condiciones de confidencialidad establecidas entre la empresa Allmatic y el tesista al inicio del desarrollo de la presente tesis.

### 5.3.1. Alcance

El alcance del proyecto fue introducido en el apartado 2.3, y sus resultados cualitativos fueron evaluados en el apartado 5.1.

El objetivo fue diseñar un producto comercial consistente en un producto comercial consistente en un actuador electromecánico ergonómico para las torres de sujeción de la empresa Allmatic Spannsysteme, que reemplace el accionamiento mediante manivela, para evitar la fatiga a las articulaciones del hombro y espalda alta de los operarios. Su alcance estuvo definido en torno a cinco objetivos secundarios:

- Programación de un control más práctico y eficiente
- Diseño ergonómico e industrial

- Evaluación de la conveniencia de una medición de momentos
- Diseño modular
- Reducción de costos

### 5.3.2. Plazo

En la Figura 34 se muestra el cronograma de actividades que detalla los plazos establecidos.

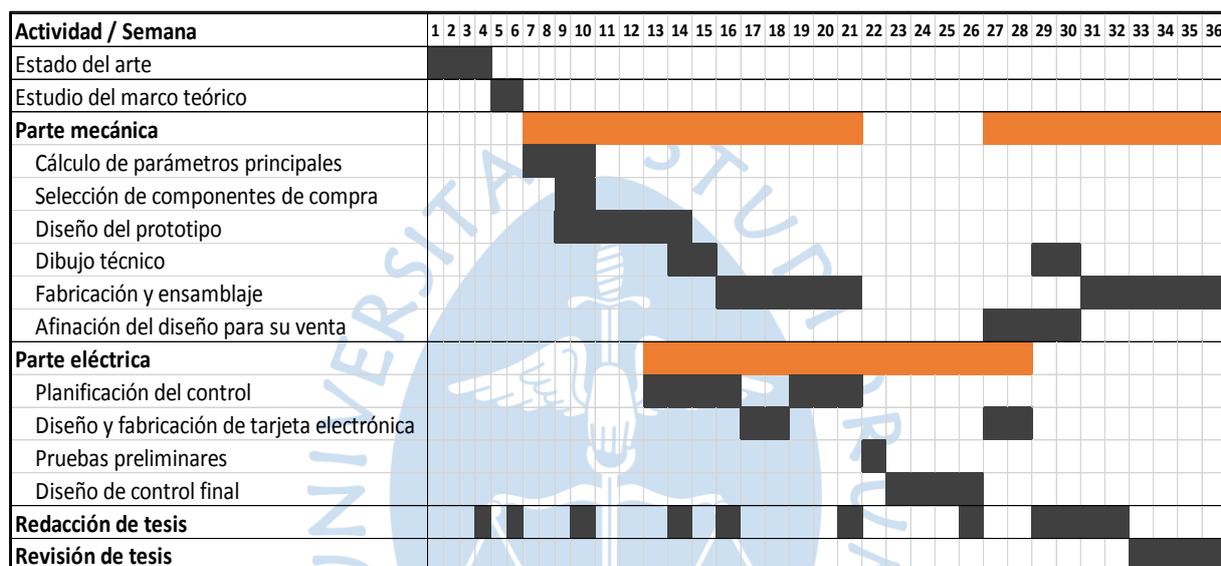


Figura 34. Cronograma de actividades propuesto en el plan de tesis.

Fuente: Elaboración propia.

Todos los plazos fueron cumplidos de acuerdo con el cronograma. Algunas actividades requirieron menos tiempo del planificado, y se brindó ese tiempo a otras tareas del cronograma, según se consideraron necesarias para perfeccionar o pulir sus resultados.

### 5.3.3. Costos

Esta restricción no es un valor fijo sobre el gasto total en la investigación, sino que se enfoca a un costo de fabricación que el sistema desarrollado no debía superar. Dicho monto se fijó en 2000 Euros, lo que equivale al costo de fabricación aproximado del sistema del proyecto anterior (*Handhabungsgerät*).

### 5.3.4. Análisis Modal de Fallas y Efectos

No se adjunta, pues no forma parte del alcance de la tesis, sino del proyecto general, y no estaba listo al momento de la culminación de la presente tesis.

### 5.3.5. Estructura de Descomposición del Trabajo (EDT)

Esta herramienta es una descomposición jerárquica del alcance total del trabajo a realizar por el equipo del proyecto para cumplir con los objetivos del proyecto y crear los entregables requeridos (Quinde, 2018). El EDT de la presente tesis se puede observar en la Figura 35.

