



UNIVERSIDAD NACIONAL
de MAR DEL PLATA
.....

Desarrollo de Dispositivo Tensionador para el proceso de *Filament Winding*

Alumna

Eugenia Romero Barattucci

Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Mar del Plata

Departamento de Ingeniería en Materiales

Año 2026

Desarrollo de Dispositivo Tensionador para el proceso de *Filament Winding*

PROYECTO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE INGENIERA EN MATERIALES

Departamento de Ingeniería en Materiales

Alumna

Eugenia Romero Barattucci

Contacto: romerobeugenia@gmail.com

Director

Dr. Exequiel Rodríguez

Co-director

Ing. Julián Soldani

Grupo de Investigación

Compuestos Estructurales Termorrígidos (CET)

Institución

Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales
(INTEMA)

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mi familia , por acompañarme incondicionalmente durante toda la carrera. Gracias por el apoyo constante, por confiar en mí en cada paso y por ser el sostén más importante en cada momento de este recorrido.

A mis amigos y compañeros de estudio, con quienes compartí incontables horas de cursada, exámenes y trabajos prácticos. Gracias por hacer de estos años una etapa inolvidable, llena de aprendizajes, risas y experiencias que quedarán conmigo para siempre.

A mi director, Exequiel Rodríguez, y a mi codirector, Julián Soldani, por su guía, su compromiso y su predisposición durante todo el desarrollo de este trabajo final. Gracias por transmitirme sus conocimientos, por estar disponibles ante cada duda y por acompañarme en cada etapa del proyecto.

Al grupo de Compuestos Estructurales Termorrígidos (CET) y al INTEMA, por abrirme las puertas y permitirme formar parte de su equipo de trabajo. Gracias por brindarme el espacio, los recursos y el ambiente necesario para llevar adelante este proyecto.

A cada uno de ellos , ¡GRACIAS!

Nomenclaturas y abreviaciones

INTEMA	Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales
CET	Compuestos Estructurales Termorrígidos
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (polímero reforzado con fibra de carbono)
H_2	Molécula de Hidrógeno
FW	<i>Filament Winding</i>
CNC	Control numérico por Computadora
PID	(Control) Proporcional-Integral-Derivativo
DCL	Diagrama de Cuerpo Libre
RPM	Revoluciones Por Minuto
PLA	Ácido Poliláctico
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (pantalla LCD)
DGEBA	Diglicidil éter de bisfenol A
BIAS	Valor de salida del controlador para error cero
SP	<i>Setpoint</i> (valor deseado)

ÍNDICE

Resumen	6
Introducción	7
Alcance y Objetivos	9
Capítulo 1. Marco teórico	11
1.1 Hidrógeno en la transición energética	11
1.1.1 Almacenamiento y transporte.....	12
1.1.2 Recipientes a presión de material compuesto	13
1.2 Materiales Compuestos	16
1.3 Proceso de Filament Winding	18
Capítulo 2.Estrategias de diseño y control	23
2.1 Fundamentos generales del diseño.....	23
2.2 Sistema de control.....	25
Capítulo 3. Desarrollo y evolución del tensionador	28
3.1 Configuración preliminar.....	28
3.1.1 Conclusión parcial y limitaciones.....	33
3.2 Prototipo del módulo tensionador.....	33
3.2.1 Implementación del control PID.....	36
3.2.2 Conclusión parcial y limitaciones.....	39
Capítulo 4. Módulo tensionador	40
4.1 Diseño y ensamblaje.....	40
4.2 Sintonización.....	44
4.2.1 Resultados.....	45
4.2.2 Implementación de controladores PI y PID.....	49
4.2.3 Lógica de control: acción proporcional con BIAS.....	52
4.3 Ensayos experimentales.....	54
4.3.1 Metodología de ensayo.....	55

4.3.2 Conclusión parcial.....	60
Capítulo 5. Validación experimental del módulo tensionador	62
5.1 Acondicionamiento.....	62
5.2 Ejecución del bobinado.....	67
5.3 Análisis de resultados.....	71
5.3.1 Curvas de control.....	71
5.3.2 Medición de espesor.....	75
5.3.3 Conclusión parcial.....	77
Capítulo 6. Conclusiones y trabajo a futuro	79
Conclusiones.....	79
Trabajo a futuro.....	81
Anexo.....	82
Materiales y componentes.....	82
Apéndices.....	85
Apéndice 1. Sintonización de PID en el prototipo.....	85
Apéndice 2. Configuración y conexión del motor paso a paso RS 440-464.....	87
Apéndice 3. Remapeo lineal de la salida del controlador.....	88
Apéndice 4. Código de control en Arduino UNO.....	89
Apéndice 5. Resultados de ensayos experimentales.....	96
Referencias.....	105

Resumen

El hidrógeno constituye uno de los vectores energéticos clave en la transición hacia matrices energéticas descarbonizadas, y su almacenamiento a alta presión en tanques de material compuesto reforzado con fibra de carbono representa una de las alternativas más prometedoras para su transporte. Estos tanques se fabrican a través del proceso de *filament winding*, en el cual la tensión de la fibra durante el bobinado incide directamente sobre la compactación del laminado, el contenido de fibra y el espesor de pared del componente, resultando un parámetro determinante tanto para su calidad estructural como para el diseño. Sin embargo, el equipo de *filament winding* disponible en el laboratorio del grupo de Compuestos Estructurales Termorrígidos (CET) del INTEMA carecía de un sistema de control de tensión, lo que motivó el presente trabajo. El objetivo del presente trabajo fue diseñar, desarrollar y validar un módulo tensionador capaz de sensor y regular en tiempo real la tensión de la fibra durante el proceso, para su integración al equipo del laboratorio. El desarrollo se llevó a cabo mediante un enfoque iterativo estructurado en tres etapas sucesivas, en las cuales cada instancia permitió identificar limitaciones experimentales y definir criterios de diseño para la siguiente. La configuración final implementó una disposición de polea flotante entre dos poleas fijas, que estableció una relación lineal entre la señal de la celda de carga y la tensión de la fibra, y a la vez integró la función de acumulador de fibra en un único dispositivo. La lógica de control se implementó sobre una placa Arduino UNO empleando una ecuación de control proporcional más el término BIAS, cuyos parámetros operativos se determinaron experimentalmente. La validación del sistema se realizó a través de la fabricación de un tubo de fibra de carbono y resina epoxi de seis capas con tres ángulos de bobinado, laminado de forma continua sin interrupciones. Las curvas de control registradas demostraron que el sistema mantuvo la tensión próxima a la tensión deseada en todas las condiciones evaluadas, mientras que el análisis de micrografías del espesor del tubo arrojó un espesor de pared uniforme, lo que confirma el correcto funcionamiento del sistema de control durante la fabricación de la pieza. Los resultados obtenidos respaldan el correcto desempeño del módulo tensionador desarrollado y ponen a disposición del grupo CET una nueva herramienta que facilitará avanzar en el estudio de la influencia de la tensión de la fibra sobre las propiedades finales de los laminados compuestos.

Introducción

La creciente demanda de fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles ha posicionado al hidrógeno como uno de los vectores energéticos más relevantes de la actualidad. Su alta densidad energética por unidad de masa y la posibilidad de producirlo a partir de fuentes renovables lo convierten en una alternativa estratégica para la descarbonización de sectores industriales y de transporte. Sin embargo, su implementación a gran escala enfrenta desafíos significativos, principalmente vinculados al almacenamiento y transporte, dado que en condiciones normales de presión y temperatura presenta una muy baja densidad volumétrica.

Frente a esta limitación, los tanques de material compuesto reforzados con fibra de carbono se han consolidado como una solución tecnológica de gran interés, ya que permiten almacenar hidrógeno a alta presión con una relación resistencia-peso muy superior a la de los recipientes metálicos convencionales. Estos tanques se fabrican mediante la técnica de *filament winding*, un proceso automatizado en el cual mechas de fibra impregnadas en resina se bobinan sobre un mandril rotatorio siguiendo patrones geométricos definidos. La calidad estructural del componente depende de una serie de parámetros de procesamiento, entre los cuales la tensión de la fibra durante el bobinado ocupa un rol central. Una tensión adecuada y estable favorece la compactación del laminado, un mayor contenido de fibra y una menor porosidad, propiedades que definen el desempeño mecánico de la pieza final.

En el laboratorio del grupo CET del INTEMA, el equipo disponible carece de un sistema de control de tensión de la fibra, lo que limita la reproducibilidad del proceso y la posibilidad de estudiar sistemáticamente la influencia de este parámetro sobre las propiedades finales de la pieza laminada. Si bien existen dispositivos comerciales de este tipo, su costo es elevado y su implementación en un equipo de investigación no siempre es directa. Por este motivo, surge la necesidad de desarrollar un módulo propio, accesible y adaptado a las características del equipo del laboratorio.

El presente trabajo aborda el diseño, desarrollo y puesta a prueba de un dispositivo tensionador capaz de sensor y controlar en tiempo real la tensión de la fibra durante el proceso de *filament winding*. El desarrollo contempla la integración de aspectos mecánicos, electrónicos y de control, así como su comprobación experimental gracias a la fabricación de un tubo.

Estructura del trabajo

El escrito se organiza en seis capítulos. En el Capítulo 1 se presenta el marco teórico, abordando el rol del hidrógeno en la transición energética, los materiales compuestos y el proceso de filament winding. En el Capítulo 2 se desarrollan los fundamentos generales del diseño del tensionador y los conceptos básicos de sistemas de control. El Capítulo 3 describe el desarrollo iterativo del módulo, desde la configuración preliminar hasta el prototipo montado sobre el compensador de tensión existente. El Capítulo 4 presenta el diseño, fabricación y sintonización del módulo tensionador. En el Capítulo 5 se detalla la validación experimental del módulo tensionador con la fabricación de un tubo de material compuesto. Finalmente, en el Capítulo 6 se detallan las conclusiones generales del trabajo y las líneas de investigación propuestas como trabajo a futuro.

Alcance y Objetivos

Objetivo general

El objetivo principal del presente proyecto es diseñar y desarrollar un dispositivo tensionador capaz de medir y controlar en tiempo real la tensión de la fibra durante el proceso de laminado de tubulares y tanques mediante la técnica de *filament winding* (FW). Dicho dispositivo deberá integrarse al equipo de FW del grupo CET.

Su implementación permitirá mejorar el control de las variables de proceso de bobinado, siendo la tensión de la fibra un parámetro clave para optimizar la calidad y las propiedades mecánicas de los componentes fabricados con esta tecnología.

Alcance

Si bien existen soluciones tecnológicas desarrolladas a nivel industrial, el alcance del presente proyecto contempla el desarrollo de una alternativa accesible, acorde con el conocimiento técnico y los recursos disponibles en INTEMA. Por lo tanto, el diseño del dispositivo se aborda de manera progresiva, priorizando configuraciones simples y funcionales.

Asimismo, se establece como alcance inicial el diseño de un módulo tensionador destinado al control de la tensión de una mecha de fibra de carbono. Este módulo luego debe poder ser replicado y acoplado al sistema para controlar la cantidad de mechas deseadas para cada aplicación.

Objetivos específicos

- Estudiar la influencia de la tensión de la fibra en el proceso de *filament winding* sobre la calidad del laminado y las propiedades finales del material compuesto.
- Definir los requerimientos de diseño del dispositivo tensionador, en base a las características de la máquina de *filament winding* del INTEMA, el rango de tensiones de trabajo admisibles y las condiciones del proceso.
- Desarrollar un sistema electrónico y de control para el dispositivo tensionador, incluyendo la selección de los componentes electrónicos, la incorporación de una placa de adquisición de datos y la definición de la estrategia de control para medir y regular la tensión de la fibra en tiempo real.

- Validar experimentalmente el dispositivo tensionador en la máquina de *filament winding* del grupo CET. Se evaluará su capacidad de control durante el proceso de laminado.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1 Hidrógeno en la transición energética

El hidrógeno, además de ser el elemento más abundante del universo y el más liviano de la tabla periódica, se caracteriza por su elevada densidad energética. Esta propiedad lo convierte en un portador de energía de gran interés en el contexto energético actual. Sin embargo, no constituye una fuente primaria de energía, sino un vector energético. Esto implica que no se encuentra disponible en estado libre en la naturaleza, a diferencia de los combustibles fósiles, sino que debe producirse a partir de otras materias primas, como el agua o recursos fósiles, a través de procesos que consumen energía [1].

La producción de hidrógeno puede llevarse a cabo a partir de diversas fuentes primarias de energía, incluidas fuentes renovables como la eólica, solar e hidráulica. Cuando se obtiene mediante estos procesos que implementan energías renovables, su utilización final no genera emisiones de dióxido de carbono, ya que el único subproducto de su conversión energética es el agua. Esto lo convierte en una alternativa estratégica para la descarbonización del sector energético, al posibilitar la sustitución progresiva de combustibles fósiles en distintos sectores industriales. Por tales motivos, la utilización del hidrógeno contribuye a la reducción de la huella de carbono en actividades como la siderurgia y la industria petroquímica entre otras. Por otro lado, presenta ventajas en aplicaciones donde el peso es un factor determinante y existen limitaciones, debido a su elevada densidad energética por unidad de masa. Un ejemplo claro de ello se observa en el transporte de cargas pesadas, el sector marítimo y ciertas aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales, donde la relación energía-peso constituye un parámetro crítico de diseño [1], [2].

1.1.1 Almacenamiento y transporte

Desde el punto de vista energético, el hidrógeno posee una elevada densidad energética en términos máscicos (~ 120 MJ/kg), aproximadamente tres veces superior a la de los combustibles fósiles convencionales. Sin embargo, debido a su muy baja densidad volumétrica en condiciones normales de presión y temperatura ($\sim 89,9$ g/Nm³), presenta la menor densidad energética por unidad de volumen entre los combustibles comunes. Es decir, el hidrógeno almacena mucha energía por unidades de masa pero muy poca por unidad de volumen.

Esta característica se convierte en una limitación crítica ya que, para alcanzar un mismo nivel de suministro energético que otros combustibles, el hidrógeno debe almacenarse y transportarse en grandes volúmenes, incluso al circular por gasoductos. Como consecuencia, es necesario recurrir a procesos de compresión a altas presiones o a su licuefacción, realizando un enfriamiento hasta temperaturas criogénicas cercanas a -253 °C, procedimientos que implican consumos energéticos adicionales y mayores costos de infraestructura.

Aunque existe la posibilidad de aprovechar redes de gasoductos ya instaladas por medio de la inyección parcial de hidrógeno en mezcla con gas natural, esta alternativa encuentra limitaciones importantes relacionadas con la compatibilidad de materiales, la modificación de las propiedades del fluido transportado y las regulaciones técnicas vigentes. Por estas razones, la adaptación de la infraestructura existente es compleja e insuficiente para satisfacer los requerimientos de una cadena de suministro de hidrógeno a gran escala. Por ello, requerirá en el mediano y largo plazo el desarrollo de infraestructuras de transporte específicas para hidrógeno [3, pp. 89-120].

Fragilización por hidrógeno

Como se mencionó anteriormente, la molécula de H_2 es la más pequeña y liviana de la tabla periódica, esto facilita su difusión en materiales metálicos y complica su contención en sistemas de almacenamiento y transporte. Bajo estas condiciones puede producirse el fenómeno de fragilización por hidrógeno, el cual provoca una degradación de las propiedades mecánicas del material, especialmente una disminución de la ductilidad y de la resistencia mecánica, lo que incrementa el riesgo de fallas estructurales durante el servicio [2], [4].

La fragilización ocurre cuando átomos de hidrógeno difunden en la red cristalina del metal y se concentran en defectos microestructurales tales como dislocaciones, límites de grano o vacancias. La

presencia de hidrógeno en estas regiones puede alterar los mecanismos de deformación plástica del material y favorecer la nucleación y propagación de grietas, incrementando la susceptibilidad a fracturas frágiles bajo carga. Debido a estas limitaciones, en los últimos años ha crecido el desarrollo de materiales alternativos, como los materiales compuestos reforzados con fibras y estructuras multicapa con revestimientos poliméricos (*liners*), que presentan ventajas como alta relación resistencia-peso, resistencia a la corrosión y menor susceptibilidad a fenómenos de fragilización. Los compuestos no tienen una red metálica continua, por lo que no ocurre el mismo mecanismo de difusión intersticial que produce fragilización. Se puede decir, que la fragilización prácticamente no afecta a matrices poliméricas ni a los refuerzos de fibra. Además, los recipientes compuestos suelen incorporar *liners* poliméricos que actúan como barrera frente a la permeación del gas, eliminando el contacto directo entre el hidrógeno. La combinación de estas características, junto con la elevada relación resistencia-peso de las fibras de carbono, permite el desarrollo de recipientes capaces de operar a altas presiones con menor susceptibilidad a degradación por hidrógeno [4], [5].

