

# **DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE CONTROL PARA MORDAZAS MECÁNICAS**

## *DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE CONTROL FOR MECHANICAL CLAMPS*

**Luis Enrique Paiba Samamé**

Allmatic-Jakob Spannsysteme GmbH, Alemania  
*luis.paiba.samame@gmail.com*

**César Alberto Chinguel Arrese**

Universidad de Piura, Perú  
*cesar.chinguel@udep.edu.pe*

**Carlos Diego Vega Cruz**

Universidad de Piura, Perú  
*carlosdiego.vegacruz@gmail.com*

**Recepción:** 29/octubre/2020

**Aceptación:** 8/diciembre/2020

### **Resumen**

En este proyecto se optimizó la mordaza electromecánica de alta sujeción “AutoClamp” de la firma alemana Allmatic-Jakob Spannsysteme GmbH, la cual inicialmente utilizaba un sistema de control a lazo abierto y placas electrónicas desarrolladas exclusivamente para este producto. Esto tiene como consecuencia costos muy elevados en su producción y en su mantenimiento. El objetivo de este estudio es realizar un nuevo control y una nueva electrónica con la finalidad de mejorar las tareas de sujeción de la mordaza, reducir costos y tiempos de fabricación de la electrónica. Se examinó las partes mecánicas, electrónicas y de software del sistema. Se desarrolló un control a lazo cerrado usando la medición de fuerza entre las mordazas como señal de realimentación y se diseñó una electrónica que permite incorporar componentes estandarizados. Según los resultados obtenidos en los ensayos se concluye que un control proporcional integrativo (PI) resulta adecuado para este tipo de sistemas.

**Palabras Clave:** Automatización, control, electrónica, mordazas.

## Abstract

In this project, the high clamping electromechanical clamp "AutoClamp" from the German firm Allmatic-Jakob Spannsysteme GmbH was optimized, which initially used an open loop control system and electronic boards developed exclusively for this product. This results in very high production and maintenance costs. The objective of this study is to carry out new control and new electronics in order to improve the clamping tasks of the jaw, reduce costs and electronics manufacturing times. The mechanical, electronic and software parts of the system were examined. A closed-loop control was developed using the force measurement between the jaws as a feedback signal, and electronics were designed that allow incorporating standardized components. According to the results obtained in the tests, it is concluded that a proportional integrative control (PI) is suitable for this type of system.

**Keywords:** Automation, clamps, control, electronics.

## 1. Introducción

Las mordazas transmiten altas fuerzas de sujeción y potencia mecánica mediante la transformación de un movimiento giratorio en uno lineal, [Vanegas, 2018]. El sistema AutoClamp (Figura 1) se trata de un husillo que posee un multiplicador de fuerza patentado que le permite alcanzar altos valores de fuerza entre las bocas de la mordaza y cuyo funcionamiento se acciona de forma electromecánica.

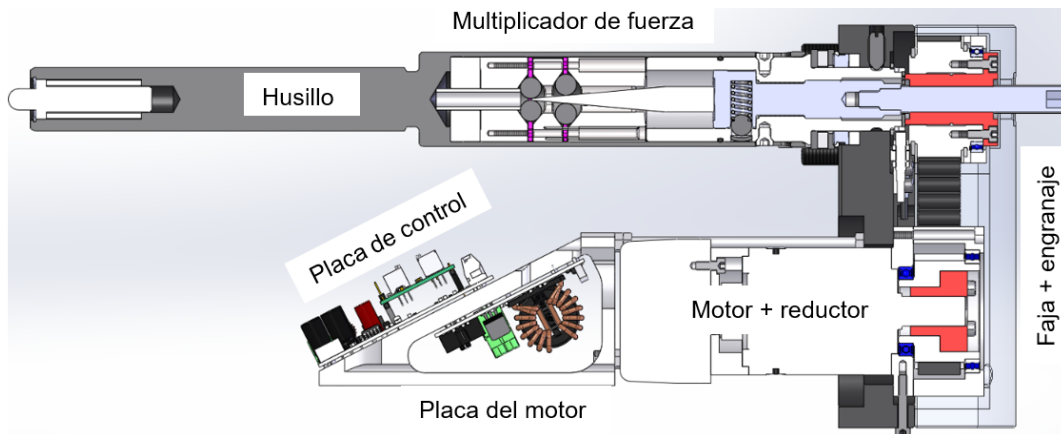
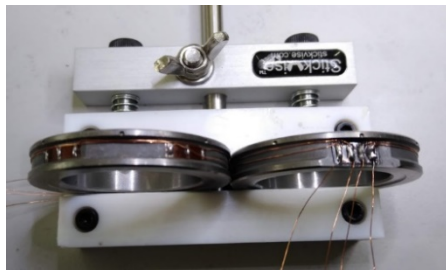


Figura 1 Esquema del sistema AutoClamp.

El sistema proporciona el giro mediante la acción de un motor eléctrico con su reductor y lo transmite por medio de una pareja de engranajes más una faja.

Cuenta también con un sensor de fuerza (Figura 2) que se trata de una pieza mecánica que tiene montado una pareja de galgas extensométricas, con esto se obtiene las lecturas de fuerza de apriete entre las bocas de la mordaza.

La electrónica del sistema constituye de dos placas: En la figura 3a se muestra la placa del motor que está encargada de alimentar y accionar el motor de 24 V, mientras que en la figura 3b se muestra la placa de control que se encarga de la lectura de sensores y del control del sistema.