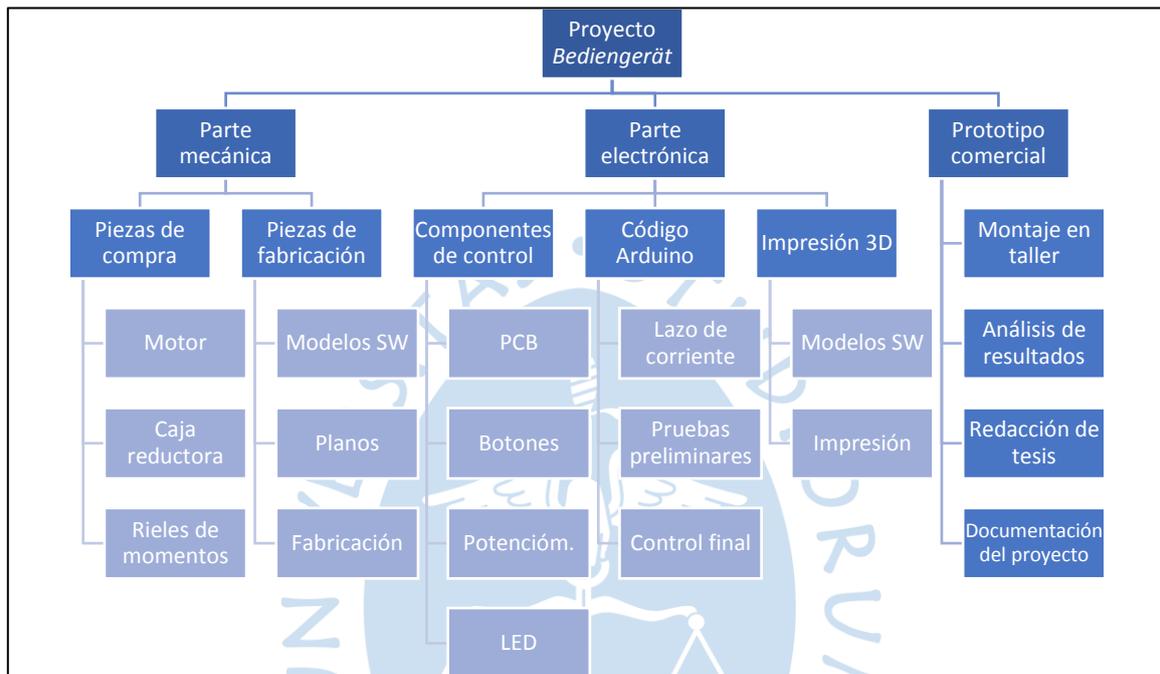


Figura 35. Estructura de descomposición del trabajo (EDT).

Fuente: Elaboración propia.

## Referencias bibliográficas

- Allmatic. (2012). *Projekt Knestel*. Projekte von Allmatic Spannsysteme.
- Allmatic. (2019). *Gripp Version TITAN 2 M MECHANISCH*. Obtenido de [https://www.allmatic.de/shop/produkte/ALLMATIC\\_GRIPP\\_Baureihen/Version\\_TITAN\\_2\\_K\\_M\\_L/Version\\_TITAN\\_2\\_M\\_MECHANISCH.html](https://www.allmatic.de/shop/produkte/ALLMATIC_GRIPP_Baureihen/Version_TITAN_2_K_M_L/Version_TITAN_2_M_MECHANISCH.html)
- Allmatic. (2019). *NC Version LCH 125 HYDRAULISCH*. Obtenido de [https://www.allmatic.de/shop/produkte/Automatisierbares\\_Spannen/NC\\_HYDRAULISCHE\\_Version\\_LCH/NC\\_Version\\_LCH\\_125\\_HYDRAULISCH.html](https://www.allmatic.de/shop/produkte/Automatisierbares_Spannen/NC_HYDRAULISCHE_Version_LCH/NC_Version_LCH_125_HYDRAULISCH.html)
- Chumán, J. (2017). *Diseño e implementación de un banco de pruebas automático para las mordazas mecánicas en Allmatic (tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánico-Eléctrica)*. Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.
- EcuRed*. (24 de Noviembre de 2019). Obtenido de [https://www.ecured.cu/M%C3%A1quina\\_herramienta](https://www.ecured.cu/M%C3%A1quina_herramienta)
- EN 692:2005+A1:2009. (2009). *Machine tools - Mechanical presses - Safety*. International Organization for Standardization.
- Espeso, J., Fernández, F., Espeso, M., & Fernández, B. (2008). *Seguridad en el Trabajo, Manual para la formación del especialista*. Valladolid: Lex Nova.
- Gomeringer, R. (2014). *Tabellenbuch Metall*. Haan: Europa-Lehrmittel.
- Gräf, W. (1997). *Maschinensicherheit*. Heidelberg: Hüthig.
- History & Maps*. (24 de Noviembre de 2019). Obtenido de <https://www.lahistoriaconmapas.com/historia/historia2/definicion-de-maquina-herramienta/>
- ICEX España Exportación e Inversiones. (2018). *Estudio de Mercado: El mercado de la máquina-herramienta en Alemania*. Resumen Ejecutivo, Berlín.