En síntesis, el almacenamiento y transporte de hidrógeno constituyen uno de los principales desafíos para su implementación a gran escala. Actualmente, se almacena como gas comprimido o líquido en tanques destinados a aplicaciones móviles (automóviles, camiones y aeronaves) y estacionarias (plantas industriales o almacenamiento en sitio), generalmente de pequeña escala.

1.1.2 Recipientes a presión de material compuesto

En este contexto, los tanques y tuberías fabricados con materiales compuestos reforzados con fibra desempeñan un rol crucial. Específicamente los compuestos constituidos por fibras de carbono en una matriz epoxi, presentan una muy alta resistencia y rigidez combinadas con baja densidad. Esto se traduce en una reducción de peso significativa en comparación con estructuras metálicas, lo que los convierte en una alternativa tecnológica para el almacenamiento y transporte de hidrógeno comprimido [6]. En las últimas décadas se han producido avances significativos en los recipientes que contienen el gas, aumentando las presiones de almacenamiento de 200 a 700 bares. [5].

Tanques de material compuesto reforzados con fibra

Los recipientes a presión para almacenamiento de hidrógeno gaseoso se clasifican generalmente en cinco tipos de tanque como se muestra en la Figura 1, según los materiales utilizados y la configuración estructural del tanque.

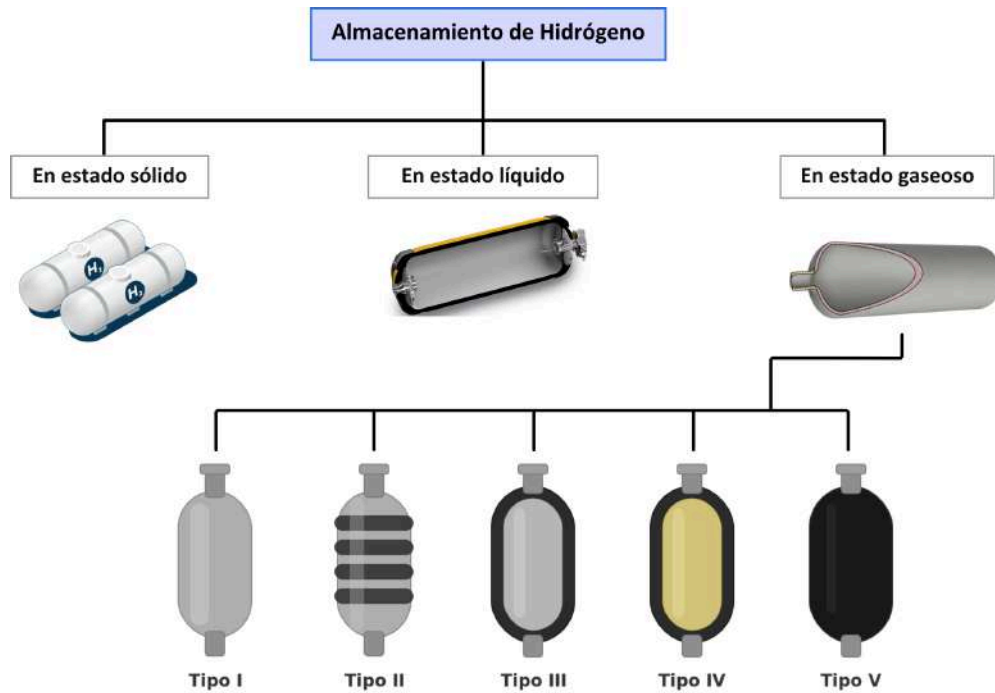


Figura 1. Métodos de almacenamiento de hidrógeno.

Tipo I

Son tanques completamente metálicos, normalmente fabricados en acero o aluminio. Se caracterizan por su robustez y bajo costo de fabricación, aunque presentan un peso elevado y una baja densidad de almacenamiento, lo que limita su uso en aplicaciones móviles.

Tipo II

Consisten en un cilindro metálico reforzado parcialmente con materiales compuestos mediante bobinado circunferencial. Este arreglo permite reducir hasta cierto punto el peso respecto a los tanques totalmente metálicos, aunque siguen siendo relativamente pesados.

Tipo III

En este tipo de tanques se utiliza un *liner* metálico interno, generalmente de aluminio, que garantiza la

hermeticidad del sistema, mientras que la resistencia estructural es proporcionada principalmente por una envoltura completa de material compuesto reforzado con fibras, frecuentemente fibra de carbono.

Tipo IV

Estos tanques incorporan un *liner* polimérico en lugar de uno metálico, completamente envuelto por un material compuesto reforzado con fibras de carbono. Con esta configuración se reduce significativamente el peso y se otorga una mayor resistencia a fenómenos como la corrosión o la fragilización por hidrógeno, por lo que actualmente representan una de las soluciones más utilizadas en transporte de hidrógeno.

Tipo V

Son recipientes completamente fabricados con materiales compuestos y no poseen *liner* interno. En este caso, el material compuesto cumple tanto la función estructural como la de barrera frente a la permeación del gas. Este tipo de tanques está aún en fase de investigación y desarrollo, principalmente para aplicaciones aeroespaciales [5].

Debido a la elevada relación resistencia-peso, los tanques compuestos reforzados con fibra de carbono, específicamente los de tipo IV, se han establecido como una solución ampliamente utilizada para el almacenamiento de hidrógeno a alta presión [5]. En este sentido, este tipo de estructuras son de especial interés para el presente proyecto final y para las líneas de investigación del grupo CET, donde se estudian materiales compuestos y procesos de fabricación asociados a su producción.

Tuberías de material compuesto reforzadas con fibra

A partir de la limitación que representa la fragilización por hidrógeno en tuberías metálicas convencionales, los materiales compuestos reforzados con fibras surgen como una alternativa de gran potencial para el transporte y almacenamiento de hidrógeno, debido a su alta resistencia mecánica, bajo peso y elevada resistencia a la corrosión.

Las tuberías compuestas para transporte de hidrógeno suelen estar formadas por estructuras multicapa. Generalmente incluyen un *liner* interno polimérico, que actúa como barrera para evitar la permeación del gas, y varias capas externas de refuerzo estructural compuestas por fibras, de vidrio o carbono, embebidas en una matriz polimérica. Estas capas externas son las responsables de soportar las cargas mecánicas producidas por la presión interna. Los tubulares se fabrican comúnmente mediante el proceso de bobinado *filament winding*, en los cuales los filamentos impregnados con

resina se enrollan alrededor de un mandril, con o sin *liner*, bajo una tensión controlada y formando estructuras cilíndricas capaces de soportar presiones elevadas. Este proceso de fabricación se describe con mayor detalle en secciones posteriores [7].

1.2 Materiales Compuestos

Se define como material compuesto a aquel material constituido por dos o más componentes físicamente distintos que permanecen separados a escala macroscópica y que, al combinarse de manera controlada, dan lugar a un nuevo material con propiedades que no pueden obtenerse a partir de los constituyentes por separado. Uno de los materiales actúa como fase continua o matriz, mientras que el otro se presenta disperso en forma de refuerzo. La matriz rodea y mantiene unido el refuerzo transfiriendo los esfuerzos mecánicos y otorgando cohesión al nuevo material. Por su parte, el refuerzo es el principal responsable de aportar resistencia y rigidez al compuesto.

La interacción entre ambas fases permite diseñar materiales con propiedades mecánicas y físicas optimizadas para aplicaciones específicas. Para ello, es necesario seleccionar adecuadamente el tipo de refuerzo, la matriz y la distribución geométrica de los componentes en función de la aplicación [8]. A modo ilustrativo, en la Figura 2 se presenta un esquema de clasificación general de los materiales compuestos.

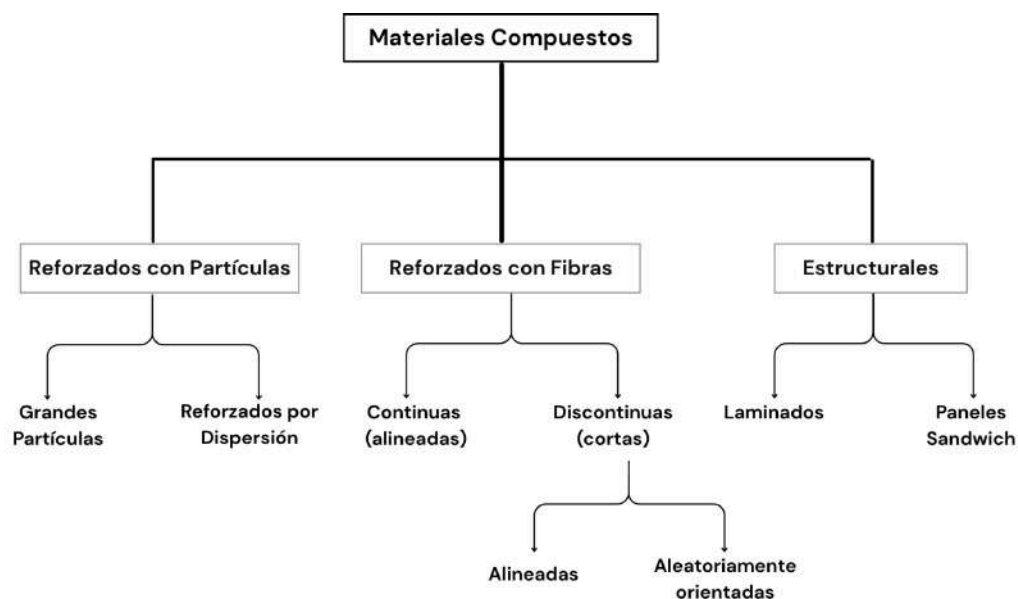


Figura 2. Diagrama de Clasificación de materiales compuestos.

Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra

Dentro de las distintas combinaciones de materiales compuestos, el presente trabajo se centra en aquellos reforzados con fibras continuas. La matriz polimérica cumple la función de mantener las fibras en su posición y protegerlas de factores ambientales como humedad, temperatura y agentes químicos. Además, contribuye a la tenacidad del material al impedir la propagación de grietas desde las fibras hacia el resto del compuesto [9].

Estos materiales presentan propiedades que los posicionan como una alternativa competitiva frente a los materiales metálicos convencionales. A diferencia de estos, exhiben un comportamiento mecánico anisotrópico, donde sus propiedades varían según la orientación de las fibras, lo que permite adaptar el diseño estructural a los requerimientos de carga de cada aplicación. Asimismo, la baja densidad de la matriz combinada con la alta resistencia de las fibras resulta en una relación resistencia-peso superior a la de los metales, con buena tolerancia al daño y posibilidad de formular coeficientes de expansión térmica mínimos o negativos, lo que reduce los problemas de dilatación en entornos con variaciones de temperatura [10].

Entre los sistemas que mejor aprovechan estas ventajas, los materiales compuestos reforzados con fibra de carbono y matriz de resina epoxi (CFRP, por sus siglas en inglés) se destacan como materiales estratégicos en aplicaciones de alto desempeño. La fibra de carbono aporta un módulo de elasticidad y una resistencia a la tracción notablemente elevada con una densidad muy baja, mientras que la resina epoxi proporciona alta adherencia a las fibras, baja contracción durante el curado, excelente resistencia química y buena estabilidad dimensional. La combinación de ambos componentes (la fibra como elemento resistente y la matriz como elemento cohesivo y transmisor de cargas) posiciona al CFRP como material de interés en la industria aeroespacial, automotriz y, en particular, en el almacenamiento de hidrógeno a alta presión por medio de recipientes de Tipo IV, donde el bobinado de fibra de carbono embebida en resina epoxi sobre un liner polimérico proporciona la resistencia necesaria para soportar presiones internas elevadas con una reducción de peso sustancial [11].

1.3 Proceso de Filament Winding

El laboratorio del grupo CET dispone de una máquina de *filament winding* (bobinado de filamentos) que es utilizada para la fabricación y desarrollo de tanques y tubulares de material compuesto, destinados a aplicaciones de alta performance, como el almacenamiento de combustibles a elevadas presiones para la industria aeroespacial. El proceso de FW se caracteriza por ser económico, altamente automatizado y de elevada velocidad de producción, alcanzando relaciones de fibra/resina cercanas a 60% (medido por el grupo CET).

En el esquema de la Figura 3 puede visualizarse el proceso de FW, el cual inicia con el desenrollado de mechas de fibra continuas y unidireccionales desde un carrete (*creel*) donde están los rodillos alimentadores de fibra (*rovings*). Las mechas de fibra pasan a través de rodillos que regulan la tensión y son alineadas con poleas guías antes de agruparse formando una banda uniforme con ayuda de un peine metálico o una placa textil. Posteriormente, las fibras se dirigen hacia una batea con resina líquida que contiene catalizador y otros aditivos, mantenida a temperatura constante mediante un sistema de calentamiento tipo baño maría que es regulado por un control de temperatura instrumentado con una termocupla. De esta forma, se puede ajustar la viscosidad de la resina y asegurar una correcta impregnación, evitando tanto el escurrimiento por baja viscosidad como la gelificación prematura. A la salida del baño, un dispositivo removedor elimina el exceso de resina y controla el espesor del recubrimiento. Las fibras impregnadas son conducidas hacia el *delivery eye* o devanador, elemento montado sobre un carro móvil que se desplaza longitudinalmente a lo largo del mandril y puede rotar sobre su propio eje, siendo el encargado de depositar la fibra sobre el mandril según un ángulo de bobinado determinado por la relación:

$$\theta = \frac{2\pi N r}{V}$$

Donde N representa la velocidad de rotación del mandril, r su radio y V la velocidad del devanador.

El movimiento alternativo (ida y vuelta) del carro hace posible el entrecruzamiento de las fibras formando el patrón de bobinado característico. Tanto el movimiento del devanador como la rotación del mandril y la trayectoria de la fibra se controla por medio de un sistema CNC (Control Numérico por Computadora) donde se cargan los códigos G* con las trayectorias de laminado. En el código se definen parámetros como el número de capas y los ángulos de laminado. Finalmente, la mecha de fibra es bobinada sobre un mandril metálico recubierto con agente desmoldante o bien directamente sobre un

*Código G: archivo de instrucciones que define los movimientos de la máquina de CNC de la FW

recipiente termoplástico previamente montado (*liner*). Una vez finalizada la laminación, el conjunto se somete a curado en horno donde la resina se polimeriza otorgando al componente sus propiedades finales. Luego del enfriamiento se procede al desmolde de la pieza obtenida [10].

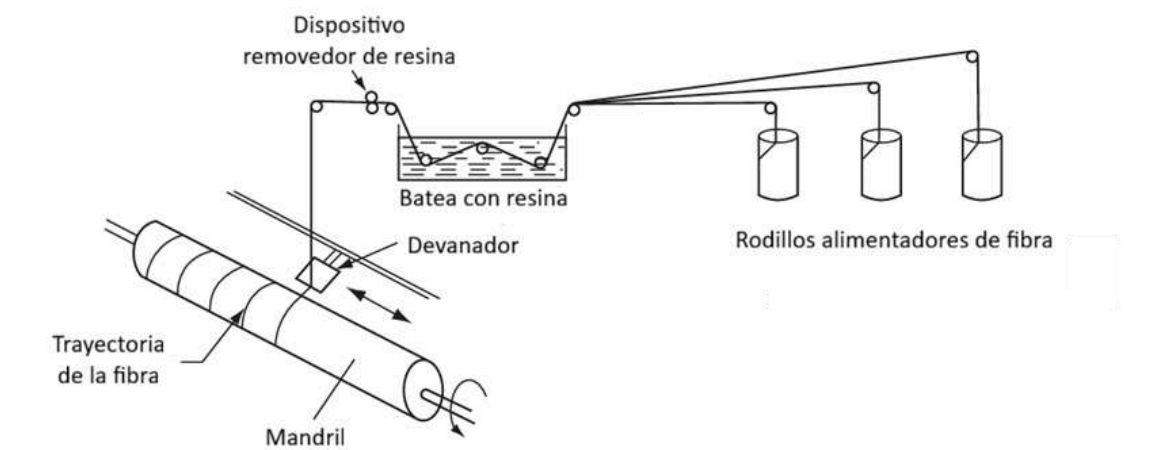


Figura 3. Esquema del proceso de Filament Winding.

Selección del ángulo de bobinado

El ángulo de bobinado representa un factor fundamental del procesamiento, ya que determina la anisotropía de la pieza y su capacidad para resistir diferentes solicitaciones. El bobinado convencional genera un patrón helicoidal donde el ángulo de la fibra se define respecto al eje longitudinal del mandril y puede tomar valores intermedios entre 0° (longitudinal) y 90° (circunferencial), véase Figura 4, [10].