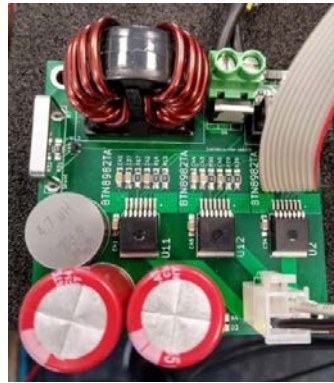


a) Galgas extensométricas



b) Ubicación celda de carga en el husillo

Figura 2 Sensor de fuerza.



a) Placa del motor



b) Placa de control

Figura 3 Electrónica del sistema.

En la placa de control tenemos:

- Controlador Teensy: Sistema embebido encargado de la gestión de señales.
- La placa de medición de fuerza: Placa encargada de tratar las señales obtenidas por las galgas extensométricas.

A excepción del controlador, todas las placas electrónicas han sido diseñadas y fabricadas por la empresa Allmatic-Jakob Spannsysteme GmbH.

El sistema trabajaba a altas corrientes y sumado con algunos inconvenientes en la referencia de tierras se obtenían ruidos en los sistemas analógicos.

Otro inconveniente era la robustez de la placa de medición de fuerza, esta es poca robusta porque trabaja con un amplificador operacional que presentaba mucha susceptibilidad a ruidos. Por último, el sistema empleaba un control a lazo abierto con un Set-point igual a 60 kN (60 kN: parámetro de diseño que debe cumplir el sistema), figura 4.

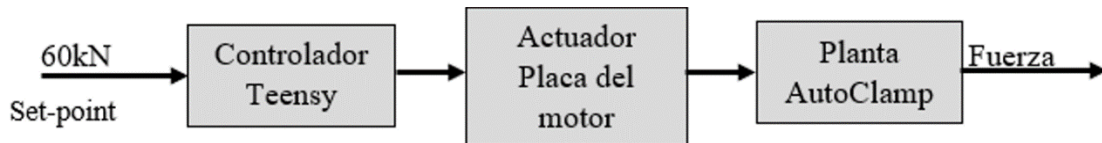


Figura 4 Sistema de control a lazo abierto del sistema AutoClamp.

## 2. Métodos

En este proyecto se ha desarrollado un prototipo de control a lazo cerrado el cual utiliza la señal de medición de fuerza como señal de realimentación para cerrar el lazo de control. También se ha realizado el diseño del circuito para una placa electrónica madre que integre los nuevos componentes electrónicos requeridos para la actuación y control del sistema. En la figura 5 se presenta el esquema de la propuesta de solución para el control y accionamiento del sistema.

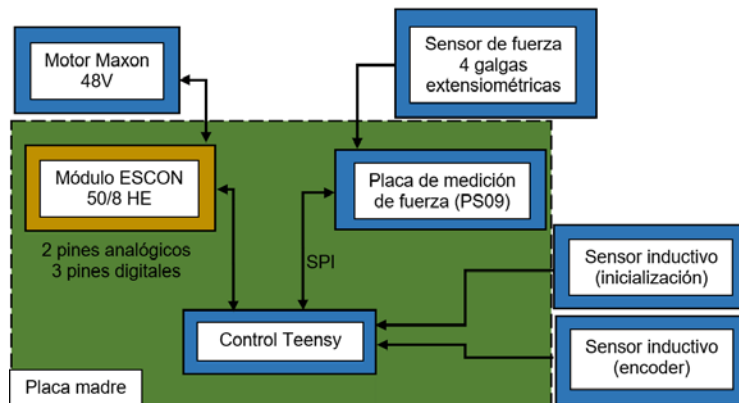


Figura 5 Esquema del prototipo para el sistema AutoClamp.

Para el accionamiento y control del motor, el prototipo utiliza el módulo ESCON 50/8 HE de la marca MAXON, que se trata de un servocontrolador con cuerpo refrigerante, figura 6 [MAXON, 2018]. El control del motor se realiza mediante el control de velocidad el cual es gestionado mediante una señal PWM.



Figura 6 Módulo ESCON 50/8 HE.

La limitación de corriente es una característica importante del módulo porque da una primera idea sobre que motor se puede utilizar sin comprometer la integridad del módulo, [MAXON, 2018]. La limitación de corriente para este dispositivo ESCON es igual a 15 A (valor especificado en la hoja de datos del ESCON).

El sistema AutoClamp inicialmente utilizaba un motor de la marca MAXON de 24 V y 100 W de potencia.

$$P_{max} = M_{max} * \frac{\pi}{30} * n_{max} = \frac{57.3 Nm}{32} * \frac{\pi}{30} * 3840 rpm = 720 W$$
$$I_{24V} = \frac{P_{max}}{V} = \frac{720 W}{24} = 30 A > 15 A_{servoacc}$$

$M_{max}$  = Par máximo del eje del motor – dato del motor.

$P_{max}$  = Potencia mecánica máxima – dato del motor.

$n_{max}$  = Velocidad máxima deseada – velocidad de giro del husillo deseado.

$I_{motor}$  = Corriente del motor – dato del motor.

$V$  = Voltaje de alimentación del motor – dato del motor.

Factor de reducción del dispositivo reductor es igual a  $i = 32$  – dato del motor. Los cálculos obtenidos de potencia y corriente, muestran que la corriente requerida del motor excede 2 veces la corriente permitida por el módulo ESCON 50/8 HE. Por esta razón la empresa desarrolló sus propias placas de motor.