- ICEX España Exportación e Inversiones. (2019). *Informe de Feria: Hannover 2019*. Dusseldorf.
- Ipargama. (2019). *16MnCr5-Acero para cementar*. Obtenido de <http://www.ipargama.com/pdf/16MnCr5.pdf>
- ISO 12100:2010. (2010). *Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction*.
- ISO 13857:2019. (2019). *Safety of machinery — Safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs*. International Organization for Standardization.
- Maxon motor. (2018). *ESCON Module 50/8 HE Hardware Reference*. Obtenido de [https://www.maxongroup.ch/medias/sys\\_master/root/8834400550942/532872-586137-ESCON-Module-50-8-Hardware-Reference-En.pdf](https://www.maxongroup.ch/medias/sys_master/root/8834400550942/532872-586137-ESCON-Module-50-8-Hardware-Reference-En.pdf)
- Maxon motor. (2018). *ESCON Overview Catalog Page*. Obtenido de [https://www.maxongroup.ch/medias/sys\\_master/root/8831198232606/2018EN-442-443-446.pdf](https://www.maxongroup.ch/medias/sys_master/root/8831198232606/2018EN-442-443-446.pdf)
- Maxon Motor. (2019). *Micromotores y sistemas de alta precisión*. Obtenido de <http://maxon.blaetterkatalog.ch/b9990/catalog/index.html?data=b9990/b999054>
- McGeough, J. A., & McCarthy, W. J. (23 de 11 de 2019). *Encyclopedia Britannica*. Obtenido de <https://www.britannica.com/technology/machine-tool>
- McKechnie, G. (25 de Noviembre de 2019). *Encyclopaedia Britannica*. Obtenido de <https://www.britannica.com/technology/vise>
- Neugart. (2017). *Precision gearbox catalog*. Obtenido de [https://www.neugart.com/fileadmin/user\\_upload/Downloads/Product\\_Catalogs/Neugart-Product-Catalog-DE.pdf](https://www.neugart.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Product_Catalogs/Neugart-Product-Catalog-DE.pdf)
- Niemann, G. (2005). *Maschinenelemente, Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen*. Berlín: Springer.
- Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea. (s.f.). *Directiva 2006/42/CE*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Pingyuan Zhenghao Machinery Co., Ltd. (2019). *Precision Universal Vise*. Obtenido de <https://www.pyzhjx.com/Precision-Universal-Vise-6-91-1.html>
- PJRC. (2019). *Teensy 3.2*. Obtenido de <https://www.pjrc.com/teensy/teensy31.html#specs>
- Quinde, J. (2018). Dirección de proyectos. *Visión general*. Universidad de Piura.

- ROEMHELD Gruppe. (2017). *HILMA Turmspannsystem "TS 125" in der Horizontalbearbeitung*. Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=bfLIzfoxF2s>
- Statista. (2019). *Ventas nacionales e internacionales de la ingeniería mecánica alemana entre los años 2008 y 2018*. Obtenido de <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/235563/>
- Thyssenkrupp. (2019). *Ficha técnica-Aleación de aluminio EN AW-6060*. Obtenido de [https://es.materials4me.com/media/pdf/f9/e2/dc/ficha-tecnica\\_calidad\\_EN-AW-6060\\_espanol.pdf](https://es.materials4me.com/media/pdf/f9/e2/dc/ficha-tecnica_calidad_EN-AW-6060_espanol.pdf)
- Tikkanen, A. (25 de Noviembre de 2019). *Encyclopaedia Britannica*. Obtenido de <https://www.britannica.com/technology/vise>
- Ultimaker. (2019). *Ficha de datos técnicos ABS*. Obtenido de <https://ultimaker.com/download/67619/TDS%20ABS%20v3.011-spa-ES.pdf>
- Ultimaker. (2019). *Ficha de datos técnicos PLA*. Obtenido de <https://ultimaker.com/download/67583/TDS%20PLA%20v3.011-spa-ES.pdf>
- Vasquez, A. (2019). *Desarrollo de un sistema RF para monitorear la fuerza en una mordaza industrial*. Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.
- ZwickRoell. (2019). *Mordazas hidráulicas*. Obtenido de <https://www.zwickroell.com/es-es/mordazas/mordazas-hidraulicas>