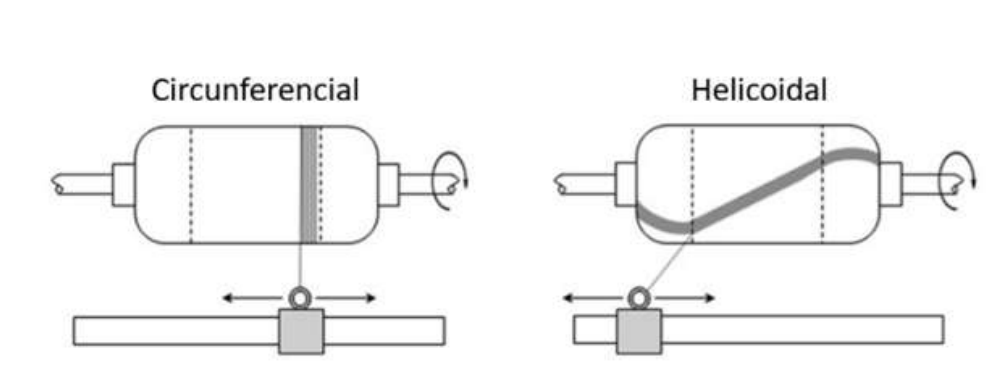


Figura 4: Ángulos de bobinado típicos.

Dependiendo de la aplicación, los ángulos de bobinado se eligen estratégicamente para soportar los esfuerzos a los que estará sometida la pieza. Para casos de recipientes sometidos a presión, las fibras deben ser capaces de soportar y equilibrar los esfuerzos circunferenciales (o *hoop stress*, σ_h) y axiales (o *longitudinal stress*, σ_a) [12].

Para tanques de almacenamiento a altas presiones, se emplea un arreglo multicapa. Se combinan capas *Hoop* (85°-88°) para contener el esfuerzo circunferencial de la sección cilíndrica, con capas helicoidales de diferentes ángulos que proporcionan resistencia longitudinal y continuidad estructural hacia los domos.

En el caso de tubulares, se establece el ángulo de eficiencia máxima teórico o ángulo óptimo geodésico (54.7°) basado en el Análisis de Red o *Netting Analysis*. Este análisis asume que solo las fibras soportan carga despreciando a la matriz, por ende, la fibra trabaja a tracción pura. Se aprovecha al máximo sus propiedades mecánicas, lo que permite reducir el espesor de pared y, en consecuencia, el peso del activo. Para que las fibras trabajen a tracción pura sin esfuerzos de corte en la matriz, se debe cumplir que:

$$\tan^2(\theta) = \frac{\sigma_h}{\sigma_a} = 2, \text{ de esta relación se obtiene } \theta_{\text{geodésico}} = 54.7^\circ$$

En la práctica industrial, también se emplean disposiciones multicapa para tubos. Los tubulares, además de resistir la presión interna, deben soportar cargas externas adicionales como flexión, pandeo y torsión. Un desajuste en estos ángulos respecto a la carga real puede generar microfisuras en la matriz. En aplicaciones de fluidos altamente difusivos, como el H_2 , esto deriva en el fenómeno de *weeping* o filtración [12].

Parámetros de procesamiento

Las propiedades finales del material compuesto son una consecuencia directa de las condiciones de procesamiento; por ello, es fundamental identificar y comprender las variables involucradas, ya que el control inadecuado de las mismas puede derivar en defectos típicos que comprometen la integridad estructural del componente. Dentro de los defectos más comunes se tienen: la porosidad (originada por impregnación insuficiente de resina o por la presencia de burbujas de aire), zonas secas (correspondientes a áreas sin resina impregnada), rotura de fibras (asociada a tensiones excesivas durante el bobinado), delaminación entre capas por baja compactación, arruga de fibras por alineación

inadecuada durante el bobinado y curado incompleto de la resina que compromete la consolidación del material [10]. A continuación se describen los principales parámetros de procesamiento en el proceso de FW y su influencia en la calidad final de la pieza.

Temperatura de la batea

La temperatura de la batea controla la viscosidad de la resina y, en consecuencia, su capacidad de impregnación sobre las fibras. La viscosidad ronda entre 1-2 Pa.s. Viscosidades bajas favorecen la impregnación, pero pueden generar escurrimiento y exceso de resina. Por el contrario, viscosidades altas dificultan la penetración de la resina en los filamentos, dando lugar a una distribución no uniforme, formación de vacíos y una deficiente adhesión fibra-matriz [10].

Velocidad de bobinado

La velocidad de bobinado constituye un parámetro determinante en el proceso, ya que afecta directamente la calidad del bobinado, la precisión en la deposición de las fibras y la uniformidad del espesor de capa. Velocidades elevadas incrementan la productividad del proceso; sin embargo, pueden comprometer la precisión del posicionamiento de las fibras, generar variaciones en la tensión durante el devanado y dificultar la correcta impregnación de resina, especialmente en geometrías complejas. Por el contrario, velocidades bajas favorecen un mayor control en la trayectoria de las fibras, aunque reducen la eficiencia del proceso.

Tensión de la fibra

La tensión de la fibra constituye una de las variables de mayor incidencia en el proceso, dado que influye directamente en el devanado de la fibra sobre el mandril, en la compactación del laminado y en el contenido final de resina, afectando en consecuencia el espesor de las capas obtenidas. Su control inadecuado puede derivar en distintos tipos de problemas: una tensión excesiva puede provocar la rotura de la fibra y una exudación elevada de resina, mientras que una tensión muy baja reduce el contenido volumétrico de fibra y complica el control preciso de la trayectoria de la fibra. Además, las variaciones de tensión a lo largo del proceso introducen inhomogeneidades en las propiedades mecánicas de la pieza final [10], [12].

Dado su impacto directo sobre la calidad estructural del componente, la tensión de la fibra debe mantenerse dentro de un rango adecuado al valor deseado a lo largo de todo el proceso de bobinado. Es aquí donde cobra relevancia y se justifica el desarrollo de un dispositivo tensionador con capacidad de sensado y control dinámico de la tensión, capaz de detectar y corregir desviaciones en tiempo real para garantizar la consistencia y reproducibilidad del laminado.

Capítulo 2

Estrategias de diseño y control

2.1 Fundamentos generales del diseño

Con el objetivo de establecer las bases conceptuales para el diseño del tensionador, se realizó una revisión bibliográfica de artículos científicos, desarrollos industriales y sistemas de control de tensión aplicados en procesos de bobinado de fibras. El análisis abarcó desde sistemas de guiado y tensado de fibras en la industria textil hasta dispositivos específicamente desarrollados para procesos de *filament winding*. En las Figuras 5 y 6 se ilustran ejemplos representativos de ambos casos. A partir de dicho estudio, se concluye que el control de tensión debe realizarse en condiciones dinámicas y en tiempo real dada la naturaleza del procesamiento. Se identificaron patrones en común en el diseño de sistemas de control de tensión industriales compuestos por: conjunto de poleas o rodillos guía para redirigir y alinear las fibras provenientes de los rodillos alimentadores; un elemento móvil capaz de transmitir la carga mecánica generada por la fibra; sensores de fuerza que convierten dicha señal mecánica en una señal eléctrica proporcional; y un actuador (sea motor, freno o sistema motorizado) que regula la velocidad de alimentación de los rodillos de fibra. Esta condición constituye un esquema consolidado en la industria y sirvió como referencia directa para la definición de los componentes del dispositivo desarrollado en el presente trabajo.

En función de los hallazgos obtenidos, se estableció como criterio de diseño transversal al proyecto el desarrollo de un dispositivo capaz de sensar la tensión de la fibra mediante una celda de carga y procesar dicha señal a través de una placa adquisidora de datos. Para mantener la tensión más cercana al valor deseado, el sistema debe ajustar la velocidad del rodillo alimentador de fibra. Este control se ejecuta a través de un motor paso a paso conectado al extremo del rodillo, el cual modifica su rotación en tiempo real según las lecturas del sensor de tensión. Esta estrategia, se basa en realimentación continua de dicha señal, lo que permite corregir desviaciones en tiempo real durante el proceso de laminado.

A lo largo del desarrollo experimental, el diseño se fue ajustando de forma progresiva, pero se mantuvo como lineamiento de diseño la implementación de un diseño mecánico lo más simple posible, a fin de minimizar fuentes de error y facilitar su armado. Los materiales y componentes utilizados en cada instancia pueden consultarse en el Anexo A.

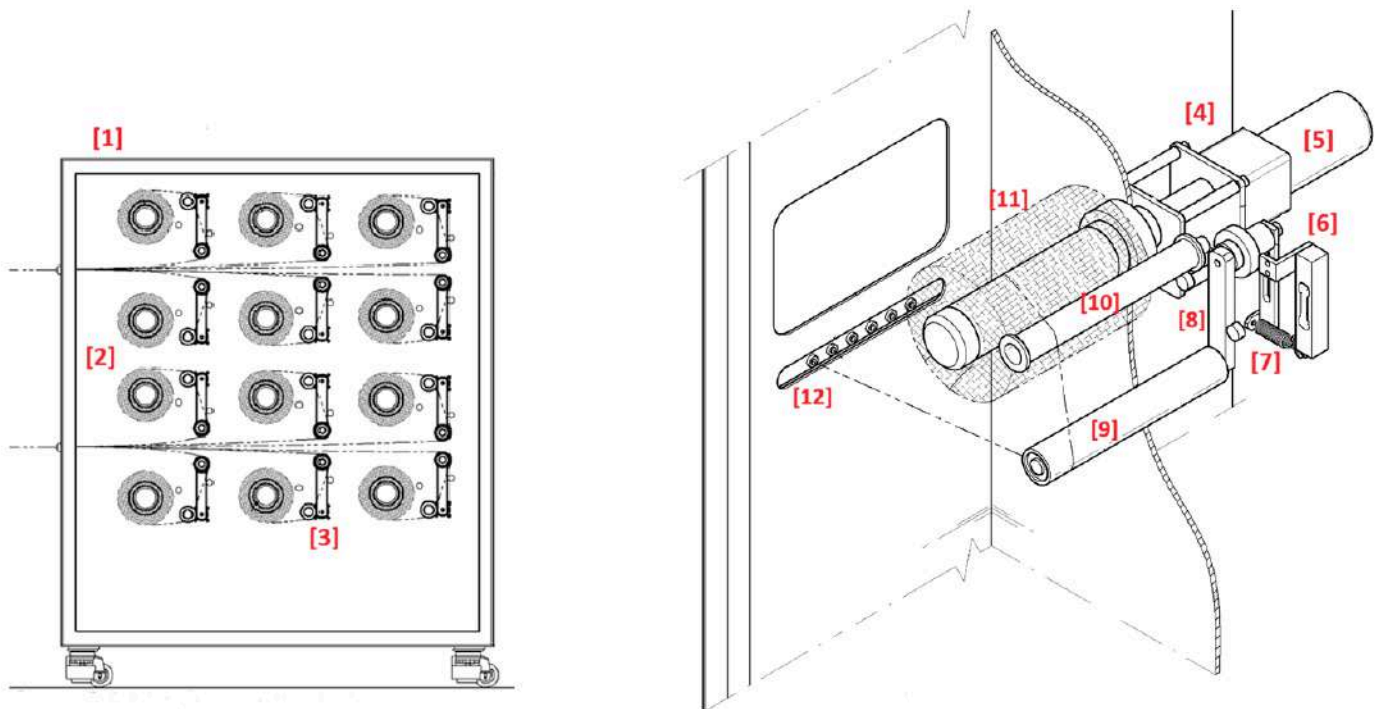


Figura 5. *Dispositivo de control de tensión textil.*

[1] Carrete alimentador de fibra. [2] Rodillos de fibra. [3] Brazo pivotante. [4] Motor + acoplamiento. [5] Eje de rotación del motor. [6] Celda de carga. [7] Resorte o muelle de tracción. [8] Palanca giratoria. [9] Palanca de tensión. [10] Rodillo guía. [11] Rodillo de fibra montado sobre eje de rotación. [12] Orificios guía de cerámica donde se retira la fibra.



Figura 6. Dispositivo para el control de tensión industrial para el proceso de Filament Winding [13].

2.2 Sistema de control

Como se mencionó previamente, la tensión de la fibra es uno de los parámetros fundamentales en la calidad estructural del componente. En primer lugar, es necesario definir la tensión a la que se desea laminar, dicho valor corresponde al *setpoint* (valor deseado). Durante el bobinado, se busca que la tensión medida se mantenga lo más cercana posible al *setpoint*, ya que esto garantiza un correcto seguimiento de la trayectoria de la fibra, evitando la aparición de defectos estructurales y por ende la disminución de las propiedades mecánicas [14].

Para lograr este objetivo, se decidió implementar un sistema de control PID que actúa como interfaz entre la señal proveniente de la celda de carga (*input*) y la señal de accionamiento del motor, regulando su velocidad en función de la tensión medida. Dicha señal es acondicionada y procesada por la placa de adquisición de datos Arduino UNO, encargada de realizar la conversión analógico-digital para su posterior procesamiento.

La unidad de control compara el valor medido con la referencia (*setpoint*) y, a partir del error, genera una señal de salida (*output*) que ajusta la velocidad del motor. De este modo, se establece un sistema de control por realimentación continua con el fin de minimizar la diferencia entre la tensión deseada y la medida, cerrando el lazo de control. La implementación de realimentación en tiempo real permite mantener la tensión dentro de un rango aceptable, incluso ante variaciones en la velocidad de laminado [15].

Control PID

El controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es uno de los algoritmos de control por realimentación más utilizados en la industria debido a su estructura sencilla, facilidad de implementación y robustez frente a una amplia variedad de procesos dinámicos. Su funcionamiento se basa en el procesamiento del error, definido como la diferencia entre la variable de referencia y la variable medida del proceso.

A partir de este error, el controlador genera una señal de salida que actúa sobre la variable manipulada del sistema. En términos generales, un sistema de control se describe mediante:

- Variable de proceso medida o **input**: $y(t)$
- Variable de referencia o **setpoint**: $r(t)$
- Variable manipulada o **output**: $u(t)$

Entonces, el error instantáneo se calcula como: $e(t) = r(t) - y(t)$, donde t representa el tiempo [16], [17].

El mecanismo de retroalimentación se representa en la Figura 7 por medio del diagrama de bloques.

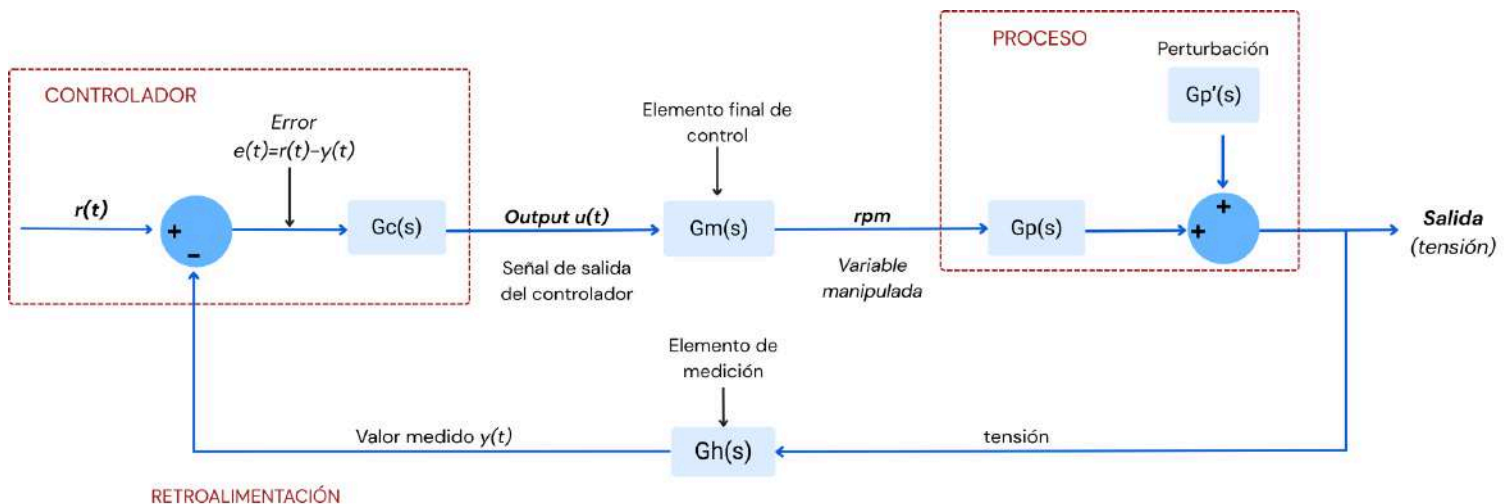


Figura 7. Diagrama de bloques del controlador por realimentación.

Donde:

$G_c(s)$: función de transferencia del controlador (Arduino).