Para poder usar este módulo ESCON manteniendo la misma potencia de 100 W se requiere de otro motor con mayor voltaje, esta deducción deriva de la ecuación de la potencia eléctrica.

$$P_{max} = M_{max} * \frac{\pi}{30} * n_{max} = \frac{57.3 Nm}{32} * \frac{\pi}{30} * 3580 rpm = 671.3 W$$

$$I_{48V} = \frac{P_{max}}{V} = \frac{671.3 W}{48} = 13.9 A < 15 A_{servoacc}$$

Con el nuevo motor de 48 V se ha logrado reducir la corriente manteniendo la potencia de 100 W. Ahora se puede sustituir la placa del motor por un dispositivo ESCON estandarizado. El motor se conecta al módulo ESCON como se muestra en la figura 7, [MAXON, 2018].

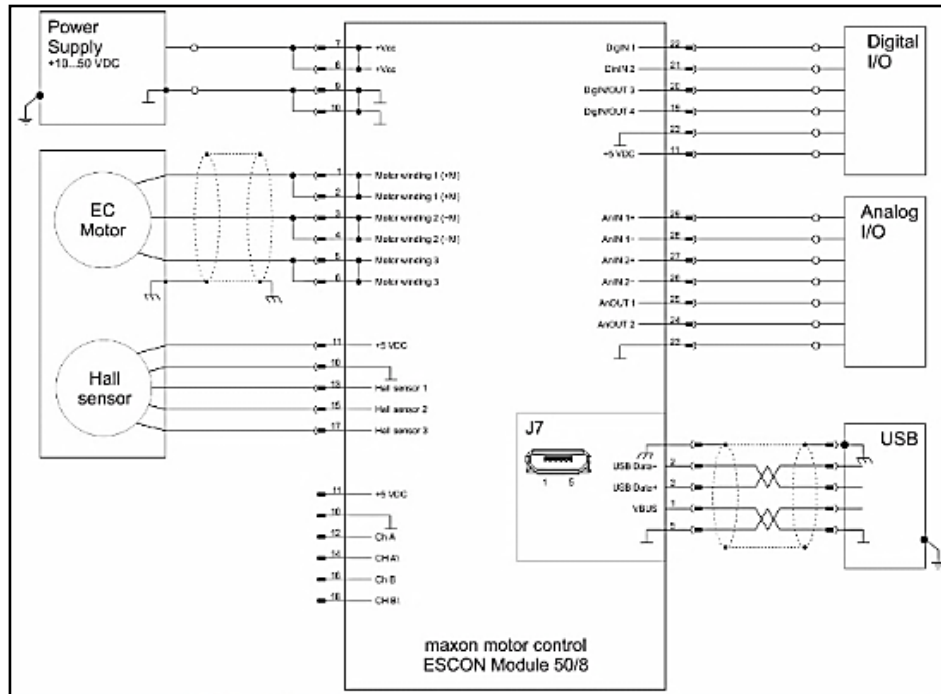


Figura 7 Conexiones del módulo ESCON 50/8 HE.

El módulo ESCON requiere el uso de bobinas de choque o bobina de ahogo en conjunto con otros componentes para ser utilizados como filtros para cada fase del motor, figura 8. Porque para altas tensiones de alimentación y bajas inductancias de conexión existe gran probabilidad que el rizado de la corriente del motor llegue a valores muy altos generando un sobrecalentamiento, [MAXON, 2018].

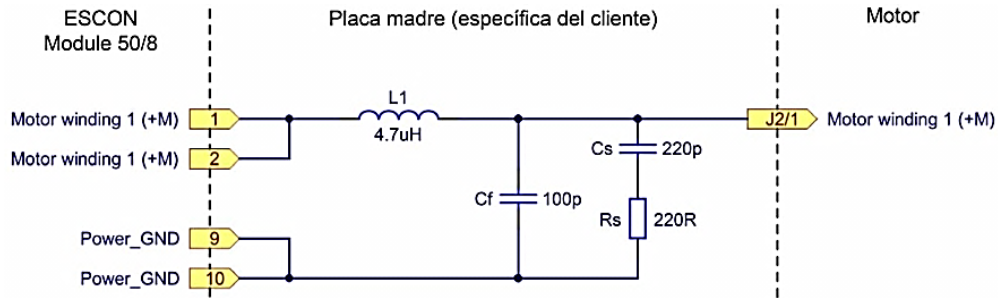


Figura 8 Filtro para las fases del motor.

L1: Bobina de choque del fabricante Würth Elektronik 4.7  $\mu\text{H}$  – dato fabricante.

$C_f$  y  $C_s$ : Capacitadores de 100 y 220 pF, 100 V, factor de forma SMD 0402, Würth Elektronik y Kemet respectivamente – dato fabricante.  $R_s$ : Resistencia 220  $\Omega$ , 0.25 W, factor de forma SMD 0603, Panasonic– dato fabricante.

El sistema AutoClamp utiliza también las señales de dos sensores inductivos, uno para el Encoder y otro para la inicialización de carrera de la boca móvil. Estas señales están entre los 24 V para la detección de metal y 0 V cuando no hay detección de metal, [IFM Electronic, 2017]. Esta tensión es excesiva para el controlador Teensy ya que su voltaje máximo de funcionamiento en sus pines es de 5.5 V, [Kolwidi, 2019]. Por esta razón se implementó un partidor de tensión. Además, se incorporó un filtro pasa bajo RC (figura 9).