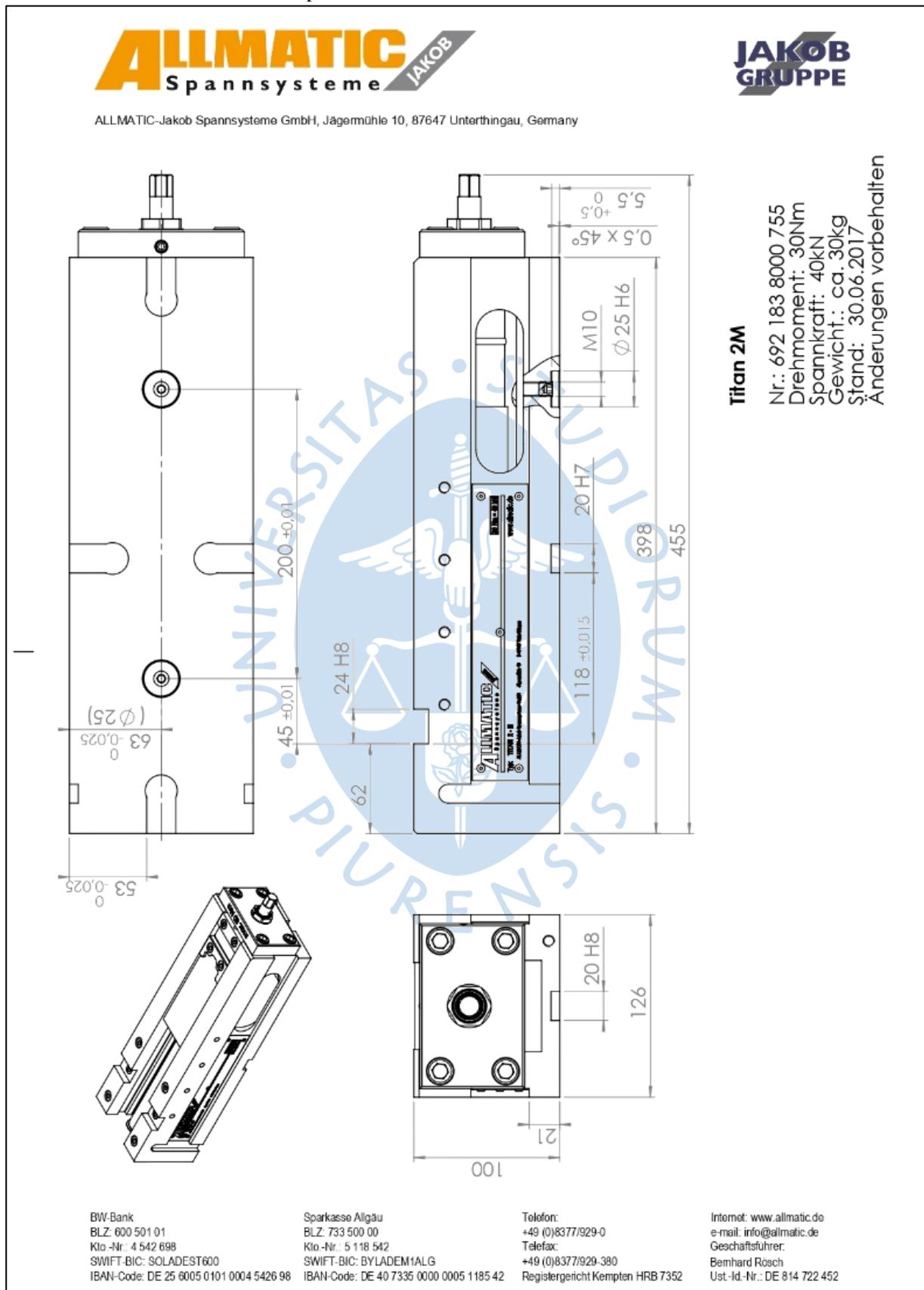


**Anexos**



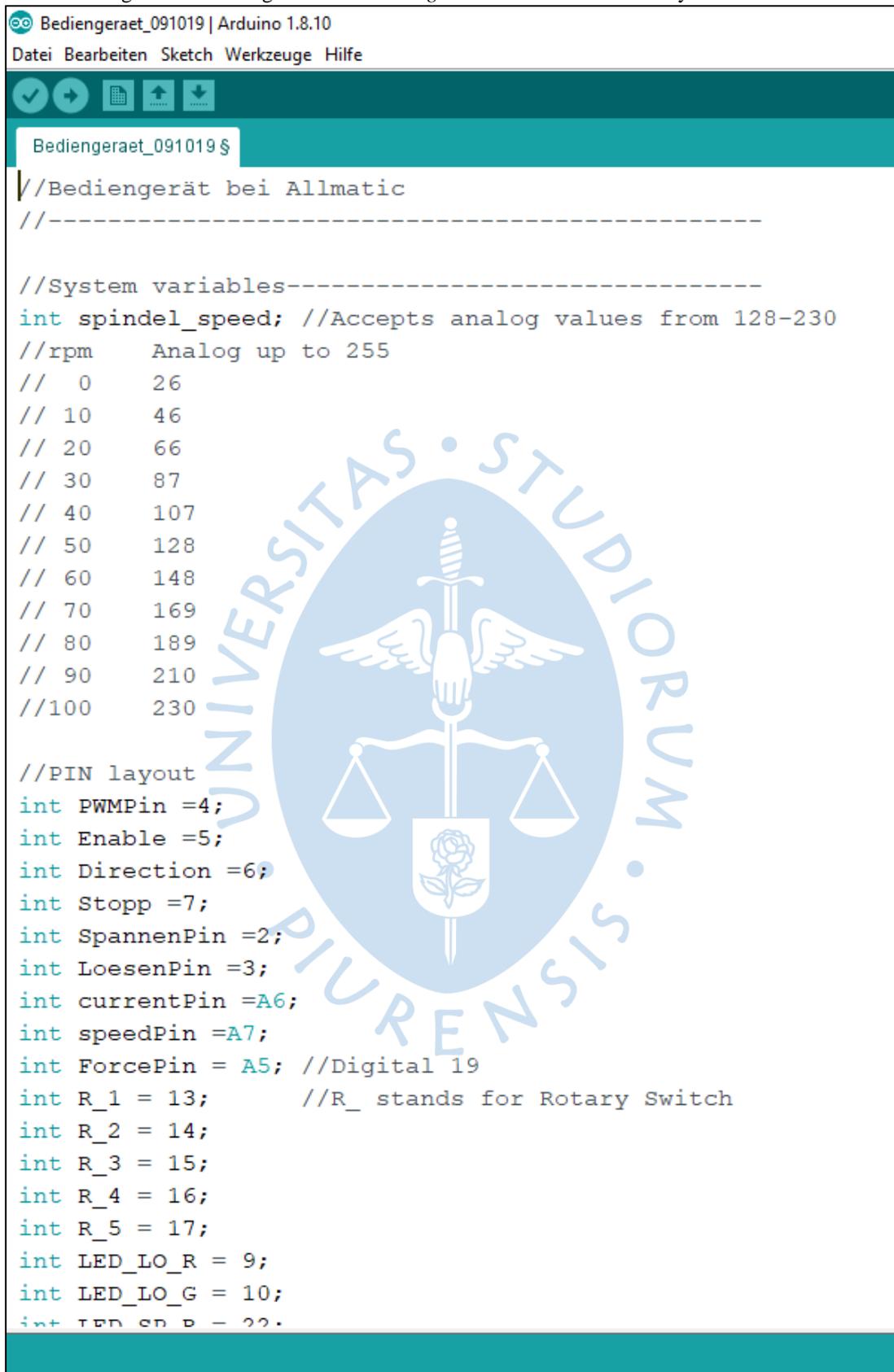


## Anexo 1. Plano del husillo TITAN 2 para clientes.



Fuente: (Allmatic, 2019)



Anexo 2. Fragmento del código final del *Bediengerät* en Arduino IDE/Teensy


```

Bediengerät_091019 | Arduino 1.8.10
Datei Bearbeiten Sketch Werkzeuge Hilfe

Bediengerät_091019 $
//Bediengerät bei Allmatic
//-----

//System variables-----
int spindel_speed; //Accepts analog values from 128-230
//rpm      Analog up to 255
//  0      26
// 10      46
// 20      66
// 30      87
// 40     107
// 50     128
// 60     148
// 70     169
// 80     189
// 90     210
//100     230

//PIN layout
int PWMpin =4;
int Enable =5;
int Direction =6;
int Stopp =7;
int SpannenPin =2;
int LoesenPin =3;
int currentPin =A6;
int speedPin =A7;
int ForcePin = A5; //Digital 19
int R_1 = 13;      //R_ stands for Rotary Switch
int R_2 = 14;
int R_3 = 15;
int R_4 = 16;
int R_5 = 17;
int LED_LO_R = 9;
int LED_LO_G = 10;
int LED_LO_B = 11;

```

Fuente: Elaboración propia.