$G_m(s)$: función de transferencia del elemento final de control, es decir accionamiento del motor.

$G_p(s)$: función de transferencia del proceso.

$G_p'(s)$: función de transferencia de una perturbación genérica sobre el proceso.

$G_H(s)$: función de transferencia del medidor/transmisor, en este caso la celda de carga.

$r(t)$: valor deseado o de referencia

Adicionalmente, debido a la relación inversa entre la velocidad del rodillo alimentador y la tensión de la fibra, el controló deberá presentar acción inversa, lo cual puede representarse mediante el signo de la ganancia del controlador

Al momento de implementar el algoritmo de control PID en un entorno de programación como Arduino IDE, la acción de control $u(t)$ se calcula a partir de la forma discreta de la ecuación del controlador e implementa ganancias independientes para cada una de las acciones proporcional, integral y derivativa [16].

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} + \text{BIAS} \quad (\text{forma continua})$$

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \Sigma e(k) \cdot \Delta t + K_d [e(k) - e(k - 1)]/\Delta t + \text{BIAS} \quad (\text{forma discreta})$$

Donde:

K_p es la ganancia proporcional.

K_i es la ganancia integral.

K_d es la ganancia derivativa.

$e(k)$ es el error en la iteración actual.

$e(k - 1)$ es el error en la iteración anterior.

Δt es el diferencial de tiempo entre iteraciones.

El término BIAS representa el valor base de la señal de control cuando el error es nulo, y se emplea para establecer una condición de operación de partida. En las primeras etapas de desarrollo (secciones 3.2.1 y 4.2) los ensayos se realizaron con $\text{BIAS} = 0$, ya que el objetivo era evaluar exclusivamente la respuesta del sistema ante las acciones proporcional, integral y derivativa. La incorporación de un término BIAS distinto de cero se aborda en la sección 4.2.3, donde se presenta la ecuación de control finalmente adoptada.

El término proporcional reacciona al error actual, el término integral acumula el error a lo largo del tiempo con el fin de corregir desviaciones sostenidas, y el término derivativo anticipa la tendencia del error a partir de su tasa de variación. La determinación de los valores adecuados de las ganancias no es arbitraria, cada parámetro incide de forma directa sobre la estabilidad y la precisión del sistema controlado. Por ello, existen métodos de sintonización formalmente establecidos donde se obtienen dichos valores de forma sistemática a partir de la respuesta dinámica del sistema. Entre los más utilizados en la práctica industrial, se encuentra el método de Ziegler-Nichols, el cual fue adoptado en el presente trabajo y se desarrolla en detalle en las secciones 3.2.1 y 4.2.

Capítulo 3

Desarrollo y evolución del tensionador

El tensionador fue desarrollado de forma progresiva, donde cada etapa permitió identificar limitaciones, reformular criterios de diseño y avanzar hacia una solución más robusta. Se partió de una configuración preliminar de carácter exploratorio, orientada a evaluar la viabilidad del concepto y adquirir experiencia práctica. Las limitaciones detectadas en esta primera instancia motivaron el rediseño de la disposición mecánica y la incorporación de un algoritmo de control PID, dando lugar a un segundo prototipo mejorado. Los resultados de ambas etapas definieron los criterios de diseño para la fabricación del módulo tensionador definitivo.

3.1 Configuración preliminar

La configuración inicial del diseño se planteó como una primera aproximación al problema. Este prototipo preliminar tuvo como objetivo principal evaluar la viabilidad del sistema tensionador, así como también adquirir experiencia práctica en programación, diseño mecánico y electrónica incluyendo tareas de montaje, conexiones y uso de herramientas de taller. En esta etapa no se incorporó ningún método de control automático, dado que el propósito fue exclusivamente exploratorio.

Configuración mecánica

El sistema fue montado sobre una placa de madera, sobre la cual se dispusieron dos poleas vinculadas por un brazo pivotante: una polea superior fija a la estructura y una polea inferior móvil articulada al brazo pivote. Los elementos utilizados para la construcción tanto de la configuración preliminar como del prototipo del módulo tensionador se detallan en el Anexo A.

Como se ilustra en la Figura 8, la fibra proviene de un rodillo alimentador, cuyo eje está vinculado por medio de una cadena a un motor paso a paso que gobernará la velocidad de giro. En la Figura 9, se muestra esquemáticamente la disposición. La fibra proveniente del rodillo alimentador pasa a través de la polea fija superior, desciende hacia la polea móvil inferior y luego se dirige hacia el mandril de la

máquina de FW. Cabe aclarar que, más allá de la posición angular del brazo, el tramo de fibra que sale de la polea móvil se mantiene siempre en dirección horizontal.

La polea móvil se vincula a un resorte, el cual está conectado en su otro extremo a una celda de carga. Ante una variación en la tensión de la fibra, la polea móvil se desplaza, produciendo el estiramiento del resorte y la consiguiente deformación de la celda de carga. El resorte actúa como elemento de conversión entre el desplazamiento angular de la polea y una fuerza medible, a partir de la cual se obtiene una medición indirecta de la tensión aplicada sobre la fibra. Asimismo, cumple una función adicional como elemento amortiguador frente a variaciones bruscas de tensión, protegiendo la celda de carga de impactos o sobrecargas instantáneas que podrían dañarla o distorsionar la medición [18].

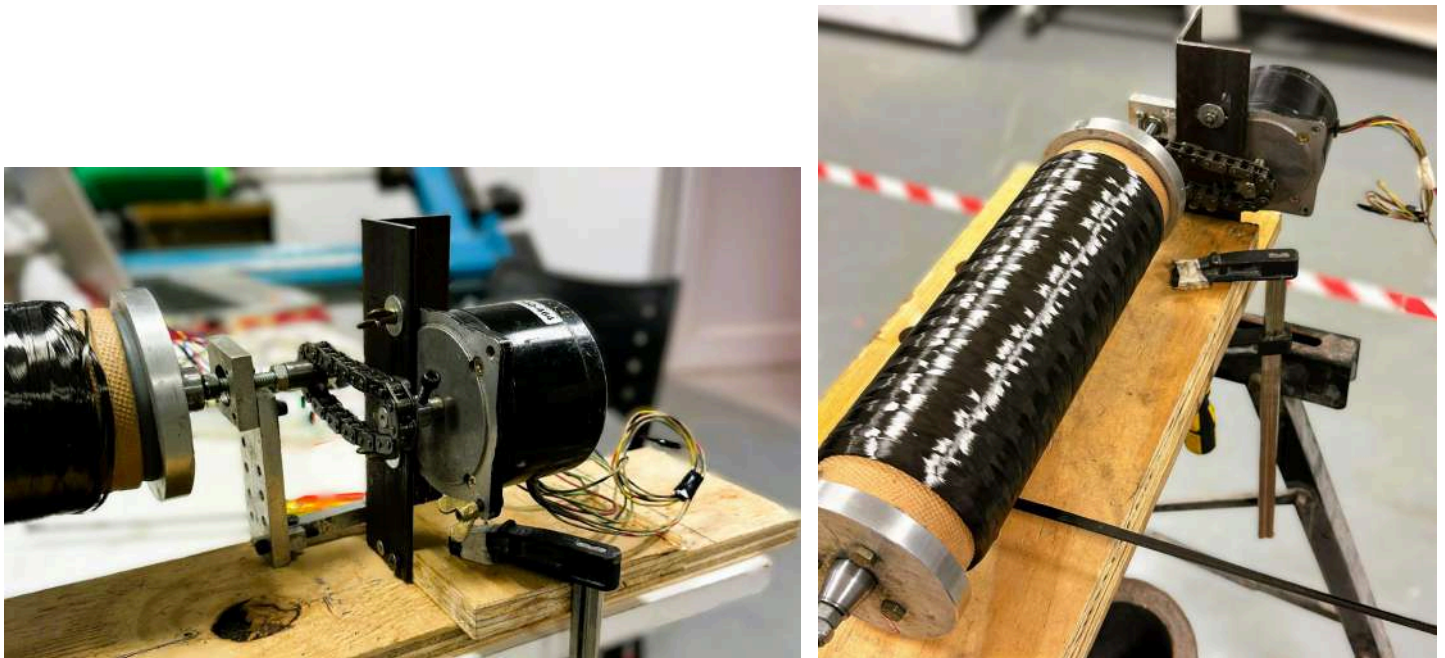


Figura 8. Rodillo alimentador junto con eje de transmisión.

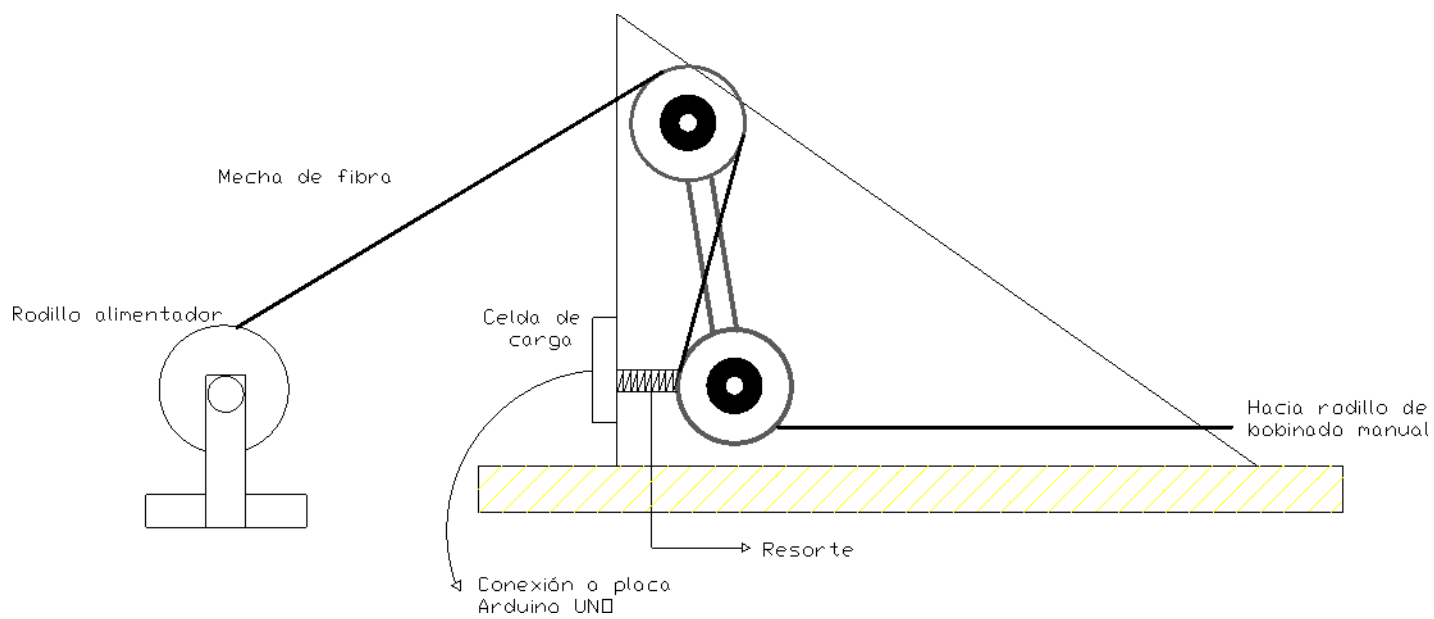
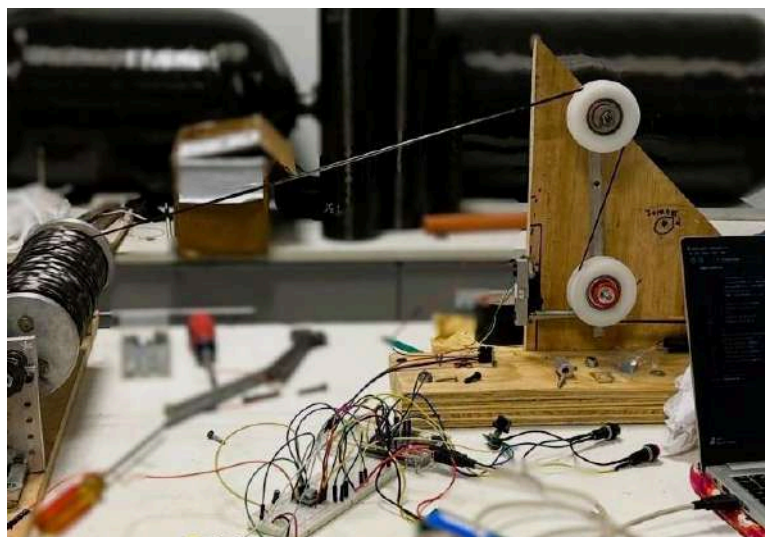
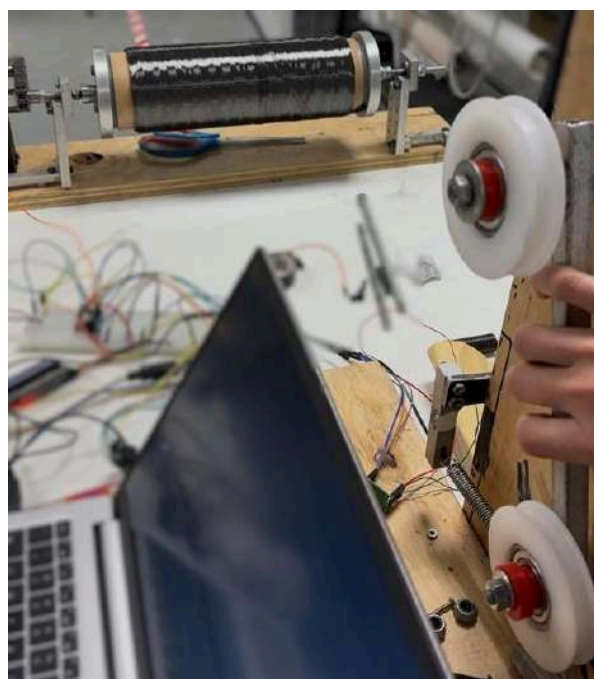


Figura 9. Ilustración en NanoCAD y fotos del montaje de la configuración preliminar.

Análisis mecánico

Con el fin de analizar el comportamiento del sistema de medición, se planteó un diagrama de cuerpo libre (DCL) de la polea móvil tal como se muestra en la Figura 10. En la posición de reposo, la polea móvil está alineada verticalmente con la polea fija, de modo que el tramo de fibra que las vincula es perfectamente vertical y el resorte no se encuentra solicitado. Al producirse tracción sobre la fibra, la polea móvil gira en torno al pivote generando un ángulo “ θ ” variable entre el tramo de fibra diagonal y la vertical.

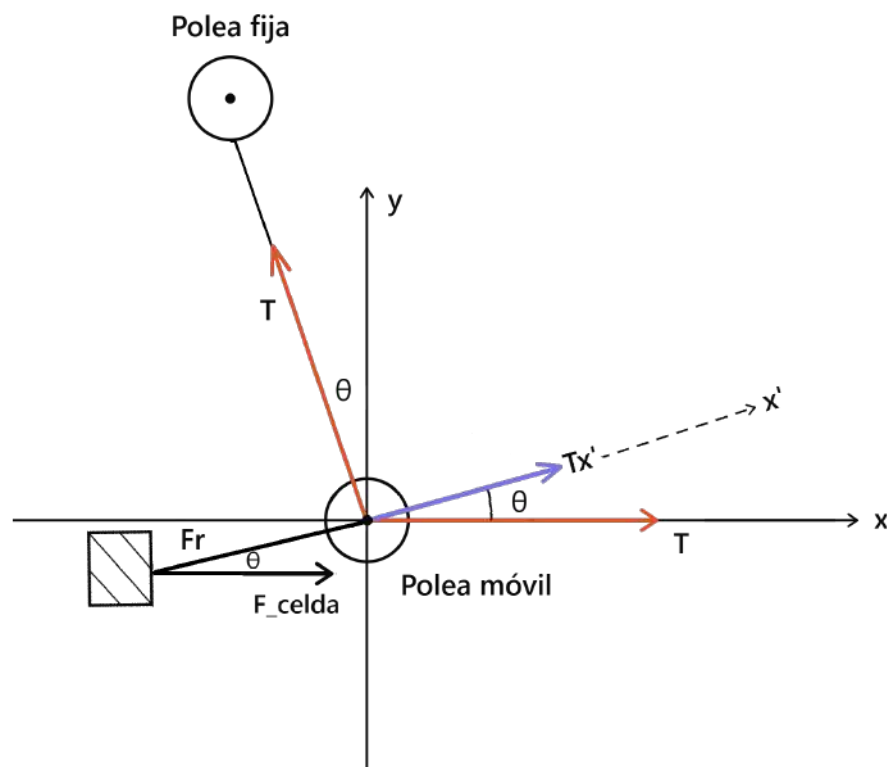


Figura 10. Diagrama de cuerpo libre de la configuración inicial.