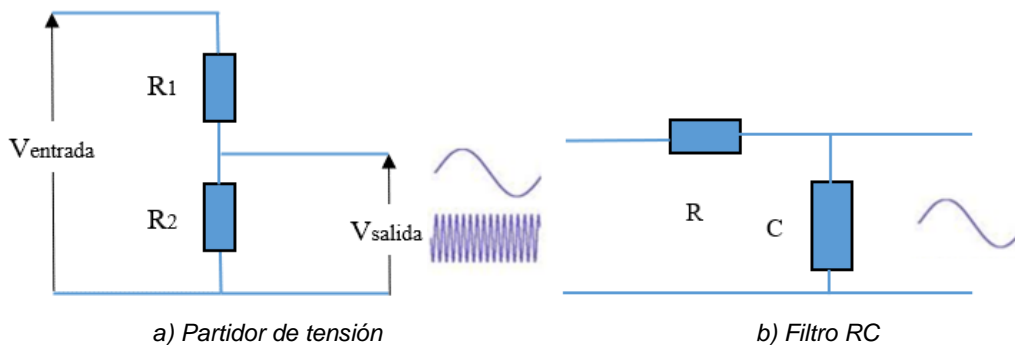


Figura 9 Circuitos para el filtro de las señales de los sensores inductivos.

$$V_{salida} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) * V_{entrada} = \left( \frac{1.5}{9.53 + 1.5} \right) * 24 = 3.27 \text{ V}$$

$$f_{corte} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 * \pi * 10 * 10^3 * 220 * 10^{-9}} = 72.34 \text{ Hz}$$

Se seleccionó la resistencia de 10 k $\Omega$  y el condensador 220 nF por fines prácticos, además la frecuencia 72.34 Hz es igual a 3.2 veces la frecuencia calculada que resulta un valor admisible.

Para la alimentación del controlador Teensy se utilizó un convertidor DC/DC de 48 a 5 V del fabricante TRACO POWER, el cual está conectado al mismo punto donde se alimenta al motor de 48 V. Este es un componente que trabaja a altas frecuencias y por esta razón requieren ser integrado con un circuito de filtrado. Este circuito se realizó siguiendo la norma EN55032, que trata sobre la compatibilidad electromagnética de equipos multimedia y requisitos de emisión. Esta norma acoge dos clases: equipos B de uso residencial y equipos A no residencial, el uso del sistema AutoClamp es de uso no residencial por lo tanto es de clase A, figura 10.

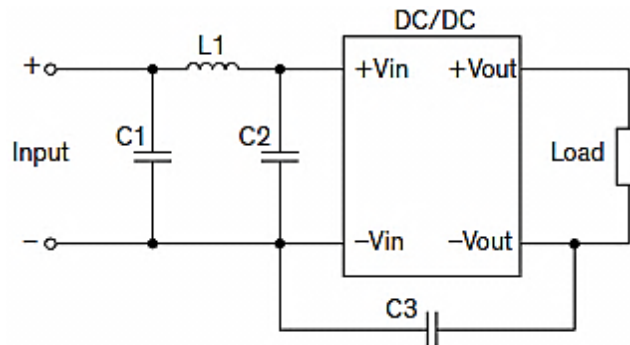


Figura 10 Diagrama de conexión de tipo A del convertidor DC/DC.

L1: Inductor 6868  $\mu$ H, 0.37 A – dato fabricante.

C1 y C3: Condensadores 2.2  $\mu$ F, 100 V y 150 pF, 2 kV – dato fabricante.

C2: según las indicaciones del fabricante para el modelo TEC 2-4811 no es necesario colocarlo si se trata de la clase A – dato fabricante.

En la tabla 1, se muestran los pines utilizados por el controlador Teensy para la conexión con el módulo ESCON, señales de los sensores inductivos y para la comunicación con la nueva placa de medición de fuerza mediante el protocolo SPI. La programación del controlador Teesny se realizó gracias a Teensyduino que se trata de un archivo ejecutable que permite sincronizar la placa Teensy con la interfaz del Arduino.



Tabla 1 Pines establecidos para el controlador Teensy.

Teensy 3.2			
Numero de Pin	Función	Numero de Pin	Función
GND	GND	15	Velocidad actual
8	Sensor Position	21	Dirección
9	Sensor Encoder	22	Enable
10	SS	23	PWM
11	MOSI	3.3V	Alimentación placa de medición
12	MISO	AGND	Referencia analógica
13	SCLK	Vin	Alimentación del controlador
14	Corriente actual		

El prototipo cuenta con una nueva placa de medición de fuerza que emplea un microprocesador PS09 con el que se obtiene una lectura más precisa de la fuerza y brinda la opción de comunicarse con ella mediante el protocolo de comunicación SPI (Figura 11). Esto exige un bus de señales: MISO, MOSI, SCLK y SS, [Cristina, 2014]. En la figura 12 se muestra la representación de la conexión entre el sensor de fuerza, la placa de medición y el controlador Teensy.

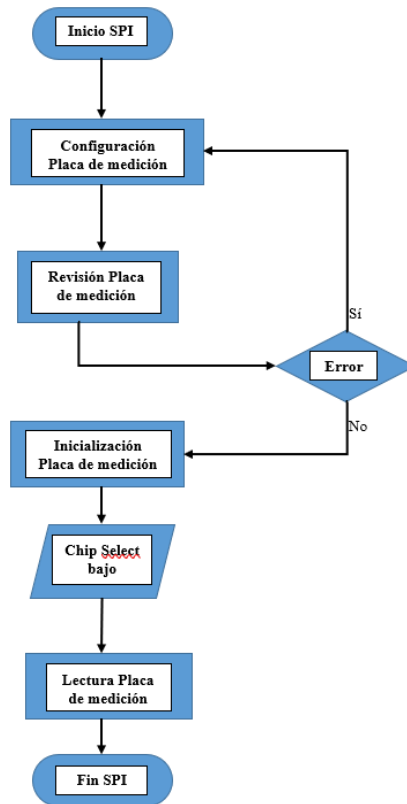


Figura 11 Diagrama de flujo de la comunicación SPI.

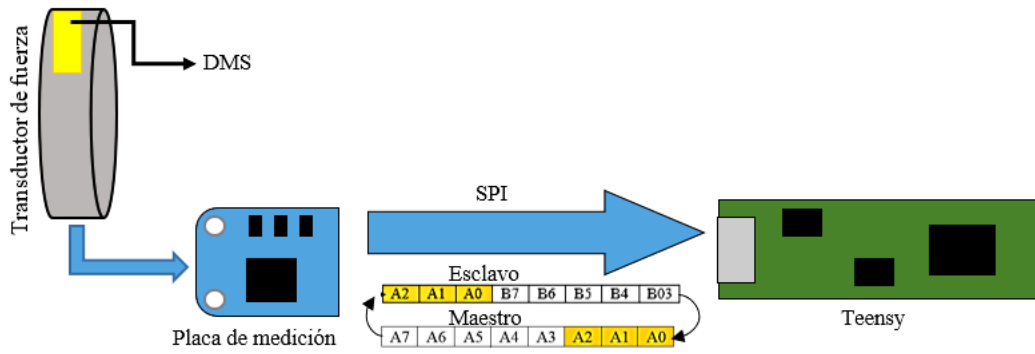


Figura 12 Esquema de conexión para la comunicación SPI.

La calibración de la placa de medición de fuerza se realizó tomando datos cada 5 kN, los valores de referencia se obtuvieron de un medidor de fuerza ALMEMO 2590 de la marca AHLBORN, figura 13. Durante 10 segundos se ejecutó la lectura obteniendo 40 datos por cada valor de fuerza, este proceso se realizó 5 veces obteniendo un total de 200 lecturas por cada fuerza.

Estos valores se promediaron obteniendo una serie de puntos con una tendencia lineal y para obtener la ecuación de la recta se realizó un ajuste por mínimos cuadrados del tipo lineal mediante una programación en Python.

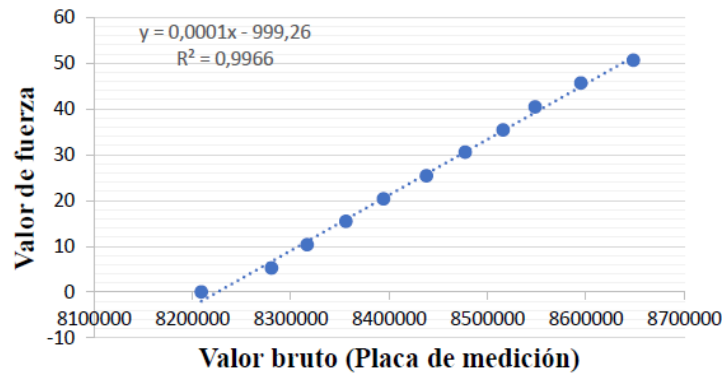


Figura 13 Calibración de la nueva placa de medición de fuerza.

Los datos se compilaron gracias al software PLX-DAQ que permite extraer los datos mostrados en el puerto serial del compilador Arduino a un archivo EXCEL.

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos en la experimentación de la aplicación de un momento sobre el husillo versus la fuerza de ajuste medida entre las bocas de la mordaza.

Tabla 2 Fuerza resultante aplicada vs fuerza resultante medida.

Llave de momentos	Lectura del sensor de fuerza
10 Nm	1.7 kN
15 Nm	3 kN
20 Nm	20.5 kN
25 Nm	26 kN
30 Nm	33.3 kN
35 Nm	38 kN
40 Nm	43.3 kN
45 Nm	48.2 kN
50 Nm	54 kN

Mediante el software ESCON STUDIO se realizó la configuración del servocontrolador. Figura 14 muestra la conexión del motor MAXON.

El sistema AutoClamp no cuenta con un modelo matemático que describa todo el proceso por lo que la sintonización del sistema de control se realizó mediante el ajuste del método de Ziegler-Nichols obteniendo oscilaciones permanentes y obteniendo la ganancia crítica ( $K_c$ ) y el periodo de oscilaciones ( $T_c$ ) en segundos, figura 15 [Gil, 2010].

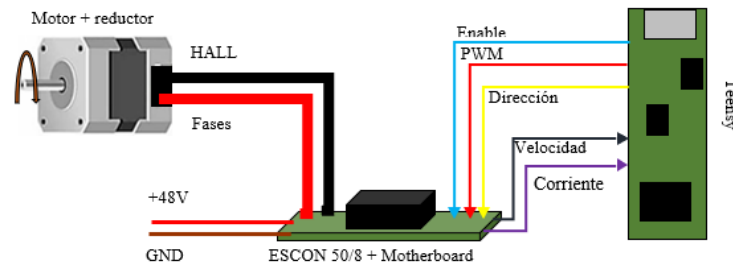


Figura 14 Representación de la conexión entre el controlador y el módulo ESCON.