Sobre la polea móvil actúan dos segmentos de fibra con tensión T . Por un lado, el tramo diagonal, proveniente de la polea fija, y el tramo horizontal, que conduce la fibra hacia el rodillo de bobinado, donde θ es el ángulo que forma el tramo diagonal respecto a la vertical. El resorte ejerce sobre la polea una fuerza “ F_r ” opuesta a la tensión de la fibra. A medida que la polea móvil se desplaza, describiendo un arco, el resorte también cambia su orientación respecto a la horizontal, por lo que la celda de carga

no mide directamente la Fr , sino únicamente su componente horizontal. Para simplificar el análisis, se plantea el equilibrio en un sistema de referencia (x',y') cuyo eje x' está alineado con el resorte.

$$F_{celda} = Fr \cdot \cos(\theta)$$

$$T_{x'} = T \cdot \cos(\theta)$$

$$\sum F_{x'} = 0 ; \quad Fr = T_{x'} \Rightarrow \frac{F_{celda}}{\cos(\theta)} = T \cdot \cos(\theta)$$

Despejando la lectura de la celda se obtiene: $F_{celda} = T \cdot \cos(\theta)^2$

Si bien la tensión de la fibra puede calcularse a partir de la fuerza registrada por la celda con la relación $T = F_{celda} / \cos(\theta)^2$. Esto implica conocer el ángulo θ en todo momento. Dado que este ángulo varía con el desplazamiento de la polea móvil y no se dispone de un sistema que haga posible una medición continua durante el proceso, la tensión no puede determinarse linealmente a partir de la señal de la celda de carga. Por este motivo, esta configuración mecánica fue descartada como estrategia de medición de la tensión.

Lógica de control

La estrategia de control implementada en esta etapa fue de carácter exploratorio. Se establecieron rangos de lectura de la celda de carga a los cuales correspondía una determinada velocidad de giro del motor, expresada en revoluciones por minuto (rpm). El propósito fue comprender la respuesta del sistema electrónico ante variaciones de tensión; se realizaron pruebas accionando manualmente la polea móvil y observando la respuesta del motor. Estas pruebas permitieron determinar que la sensibilidad del sistema podía ajustarse por medio de la configuración del modo de paso del motor modelo RS 440-464 [19]. Sin embargo, esta forma de controlar la velocidad del motor es incompatible con los requisitos de respuesta automática ante variaciones de tensión propios del proceso de *filament winding*.

3.1.1 Conclusión parcial y limitaciones

Con la configuración preliminar se verificó la integración entre la celda de carga, la placa Arduino UNO y el motor paso a paso, además, sentó las bases para el desarrollo de etapas posteriores. Sin embargo, la no linealidad inherente a la disposición mecánica impide obtener una relación directa entre la señal registrada por la celda de carga y la tensión real de la fibra, dado que dicha relación depende en todo momento de la posición instantánea de la polea móvil. A esto se suma que la lógica de control implementada resulta inviable a los fines prácticos de la automatización del proceso.

En el próximo prototipo se modificará la disposición geométrica de las poleas, eliminando la dependencia trigonométrica y estableciendo una relación lineal entre la medición de la celda de carga y la tensión de la fibra. Además, se incorporará un algoritmo de control capaz de responder de forma continua y autónoma ante variaciones de tensión durante el proceso.

3.2 Prototipo del módulo tensionador

A partir de las limitaciones identificadas en el diseño preliminar, se planteó una modificación sustancial de la mecánica del sistema con el objetivo de eliminar la no linealidad en la medición de tensión. El rediseño mecánico se basó en el principio de los sistemas de compensación por polea flotante, donde una polea móvil se desplaza entre dos poleas fijas con los tramos de fibra paralelos a ambos lados. Esta disposición garantiza que la fuerza sobre la polea sea siempre proporcional a la tensión de la fibra, independientemente de su posición [14].

Por otro lado, la máquina de *filament winding* cuenta actualmente con un acumulador de fibra independiente, cuya función es compensar los movimientos del equipo durante el laminado de geometrías complejas, como los casquetes de tanques, donde el devanador realiza recorridos que demandan o acumulan fibra. Dado que el arreglo de polea flotante del tensionador también permite almacenar y liberar fibra gracias al recorrido de la polea móvil, se aprovechó esta característica para integrar ambas funciones en un único dispositivo. De esta forma, con la nueva mecánica no solo se controla la tensión de la fibra, sino que además se cumple la función de acumulador, eliminando el compensador de tensión independiente y reduciendo el recorrido de la fibra por el equipo.

Configuración Mecánica

En la nueva disposición, mostrada en la imagen de la Figura 11, la polea móvil se ubica en la parte superior del conjunto, mientras que dos poleas fijas se sitúan en la parte inferior. La fibra ingresa al sistema por el lado derecho de la imagen, a través de un anillo guía de cerámica, cuya función es orientar el recorrido de la fibra hacia el sistema de poleas, protegiéndola del desgaste por contacto con superficies metálicas. Desde allí, desciende hacia la primera polea fija, asciende hacia la polea móvil, desciende nuevamente hacia la segunda polea fija y sale del sistema a través del segundo anillo guía en dirección al mandril de bobinado. La polea móvil está vinculada en su parte superior al resorte que transmite la fuerza a la celda de carga.

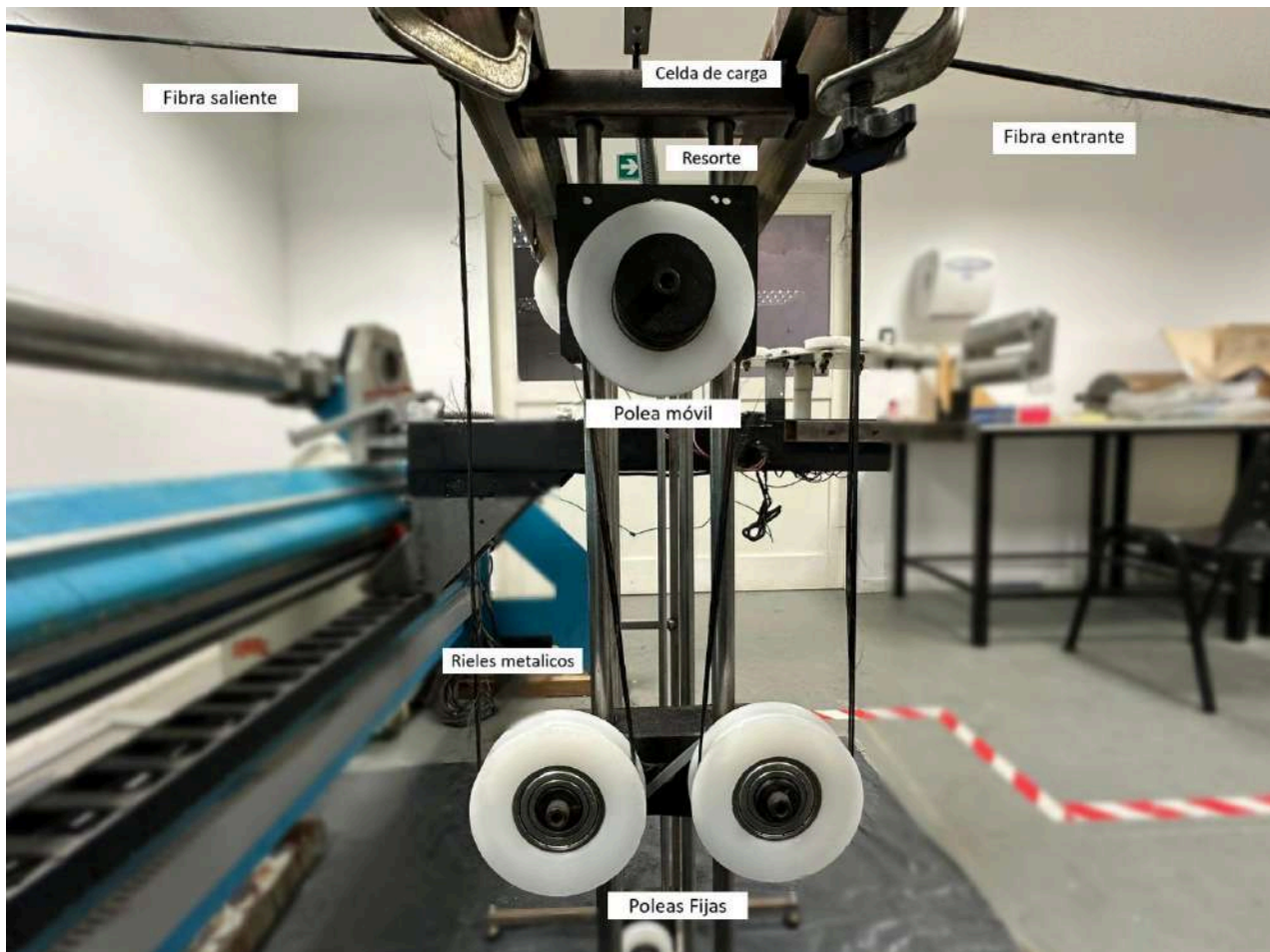


Figura 11. Disposición de poleas del prototipo sobre el compensador de tensión.

Análisis mecánico

La clave de esta disposición geométrica radica en que los dos tramos de fibra que actúan sobre la polea móvil son siempre paralelos y verticales, independientemente de la posición de la polea. Como se ilustra en el DCL de la Figura 12, sobre la polea móvil actúan dos fuerzas de tensión T orientadas hacia abajo y la fuerza registrada por la celda de carga F_{celda} orientada hacia arriba. Se plantea el equilibrio estático en la dirección vertical y se obtiene la tensión real de la fibra T :

$$\sum F_y = 0; F_{celda} = 2.T \Rightarrow T = \frac{F_{celda}}{2}$$

A diferencia de la configuración preliminar, donde la relación entre la señal de la celda y la tensión de la fibra dependía del ángulo θ y era no lineal, en esta disposición la relación es lineal y constante, lo que simplifica tanto el cálculo de la tensión como la implementación y sintonización del controlador.

Se desprecia el peso propio del conjunto soporte-polea ya que, la tara de la celda de carga se realiza con el sistema en reposo y el resorte sin solicitar, de modo que el peso del conjunto queda compensado en la calibración y no afecta la lectura durante el ensayo.

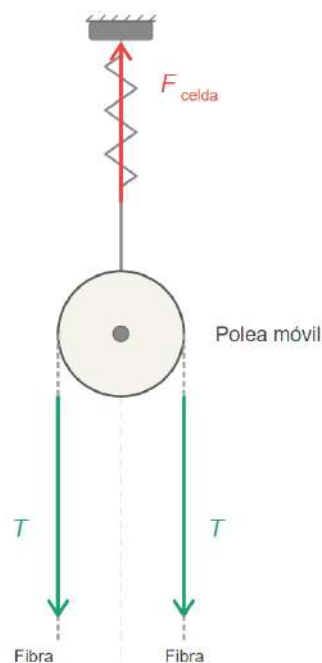


Figura 12. Diagrama de cuerpo libre del prototipo del módulo tensionador.

Montaje en el compensador de tensión

Antes de fabricar un módulo tensionador desde cero, se optó por validar la nueva disposición mecánica sobre una estructura disponible en el laboratorio. El conjunto de poleas, la celda de carga, el resorte y la placa de control fueron instalados sobre la parte superior de la misma, tal como se muestra en la Figura 11. Esta decisión permitió evaluar el comportamiento del sistema en condiciones reales de operación sin incurrir en la fabricación de un dispositivo nuevo, reduciendo el tiempo y los recursos necesarios para la etapa de validación.

La celda de carga fue fijada sobre una pieza rectangular metálica de apoyo, con uno de sus extremos anclado a dicha pieza y el otro unido al resorte. En la posición de reposo, el resorte se encuentra sin solicitar y la celda de carga registra una lectura nula. Al traccionar la fibra, el conjunto soporte-polea desciende a lo largo de los rieles metálicos cilíndricos, el resorte se estira y deforma la celda de carga, generando una señal proporcional a la tensión de la fibra.

3.2.1 Implementación del control PID

En esta etapa se incorporó por primera vez un algoritmo de control PID, con el fin de automatizar el control de la tensión mediante el ajuste de la velocidad del motor paso a paso. Para ello, fue necesaria la sintonización de los parámetros de control mediante el método de Ziegler-Nichols a lazo cerrado.

Lógica de control

El controlador toma como variable de proceso a la tensión medida por la celda de carga y actúa sobre la velocidad del motor, variable manipulada, para mantener la tensión en el valor de referencia o *setpoint*. La ecuación de la señal de salida, dejando K_i y K_d en cero, es:

$$Output = u(t) = K_p \cdot e(t); \quad \text{donde } e(t) = r(t) - y(t) = \text{Setpoint} - \text{Input}$$

$$Output = K_p (\text{Setpoint} - \text{Input})$$

Entonces, si:

Input > Setpoint: la tensión medida supera el valor de referencia y se produce una sobretensión en la fibra. El error es negativo, por lo que el *output* también lo es. En esta condición, el sistema de control debe ordenar un incremento en las rpm del motor con el fin de entregar mayor cantidad de fibra en menor tiempo y así reducir la tensión. El signo de Kp debería ser negativo para acompañar la necesidad del sistema, pero en este caso quedó resuelto con el remapeo lineal. Más adelante, véase sección 4.2.3, se introduce dicho cambio.

Input < Setpoint: el valor medido se registra por debajo del *setpoint* y el *output* es positivo. La fibra se encuentra a menor tensión y más floja, por lo que el controlador debe disminuir las rpm del motor para lograr un aumento progresivo de la tensión.

Este sistema donde la acción de control tiende a reducir el error, se denomina *retroalimentación negativa* [16]. La variable manipulada modifica a la variable de proceso lo necesario para disminuir la diferencia respecto del *setpoint*.

Dado que el *output* puede tomar valores negativos y el motor gira en un solo sentido, por lo que no se admiten rpm negativas, se aplicó un remapeo lineal de la salida del controlador a un rango de velocidad admisible del motor mediante la función *map()* del entorno Arduino.

Previo a la aplicación del método de sintonización formal de Ziegler-Nichols, se realizó una instancia de ajuste manual de las ganancias del controlador con el objetivo de verificar el funcionamiento del código implementado en la placa Arduino y la integración entre los distintos componentes del sistema: celda de carga, motor paso a paso, botones, pantalla LCD, drivers y conexiones eléctricas. Para ello, se establecieron las acciones integral y derivativa en cero ($K_i = 0$, $K_d = 0$) y se incrementó progresivamente la ganancia proporcional Kp desde valores bajos, analizando cualitativamente la respuesta del controlador y del motor ante variaciones de tensión. Dado que los valores de las ganancias de un controlador PID no pueden determinarse a partir de rangos preestablecidos en la bibliografía, ya que dependen exclusivamente de la dinámica de cada sistema particular, esta instancia no tuvo como objetivo obtener parámetros óptimos, sino confirmar que el sistema respondía de forma coherente ante cambios en el error. Cabe señalar que en toda esta etapa el término BIAS de la ecuación de control se mantuvo en cero, ya que la sintonización se centró exclusivamente en las ganancias proporcional, integral y derivativa.

Sintonización por método Ziegler-Nichols

El método de Ziegler-Nichols, propuesto por John G. Ziegler y Nathaniel B. Nichols en 1942, constituye una técnica clásica de sintonización de controladores PID que permite determinar los parámetros proporcional, integral y derivativo a partir de la respuesta dinámica del sistema mediante un enfoque experimental [20]. En su variante de lazo cerrado, el método consiste en establecer en cero las acciones integral y derivativa e incrementar progresivamente la ganancia proporcional K_p hasta que el sistema presenta oscilaciones sostenidas de amplitud constante. En dicha condición se registra la ganancia crítica K_c y el período de oscilación T_c , a partir de los cuales se calculan los parámetros del controlador mediante las relaciones empíricas establecidas por los autores, detalladas en la Tabla 1.

Tabla 1. Fórmulas de sintonización de Ziegler y Nichols.

Controlador	K_p	K_i	K_d
P	$0,5.K_c$		
P.I	$0,45.K_c$	$0,54.K_c/T_c$	
P.I.D	$0,6.k_c$	$1,2.K_c/T_c$	$0,075.K_c.T_c$

Para la aplicación del método, se fijó el valor de *setpoint* en 2 kg y la velocidad de rotación del mandril en valores típicos de procesamiento del grupo CET. Se incrementó progresivamente la ganancia proporcional K_p y se registró la respuesta del sistema en cada caso. Los gráficos correspondientes a cada ensayo se presentan en el Apéndice 1. Cabe aclarar que los valores de tensión representados en las gráficas, tanto el *setpoint* como el *input*, corresponden a la lectura de la celda de carga, la cual registra el doble de la tensión real de la fibra ($F_{\text{celda}} = 2T$). En consecuencia, un *setpoint* de 4 kg en los gráficos equivale a una tensión deseada de 2 kg en la fibra.