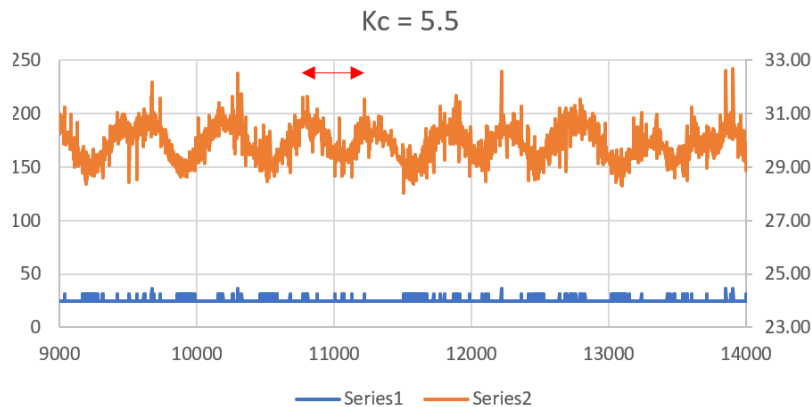


Figura 15 Sintonización por ganancia crítica a lazo cerrado.

Para el control del sistema, se propone un sistema de control proporcional integrativo (PI) en paralelo debido a la histéresis del sistema, porque al disminuir la carga en las bocas la recuperación elástica del sensor de fuerza describe una trayectoria distinta a la obtenida cuando se aplica el ajuste, figura 16 [Núñez, 2011]. Esto es debido a factores mecánicos y la dinámica misma que sigue el sistema, lo que ocasiona lecturas falsas por parte de la placa de medición y por esta razón es necesario llegar al valor de referencia con las mínimas oscilaciones posibles.

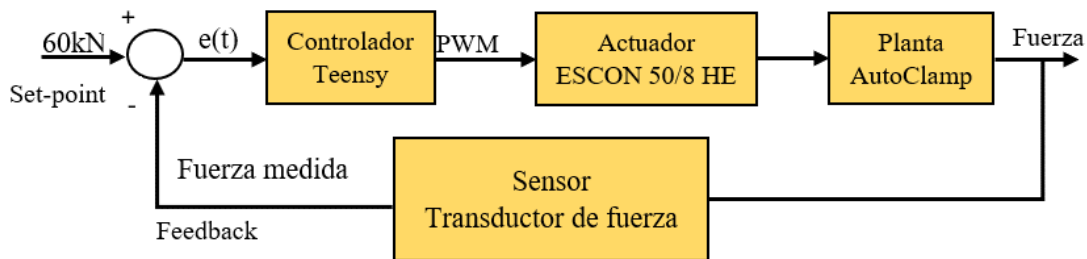


Figura 16 Diagrama de bloques del control a lazo cerrado del sistema AutoClamp.

### 3. Resultados

En el diagrama de flujo de la figura 17, se representa la secuencia de operaciones para el prototipo de control. Tarea de apriete: Primero se inicializa la comunicación SPI con la placa de medición de fuerza donde se configura y pasa a la comprobación de error. Si todo es correcto, inicia el control PI quien da la señal para la acción del motor. El motor se apaga cuando se llega a la fuerza requerida y pone fin a la tarea de apriete. Tarea de apertura: Se realiza la lectura del sensor inductivo – inicialización para poner en marcha el motor y este se apaga cuando el sensor detecta metal, ahí es cuando la boca móvil a llegado a su fin de carrera y por tanto finaliza la tarea de apertura. En la figura 18, se muestra el esquemático de conexiones base para la placa electrónica.

Las gráficas de las figuras 19 y 20 muestran los resultados del sistema cuando es controlado sólo con la componente proporcional del control PI. Se aprecian sobre pulsos que disminuyen a medida que el  $K_p$  disminuye, pero esta condición es no deseada porque lo que esta haciendo en realidad el sistema es apretar y soltar la pieza hasta llegar a la fuerza de apriete deseada. Este modo de funcionamiento no

es el correcto, porque lo que debe hacer la mordaza es coger la pieza a 60 kN en un solo movimiento. Además, trabajar de este modo es un escenario de incertidumbre porque debido a la histéresis mecánica del sistema, las lecturas de fuerzas no son precisas.

Las figuras 19 y 20 muestran los resultados del sistema cuando es controlado sólo con la componente proporcional del control PI. Se aprecian sobre pulsos que disminuyen a medida que el  $K_p$  disminuye, pero esta condición es no deseada porque lo que esta haciendo en realidad el sistema es apretar y soltar la pieza hasta llegar a la fuerza de apriete deseada. Este modo de funcionamiento no es correcto, la mordaza debe coger la pieza a 60 kN en un solo movimiento.

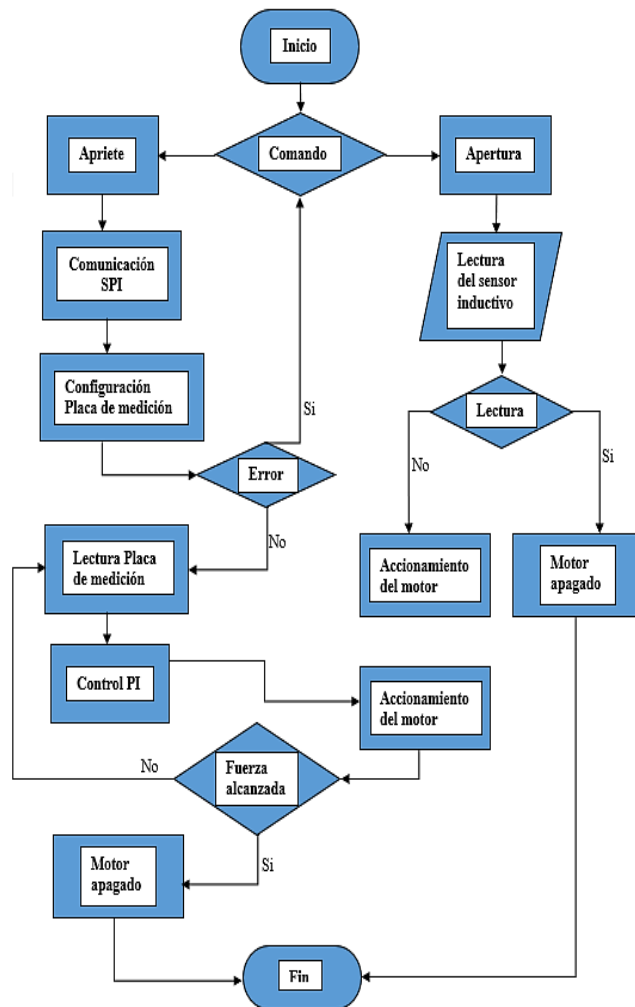


Figura 17 Diagrama de flujo del sistema prototipo.