En ninguno de los ensayos realizados se logró establecer un régimen de oscilación sostenida de amplitud constante, condición necesaria para la determinación de la ganancia crítica K_c mediante el método de Ziegler-Nichols. Para valores bajos de K_p la tensión osciló de forma irregular y sin un patrón definido, mientras que para valores elevados la tensión superó el valor de *setpoint* y las rpm del motor se saturaron en su valor máximo, lo que impidió toda acción correctiva. Este comportamiento se atribuye a la fricción generada por la incompatibilidad geométrica entre los soportes de la polea móvil y los rieles del compensador (los soportes de la polea móvil presentan agujeros pasantes de sección cuadrada que deslizan sobre rieles metálicos de sección circular), la cual introduce una perturbación

variable sobre la lectura de la celda de carga que distorsiona la respuesta dinámica del sistema e impide la identificación del punto de oscilación sostenida.

3.2.2 Conclusión parcial y limitaciones

Dado que este sistema fue montado utilizando elementos existentes en el laboratorio, y no pensados a medida, la fricción entre los soportes de la polea móvil y los rieles del sistema distorsionaba la lectura de la celda de carga, impidiendo la sintonización del controlador por el método de Ziegler-Nichols. Se decidió entonces finalizar esta etapa y proceder al diseño y fabricación de un nuevo módulo tensionador desde cero.

No obstante, esta instancia previa resultó de gran valor para el desarrollo posterior. En primer lugar, se confirmó experimentalmente que la nueva disposición geométrica de poleas produce una relación lineal entre la señal de la celda y la tensión de la fibra, lo que validó el principio de funcionamiento antes de invertir recursos en un módulo definitivo. En segundo lugar, se verificó la integración entre la celda de carga, la placa Arduino y el motor paso a paso bajo condiciones reales de operación, lo que posibilita optimizar el código cargado en la placa Arduino. En tercer lugar, con la identificación temprana del problema de fricción se logró definir criterios de diseño para el módulo final, en el que se estableció como requisito excluyente la eliminación de todo contacto deslizante entre componentes móviles y estructurales.

Capítulo 4

Módulo tensionador

A partir de los criterios de diseño definidos en las etapas previas, se procedió al diseño, fabricación y ensamblaje del módulo tensionador. Los objetivos principales fueron eliminar la fricción que había comprometido las mediciones en el prototipo anterior, manteniendo la misma disposición mecánica de poleas previamente validada, y consolidar todos los componentes en un módulo independiente, compacto y portátil. Así mismo, el diseño debe unificar la totalidad de los componentes electrónicos en la estructura, centralizando el panel de control y manteniendo una disposición ordenada y protegida de las conexiones.

4.1 Diseño y ensamblaje

El módulo fue modelado íntegramente en *SolidWorks* como se muestra en las imágenes de la Figura 13. La estructura del módulo se construyó con perfiles de aluminio tipo Bosch 4040, conformando un marco vertical sin paredes que permite visualizar y acceder al sistema de poleas desde todos sus lados, con dimensiones generales de 70 cm de alto por 30 cm de ancho. Los perfiles fueron cortados a medida y ensamblados mediante escuadras (uniones angulares en L) y tornillería estándar. Las imágenes reales de la estructura se muestran en las Figuras 14 y 15.

Como mejora fundamental respecto al prototipo, se incorporó una guía lineal compuesta por una barra cilíndrica templada y un rodamiento lineal SBRuu12. La barra es fijada en sus extremos a la estructura en posición vertical, y el soporte de la polea móvil se desliza sobre ella a través del rodamiento lineal, (véase Figura 16). Este conjunto garantiza un desplazamiento suave y sin fricción de la polea móvil a lo largo del eje vertical, eliminando la perturbación que distorsionaba la lectura de la celda de carga en el prototipo.

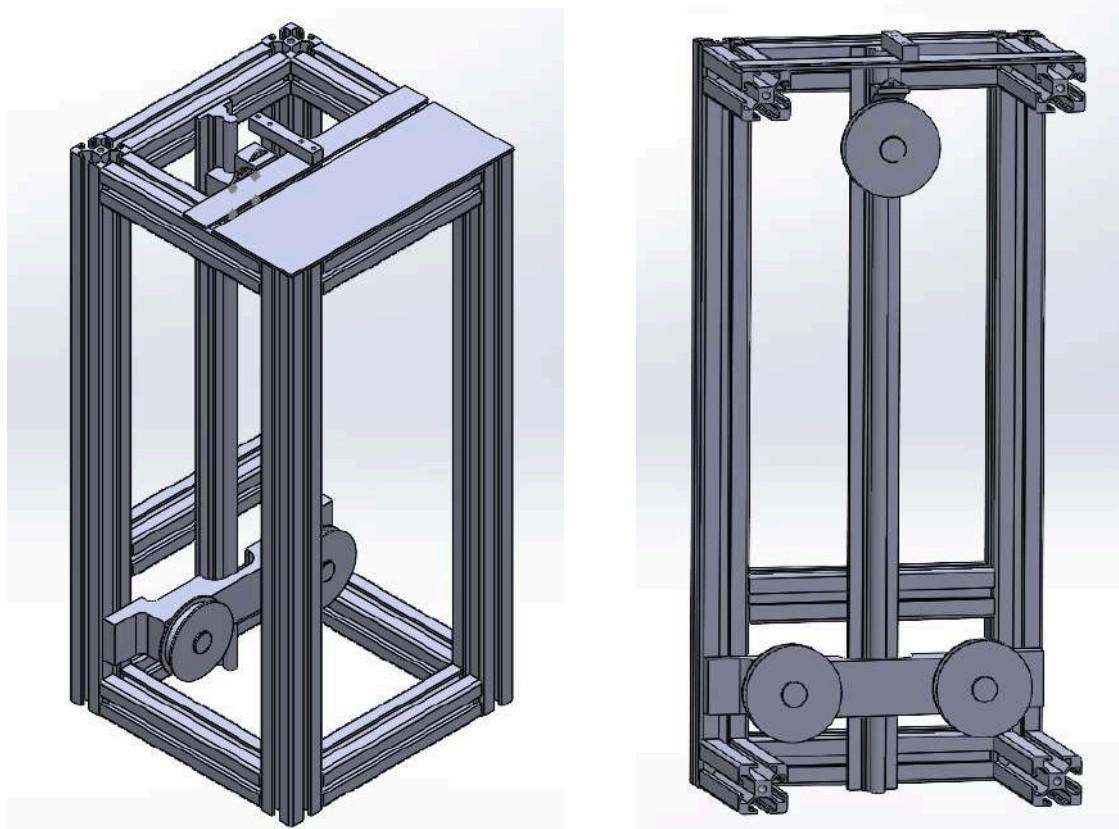


Figura 13. Modelado 3D del módulo tensionador: vista isométrica lateral y vista isométrica en corte del conjunto.

La disposición del sistema de poleas es la misma que la validada en el prototipo. En la Figura 14 se puede observar el recorrido de la fibra a través de las tres poleas, donde los dos tramos que actúan sobre la polea móvil se mantienen paralelos y verticales, verificando en la práctica la condición geométrica establecida en el análisis mecánico de la sección 3.2. Los componentes de medición, celda de carga y resorte, se mantuvieron sin modificaciones. La celda de carga fue montada en la parte superior de la estructura mediante una pieza de chapa metálica atornillada a los perfiles, y el resorte cuelga verticalmente desde su extremo libre hasta conectarse con el soporte de la polea móvil, manteniendo todo el eje de medición alineado en la dirección vertical, véase Figura 15. La fibra ingresa y sale del módulo a través de anillos guía de cerámica montados en acoples, cuya función es orientar el recorrido de la fibra asegurando que se mantenga en posición correcta sin producir desgaste por contacto con superficies metálicas. Los soportes de las poleas fijas y de la polea móvil, los acoples para los anillos de cerámica y la caja de control fueron fabricados mediante impresión 3D en Ácido Poliláctico (PLA), (véase Figuras 16 y 17). De esta forma se pudo modelar geometrías adaptadas a las dimensiones exactas del módulo.

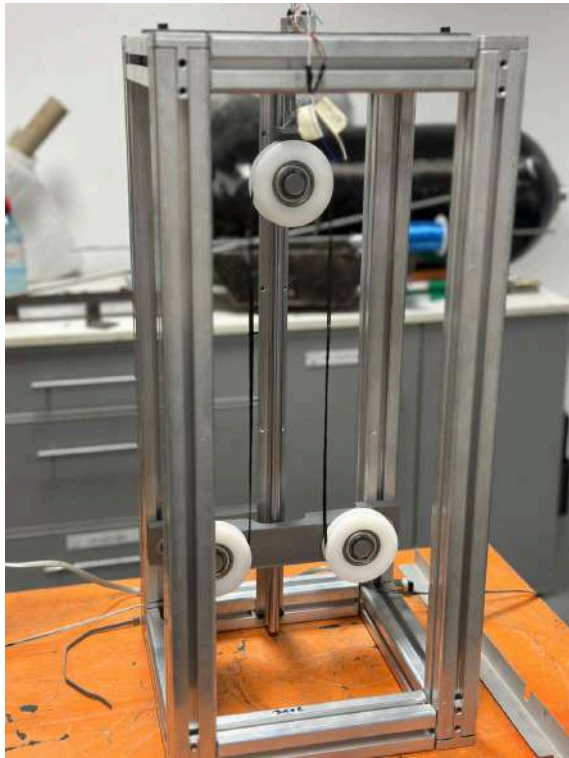


Figura 14. Módulo tensionador: vista del sistema de poleas y recorrido de la fibra.

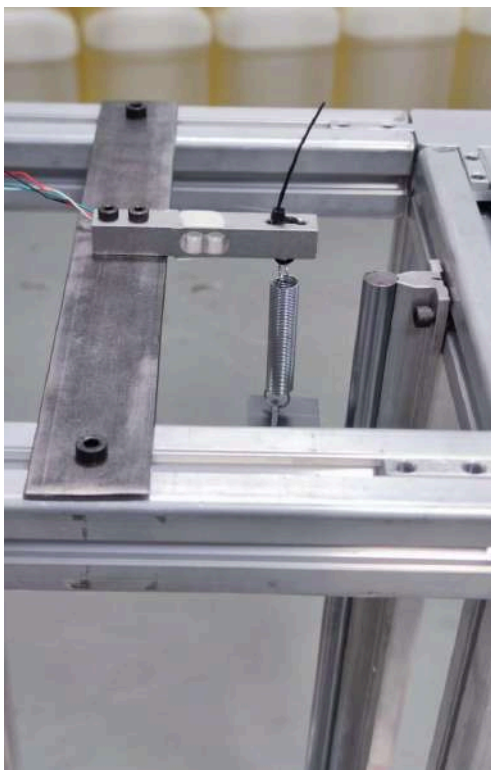


Figura 15. Detalle del montaje de la celda de carga, resorte y vista general de la estructura de perfiles de aluminio.



Figura 16. Conjunto para deslizamiento de la polea móvil.



Figura 17. Soportes realizados con impresión 3D.

En la parte superior de la estructura se instaló la electrónica del sistema: la placa Arduino UNO, los drivers del motor, el cableado y las conexiones. La caja de control de la Figura 18, aloja todos estos componentes e integra además la pantalla LCD, dos botones de operación (inicio y stop) y el *encoder* rotatorio, cumpliendo la función de proteger la electrónica, organizar el cableado y ofrecer una interfaz de operación que permite configurar el *setpoint* y visualizar en tiempo real la tensión medida por la celda de carga y las rpm del motor.

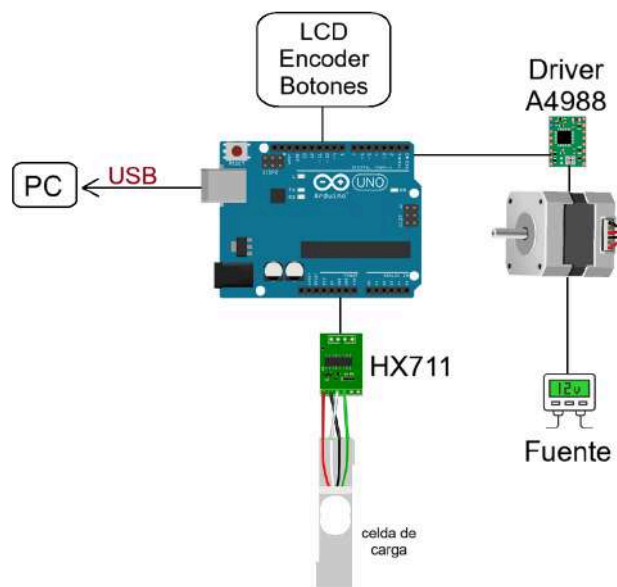


Figura 18. Caja de control del módulo tensionador y esquema de las conexiones eléctricas del sistema.

Ubicación del módulo

El módulo tensionador se ubicó entre el rodillo alimentador de fibra y la máquina de FW, tal como se muestra en la Figura 19. El rodillo alimentador se posicionó a una distancia de modo que la fibra disponga de un recorrido suficiente para que las variaciones bruscas de tensión generadas durante el desbobinado se amortigüen antes de ingresar al tensionador y la fibra llegue alineada y sin torsiones. A la salida del módulo, la fibra se dirige hacia los rodillos guía de la máquina de FW, los cuales orientan su recorrido final hacia el mandril de bobinado. De esta forma, el tensionador opera como un eslabón intermedio que recibe la fibra del alimentador, mide y regula su tensión en tiempo real modificando la velocidad del motor, y la entrega en condiciones controladas al sistema de bobinado.

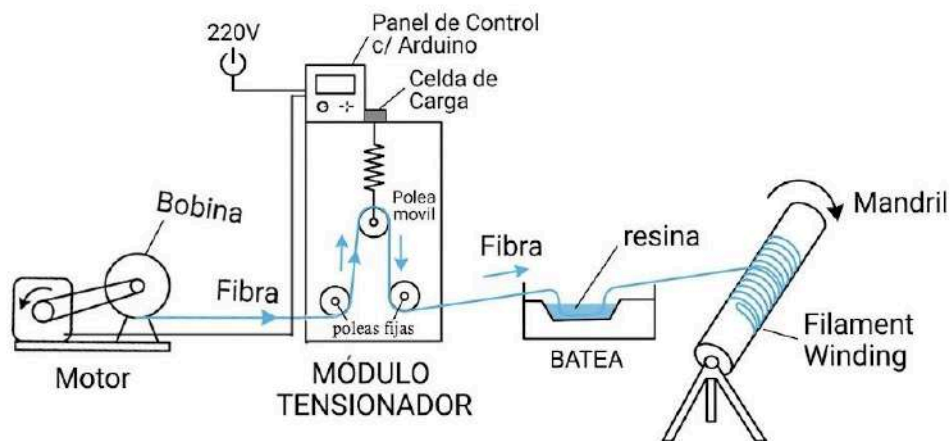


Figura 19. Esquema del proceso de laminación.

4.2 Sintonización

Una vez fabricado el módulo tensionador, se procedió a la sintonización de los parámetros del controlador PID mediante el método de Ziegler-Nichols a lazo cerrado. Se realizaron múltiples ensayos en los que se varió la ganancia proporcional con el objetivo de encontrar la ganancia crítica K_c . Se adoptaron condiciones de operación típicas de procesamiento del grupo CET y cercanas a las condiciones reales de laminado. En esta etapa el término BIAS se mantuvo en cero, y la sintonización se realizó sobre las ganancias del PID.

En esta sección se presentan los resultados más representativos, seleccionados a partir de una serie extensa de ensayos, donde se realizó un barrido de la ganancia proporcional en un rango de 1 a 15 con incrementos de 0,5. No obstante, con el fin de evitar redundancias, no se incluyen la totalidad de las gráficas obtenidas sino aquellas más representativas del comportamiento del sistema durante la sintonización. Se presentan ensayos con valores bajos de ganancia donde aún no se alcanzó la condición crítica, valores en torno a K_c y valores superiores a K_c donde se observa la distorsión del régimen oscilatorio. Junto con las curvas de tensión se incluyen las de rpm del motor, para visualizar la respuesta del controlador ante las variaciones de tensión.

Condiciones de ensayo

La velocidad y la aceleración del mandril se fijaron en los valores de operación habituales mediante el software *Mach3Mill* del CNC y se mantuvieron constantes a lo largo de todos los ensayos, con un *setpoint* de 2 kg. La velocidad del motor paso a paso se mantuvo en un rango de entre 0 y 15 rpm, acorde con las velocidades que maneja el rodillo alimentador durante el proceso. La salida del controlador se convirtió a velocidad del motor mediante un remapeo lineal que traslada el rango de *output* a un rango acotado de rpm compatible con las velocidades de operación (véase Apéndice 3). Se incrementó progresivamente la ganancia proporcional K_p desde valores bajos hasta 15, y se registró la respuesta del sistema durante uno a dos minutos en cada ensayo.

4.2.1 Resultados

Para valores bajos de K_p , como se observa en la Figura 20 para $K_p = 3$, la tensión medida presentó oscilaciones de baja amplitud, con picos que no superaron los 2 kg, significativamente por debajo del valor de referencia. A partir de $K_p = 5$ la tensión comenzó a exhibir oscilaciones sostenidas de mayor amplitud, con picos más regulares (Figura 21), comportamiento que se mantuvo para ganancias en el rango de 5 y 7,5 (Figuras 22 y 23). Dentro de dicho rango, múltiples valores de K_p cumplieron la condición de oscilación sostenida requerida por el método de Ziegler-Nichols, lo que dificulta la identificación de un valor único de ganancia crítica. Se adoptó $K_p = 7,5$ (Figura 24) como ganancia crítica de referencia dado que presentó la mayor cantidad de ciclos con la amplitud más uniforme y la menor dispersión entre períodos consecutivos. El período crítico correspondiente, calculado como el promedio de los intervalos entre picos consecutivos, resultó $T_c \approx 6,76$ s. Reemplazando el T_c y el $K_c =$

7,5 en las fórmulas de Ziegler-Nichols mostradas en la Tabla 2, se tiene una ganancia proporcional teórica $K_p = 3,75$.

Tabla 2. Resultados de la sintonización por Ziegler y Nichols a lazo cerrado.

Controlador	K_p	K_i	K_d
P	3,75		
P.I	3,38	0,60	
P.I.D	4,50	1,33	3,80

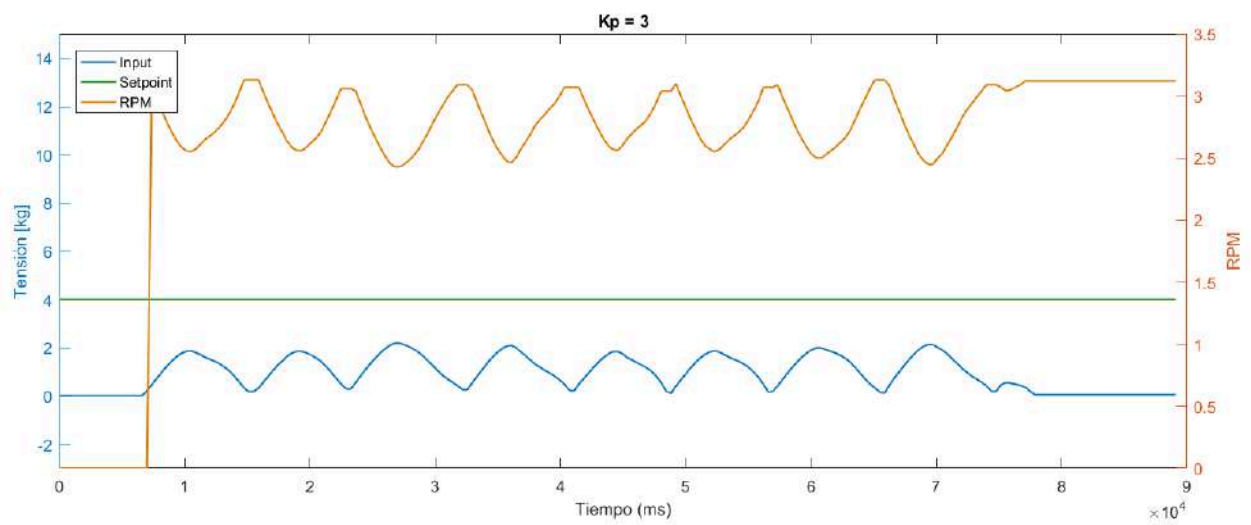


Figura 20. Sintonización Z-N para $K_p = 3$.

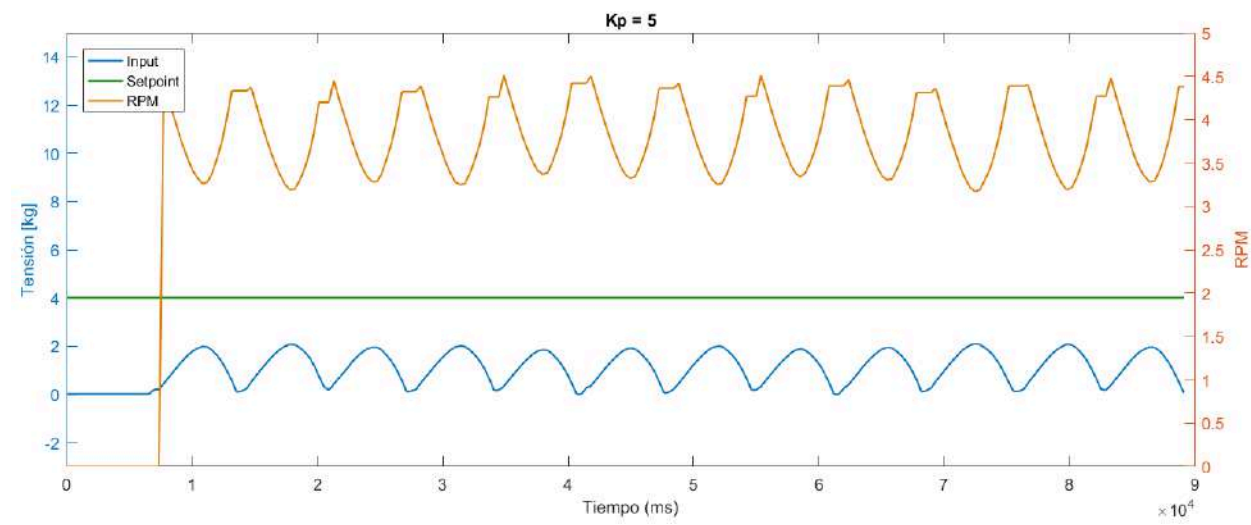


Figura 21. Sintonización Z-N para $K_p = 5$.

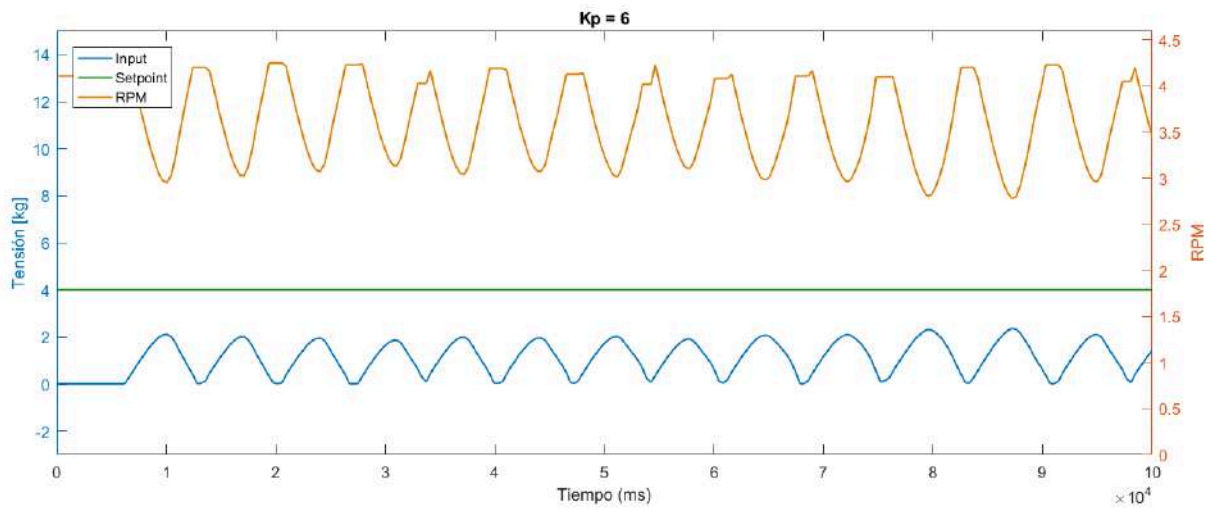


Figura 22. Sintonización Z-N para $K_p = 6$.

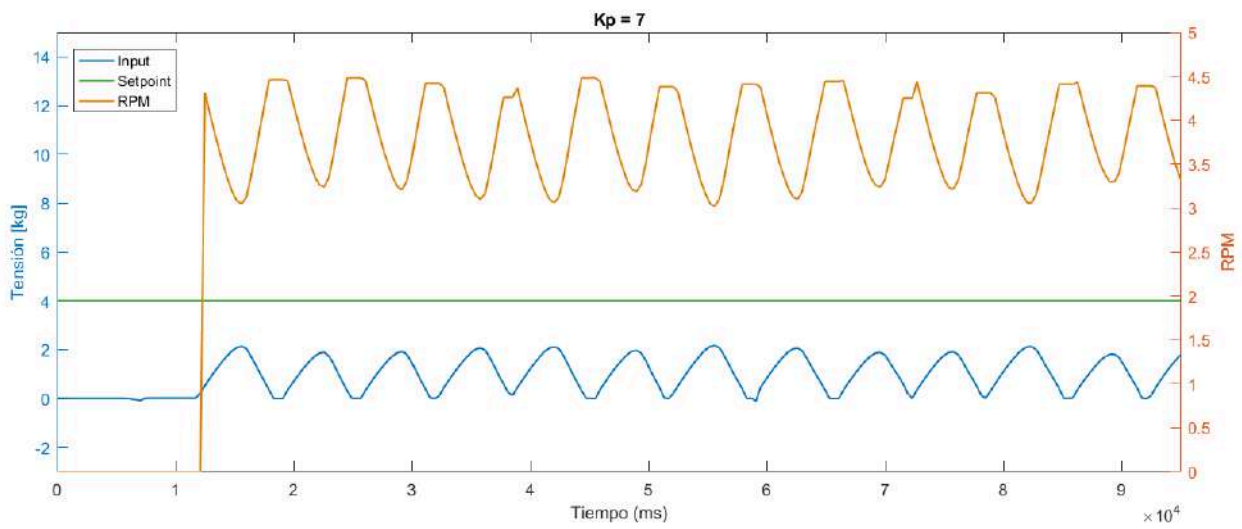


Figura 23. Sintonización Z-N para $K_p = 7$.

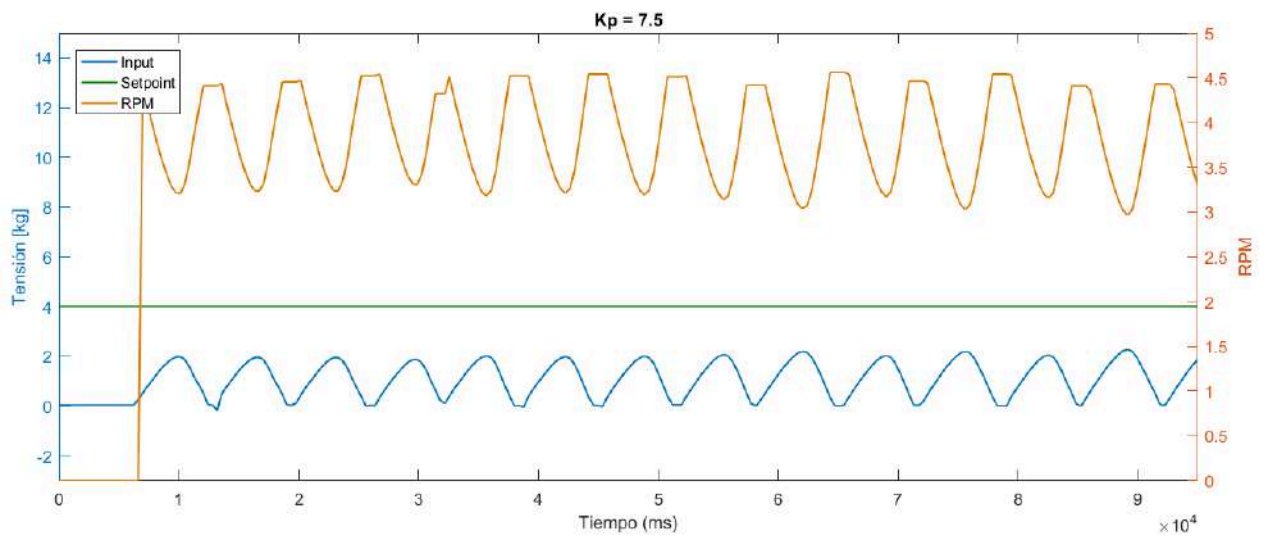


Figura 24. Sintonización Z-N para $K_p = 7,5$.

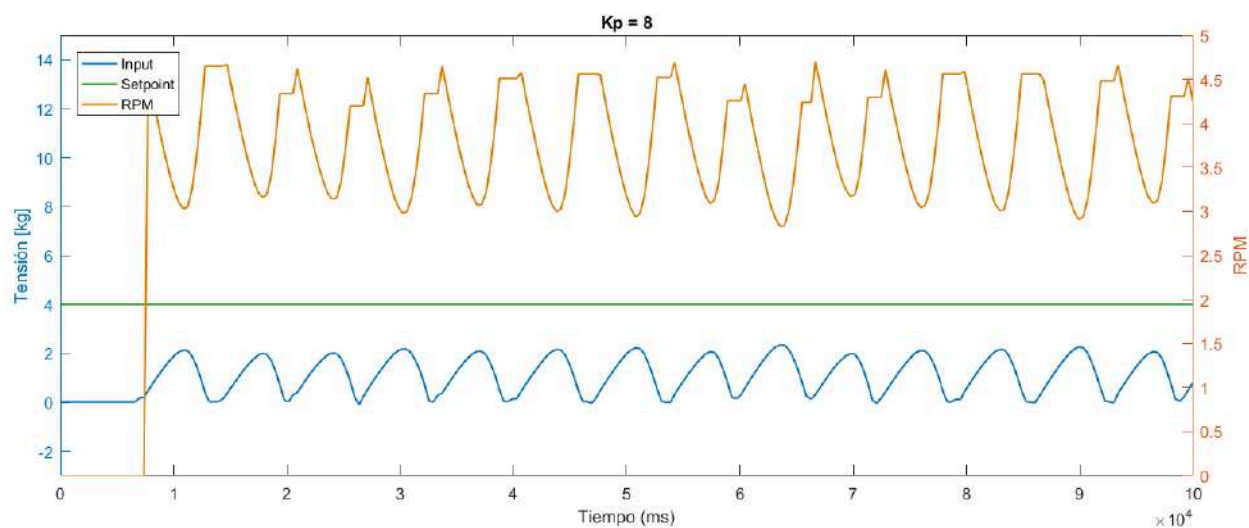


Figura 25. Sintonización Z-N para $K_p = 8$.

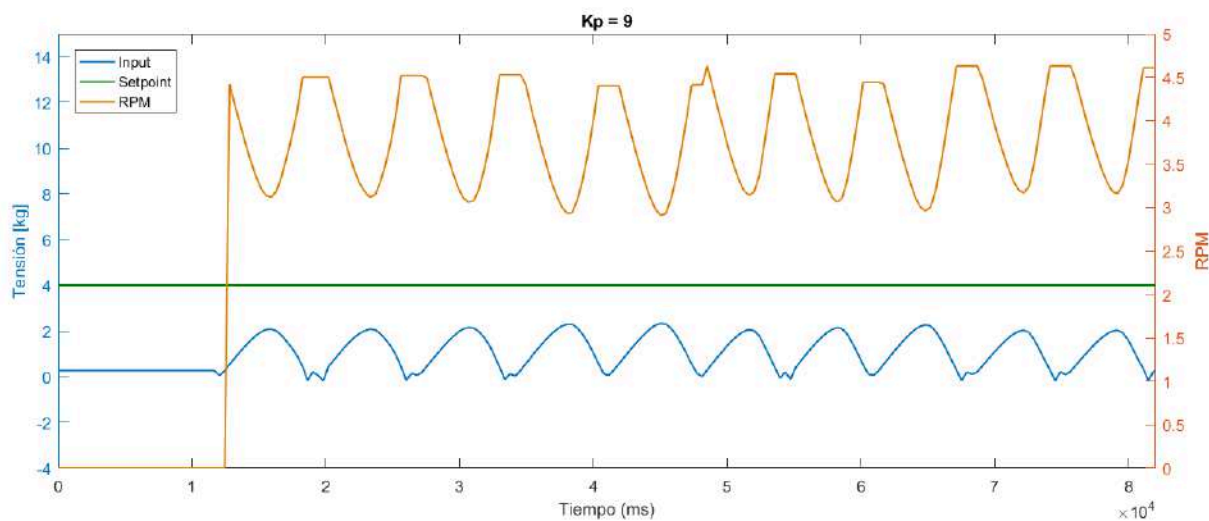


Figura 26. Sintonización Z-N para $K_p = 9$.