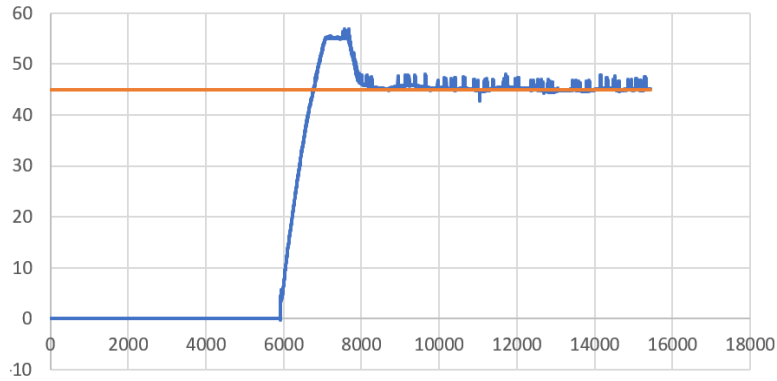


Figura 20 Acción proporcional  $K_p= 4.5$ .

Además, trabajar de este modo es un escenario de incertidumbre porque debido a la histéresis mecánica del sistema, las lecturas de fuerzas no son precisas.

En la figura 21 se muestra el resultado del sistema con la incorporación de un control PI, se observa que la incorporación del componente integrativo los sobre pulsos se reducen. Pero se evidencia que debe ser ajustado para llegar al valor deseado con los mínimos sobre pulsos posibles. Para esto se realizaron ensayos variando los valores del  $K_p$  y  $K_i$ .

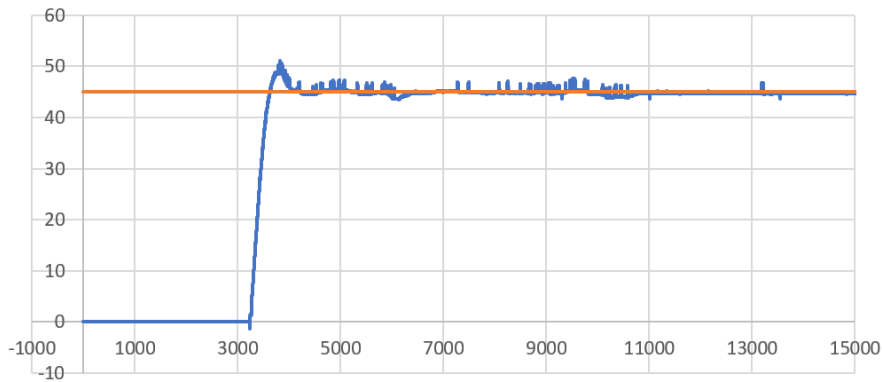


Figura 21 Ajuste PI con  $K_p= 4$  y  $K_i= 5$ .

En la figura 22 se muestra el resultado del sistema con un control PI ya ajustado, esto representa un correcto funcionamiento del sistema. Se debe considerar que son varias las posibilidades de combinación para los valores  $K_p$  y  $K_i$ , por lo que se buscó aquella opción que demande menos energía, es decir, aquella cuya área bajo la curva sea la menor posible.

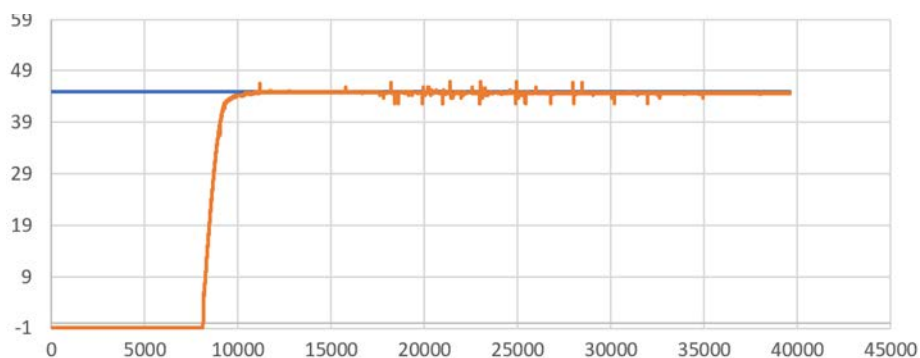


Figura 22 Ajuste PI con  $K_p = 2.6$  y  $K_i = 3.5$ .

## 4. Discusión

Se utilizó una comunicación SPI porque a diferencia del I2C, la comunicación SPI brinda una comunicación full duplex, es decir, una comunicación simultánea donde los datos circulan en ambas direcciones y también proporciona una mayor velocidad de transmisión, 20 Mbps más, esto es importante porque se desea que la lectura de fuerza sea lo más precisa posible. Además, el uso del protocolo SPI es el más conveniente en sistemas que utilizan un Datalogger, dispositivo electrónico para la adquisición de información durante el tiempo mediante un sensor, [Cristina, 2014]. En este caso el Datalogger es la placa de medición con el sensor de fuerza.

Teensy es un microcontrolador basado en un ARM del Arduino, pero con mayor potencia, incorporando un ARM Cortex-M4 de 180 Mhz, proporcionando la capacidad de ejecutar tareas 9 veces más rápido en comparación con el ATmega328P del Arduino. El controlador Teensy posee un procesador de 32 bits convirtiéndolo en una mejor opción cuando se tratan de aplicaciones que requieran más precisión y potencia de procesamiento de las que puede dar el microcontrolador Arduino. Por ejemplo, en el control de motores, [Kolwidi, 2019].

El controlador PID puede expresarse en forma de serie y en forma paralela, para este prototipo se trabajó de forma paralela, porque se utiliza una ganancia  $K_p$  distribuida en todos los elementos del controlador afectando así a todos sus componentes de control a la hora de hacer el ajuste, diferente es lo que pasa con el control PID en serie donde el  $K_p$  no sólo afecta a sus elementos del control sino que las componentes integral y derivativo afectan también al  $K_p$ , [Villajulca, 2018].



## 5. Conclusiones

El comportamiento con la implementación de un control PID posee varias oscilaciones y estas deben ser evitadas debido a la histéresis mecánica del sistema, el control establecido debe evitar overshoot muy grandes. Además, el error es constante y definido por la frecuencia de lectura del microchip PS09 de la placa de medición, por lo tanto, no hay una tasa de cambio por parte del error por lo que sólo interviene el control proporcional e integrativo. Mediante la experimentación para el ajuste del control se obtuvieron varios valores de  $K_i$  y  $K_p$ , para escoger una pareja de valores adecuados se debe evaluar el área bajo la curva y examinar que valores de  $K_p$  y  $K_i$  requieren menos energía para cumplir con el funcionamiento.

Utilizar un control de lazo abierto en este sistema obliga que su correcto funcionamiento esté sujeto a una buena calibración del sensor de fuerza ya que siempre le corresponderá una condición fija porque no realizará una comprobación de fuerza a la salida que ajuste el funcionamiento del motor.

El uso de un motor con mayor voltaje redujo la corriente un 53.6% por lo que se suplieron los inconvenientes de las altas corrientes y por lo tanto se superaron los problemas de ruidos y sobrecalentamiento.

Las ventajas de trabajar con menor corriente también se verán a la hora del diseño del PCB de la placa electrónica, porque se necesitarán conductores más pequeños, es decir, las pistas pueden ser más pequeñas ya que no requerirán transmitir altas intensidades de corriente.

La incorporación de nuevos componentes electrónicos que ya se encuentran en el mercado le permitirán a la empresa ahorrar tiempo y dinero en el ensamblaje y mantenimiento del sistema. Trabajar de forma modular es importante porque permite un desarrollo ágil y adaptabilidad en otros sistemas, importante en departamentos de desarrollo. Para un futuro trabajo de uso industrial se recomienda la implementación de otro microcontrolador. Por ejemplo: Módulos de Texas Instruments que gracias a su buen debugging permiten rastrear algún problema o realizar una mejora en alguna parte del algoritmo de la programación.

El control del sistema puede mejorar con la implementación de un control predictivo que permita gestionar eventos futuros.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Chumán Alvarado J., (2017). Diseño e Implementación de un Banco de Pruebas Automático para las Mordazas Mecánicas en ALLMATIC. Piura, Perú: PIRHUA Universidad de Piura.
- [2] Cristina García S., (2014). Implementación de analizadores de protocolos de comunicación SPI, I2C. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- [3] Gil Nobajas J., & Díaz Cordovés Á., (2010). Fundamentos de Control Automático de Sistemas Continuos y Muestreados. San Sebastián, España: Universidad de Navarra.
- [4] IFM Electronic, (2017). Detectores inductivos: <https://www.ifm.com/cl/es/product/IY5052?tab=details>.
- [5] Améstegui Moreno M., (2001). Apuntes de control PID. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andres.
- [6] Kolwidi, (4/junio/2019): <https://kolwidi.com/blogs/blog-kolwidi/arduino-vs-teensy>
- [7] MAXON, (2018). ESCON Module 50/8. Sachseln, Suiza: MAXON.
- [8] MAXON, (15/julio/2019): <https://maxon.blaetterkatalog.ch/b9990/catalog/index.html?data=b9990/b999045&lang=e#1>.
- [9] Núñez C., Roca A., & Jorba J., (2011). Comportamiento Mecánico de los Materiales, pp. 127. Universidad de Barcelona, Departamento de Ciencia de los materiales e Ingeniería Metalúrgica, Ciclo de histéresis de cargas cíclicas, Barcelona, España.
- [10] Pacco Chambi P., (8/agosto/2011): <https://es.slideshare.net/lonely113/sensores-inductivos-8801776>.
- [11] Technical.cat, (2020). technical.cat, automatización Industrial, Neumática Instrumentación Automatismos Domótica: <https://www.technical.cat/apuntes-tecnicos/cas-diferencias-entre-pnp-y-npn-apuntes-tecnicos-technical-manresa-igualada.pdf>.
- [12] Vanegas Useche L. V., (2018). Diseño de Elementos de Máquinas. Pereira, Colombia: Editorial Universidad Tecnológica de Pereira.
- [13] Villajulca J., (29/agosto/2018): <https://instrumentacionycontrol.net/diferentes-ecuaciones-de-controladores-pid/>.