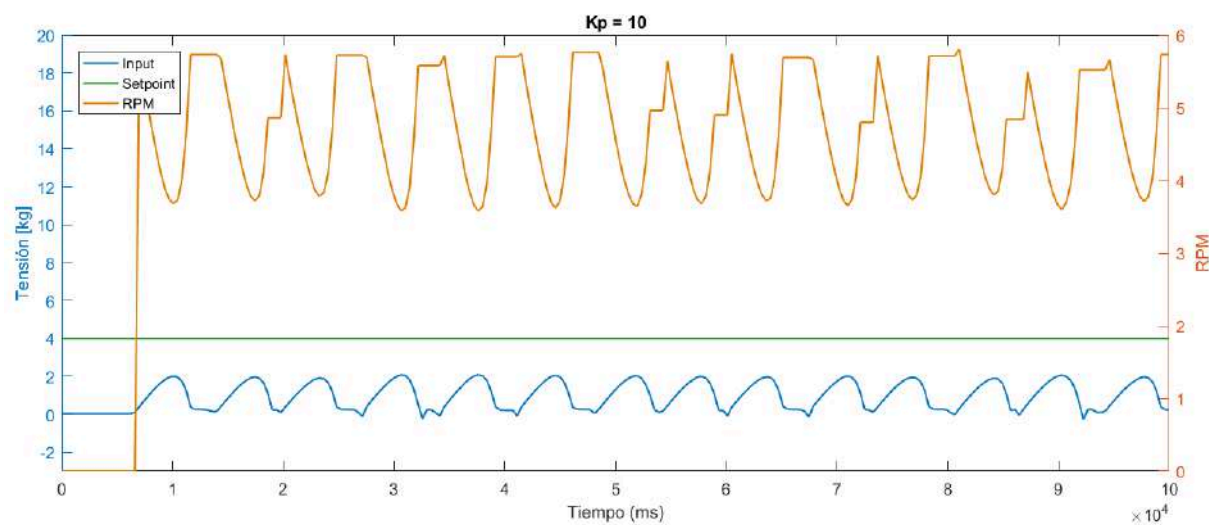


Figura 27. Sintonización Z-N para $K_p = 10$.

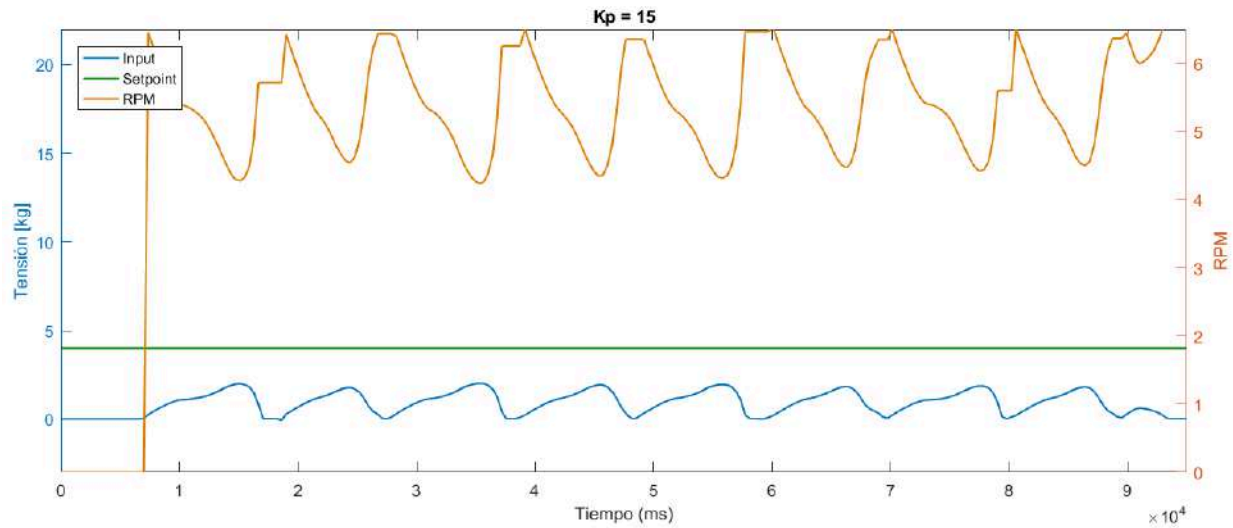


Figura 28. Sintonización Z-N para $K_p = 15$.

En los ensayos realizados con acción proporcional y remapeo de la salida, la tensión medida osciló por debajo del valor de *setpoint*, evidenciando un error residual (*offset*) bajo las condiciones evaluadas. Este comportamiento es característico del control proporcional puro. Si bien la acción proporcional es capaz de generar oscilaciones sostenidas, carece de la capacidad de eliminar el error en estado estacionario, es decir, la diferencia permanente entre el valor medido y el valor de referencia. En un controlador PID convencional, esta corrección es función de la acción integral. **En la estrategia implementada posteriormente se incorporó un término BIAS para establecer una velocidad nominal del rodillo alimentador y centrar alrededor de ella las correcciones proporcionales.** Este término permite reducir la magnitud de la corrección requerida en torno a una condición de operación determinada, pero no resulta equivalente a una acción integral ni garantiza, por sí mismo, la eliminación del error en estado estacionario. Es importante destacar que el BIAS establece un punto de operación; no integra el error ni garantiza error estacionario cero.

4.2.2 Implementación de controladores PI y PID

Se adoptó $K_c = 7,5$ como valor de referencia para la ganancia crítica, y el período crítico $T_c \approx 6,76$ s. Se calcularon los parámetros K_p , K_i y K_d mediante las relaciones empíricas del método de Ziegler-Nichols, mostrados en la Tabla 2. Las acciones de control se incorporaron de forma progresiva: en primera instancia se implementó un controlador PI y, ante los resultados insatisfactorios, se incorporó la acción derivativa conformando un controlador PID completo. En ambos casos se

ensayaron tanto los valores teóricos obtenidos por el método como valores modificados de forma exploratoria en torno a estos. Si bien se realizaron múltiples ensayos para cada caso, la respuesta del sistema mantuvo un comportamiento cualitativamente similar en todos los casos, por lo que se presentan a continuación únicamente los gráficos más significativos. En ninguna de las condiciones ensayadas el sistema logró un control estable de la tensión.

En la Figura 29 se presenta la respuesta del sistema con controlador PI. Se observó que la tensión medida se mantuvo en todo momento por debajo del valor de referencia, oscilando entre 0,5 y 1,2 kg aproximadamente. El error resultante fue sostenido a lo largo del ensayo. Como consecuencia, la acción integral del controlador acumuló dicho error de forma continua, lo que se tradujo en un crecimiento sostenido de la velocidad del motor que aumentó progresivamente de 4,5 a 5,3 rpm. Sin embargo, esta variación resultó insuficiente para producir un cambio apreciable en la tensión de la fibra, y la acción integral continuó acumulando error ante la imposibilidad de anular la diferencia con el valor de referencia, configurando el fenómeno conocido como *integrator windup*. Este fenómeno se produce cuando el término integral del controlador crece de forma sostenida debido a un error que no puede ser corregido por el actuador, ya sea por limitaciones en su rango de operación o porque la acción correctiva fue insuficiente. Como resultado, el *output* del controlador crece hasta valores que el motor no puede ejecutar, y si el *input* llegara a superar el *setpoint*, el controlador no podría reaccionar de forma inmediata ya que primero debería compensar toda la acumulación previa del término integral, lo que provocaría retardos o sobrecorrecciones en la respuesta [16].

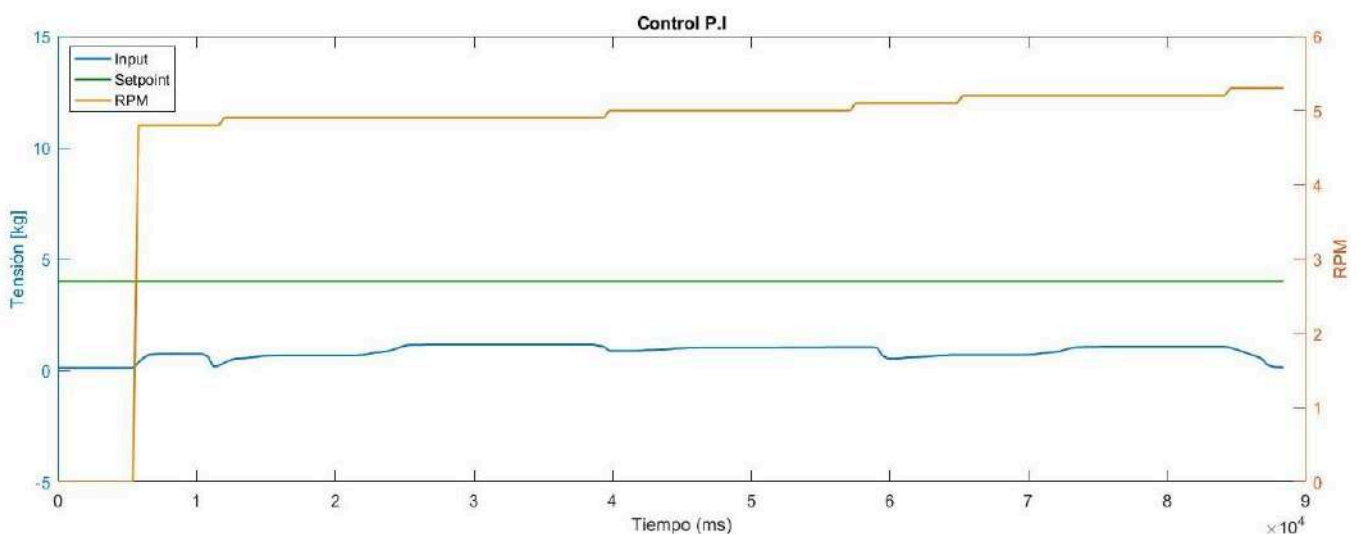


Figura 29. Gráfico de monitoreo de variables en el tiempo para controlador Proporcional-Integral.

En la Figura 30 se presenta la respuesta del sistema con controlador PID. El comportamiento resultó marcadamente inestable: la tensión medida osciló entre 0 y 5 kg con variaciones abruptas y sin converger al *setpoint*. Las rpm del motor variaron de forma errática entre valores extremos del rango de remapeo. Al analizar la respuesta se identificaron las dos causas principales de la inestabilidad observada. En primer lugar, la acción derivativa amplificó el ruido inherente a la señal de la celda de carga, efecto que puede observarse en las oscilaciones con forma de dientes de sierra presentes en la curva de rpm entre los 40 y 80 segundos del ensayo. El término derivativo calcula la tasa de variación instantánea del error, por lo que cualquier fluctuación en la señal medida (aunque sea de pequeña magnitud) produce picos de gran amplitud en la salida del controlador. En la bibliografía de Aström y Hägglund [16], se señala que la ganancia del término derivativo crece linealmente con la frecuencia de la señal de entrada o *input*, lo que puede generar que pequeñas fluctuaciones en la lectura de la celda de carga, que son normales en cualquier sensor, se amplifiquen enormemente por la acción derivativa y generen picos muy grandes en el *output* del controlador, que a su vez producen cambios bruscos e innecesarios en las rpm del motor.

En segundo lugar, la acción integral contribuyó a la inestabilidad mediante la acumulación sostenida de error. Mientras la tensión permaneció por debajo del *setpoint*, el término integral acumuló un valor creciente que aumentó de forma progresiva el *output* del controlador, incluso deteniendo el motor por unos instantes para intentar subir la tensión. Cuando la tensión superó momentáneamente el *setpoint* y el error cambió de signo, el controlador no pudo enviar de forma inmediata una aceleración del motor para reducir la tensión, ya que primero debió descontar todo el valor acumulado previamente por la integral. Durante este retardo, la tensión continuó alejándose del *setpoint* sin corrección. Al compensarse la acumulación previa, el controlador reaccionó de forma abrupta, produciendo una sobrecorrección que llevó la tensión nuevamente por debajo del *setpoint* y reinició el ciclo de acumulación. Este comportamiento es consistente con el fenómeno de *integrator windup* observado también en el ensayo con controlador PI.

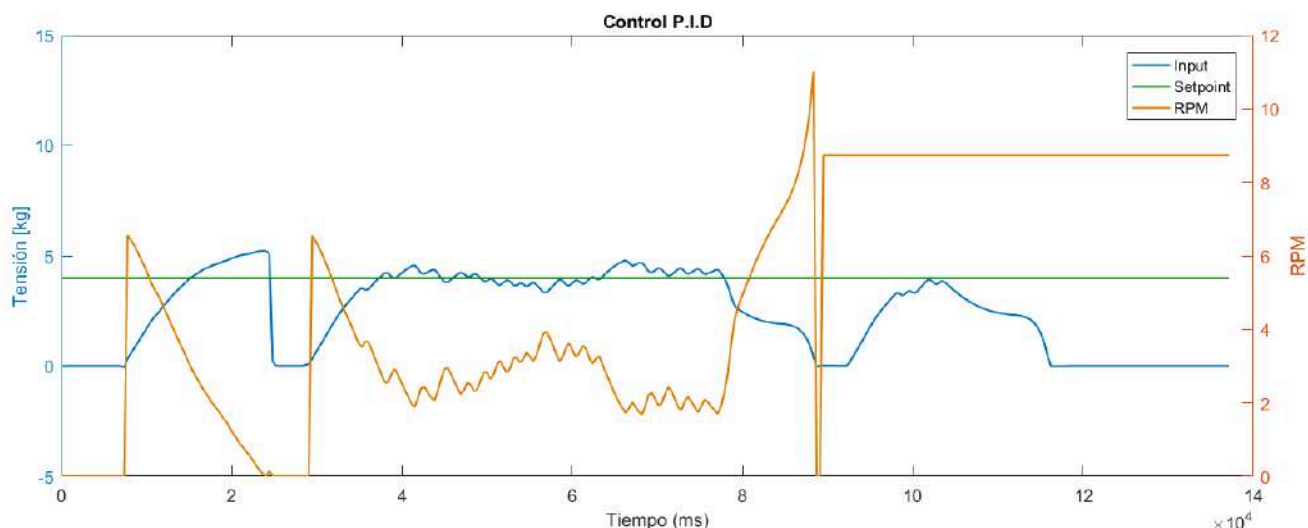


Figura 30. Gráfico de monitoreo de variables en el tiempo para controlador Proporcional-Integral-Derivativo.

Los resultados obtenidos en los ensayos con controladores PI y PID ponen de manifiesto que la incorporación de las acciones integral y derivativa no permitió alcanzar un control estable de la tensión bajo las condiciones de operación ensayadas. Al tratarse de un dispositivo diseñado y construido desde cero, no se contó con un modelo previo que predijera el comportamiento del sistema ante estas acciones de control. Con los ensayos se pudo identificar experimentalmente sus limitaciones. Por un lado, la acción integral generó acumulación sostenida de error (*windup*) y sobreoscilaciones en la tensión, la acción derivativa amplificó el ruido presente en la señal de la celda de carga produciendo inestabilidad en la respuesta, y por último la saturación del motor dentro del rango de rpm impuesto por el remapeo impidió que el motor pudiera corregir la tensión más allá de cierto punto.

A partir de este análisis, se decidió simplificar la estrategia de control y adoptar un esquema proporcional puro con la correcta elección del término BIAS. Esta estrategia es más robusta y sencilla de implementar, con un único parámetro de sintonización.

4.2.3 Lógica de control: acción proporcional con BIAS

La acción proporcional genera una señal de salida directamente proporcional al error instantáneo: $u(t) = K_p \cdot e(t) + u_b$, donde la variable u_b representa el BIAS [16].

El parámetro K_p determina la intensidad de respuesta del controlador frente al error. Desde el punto de vista físico del tensionador, K_p establece cuán sensible es el sistema ante un cambio en la

tensión, es decir cuánto se modifican las rpm del motor ante una desviación de la tensión medida respecto al *setpoint*.

El término BIAS corresponde al valor que toma la señal de salida del controlador cuando el error $e(t)$ es nulo, es decir, cuando la tensión medida coincide con el *setpoint*. El criterio implementado en el presente trabajo consistió en fijar el BIAS como la velocidad a la que se espera que gire el rodillo alimentador una vez alcanzado el *setpoint*, dicho valor dependerá de las condiciones de ensayo. En la Figura 31 se ilustra de forma conceptual el funcionamiento del control proporcional, donde se representa la respuesta de un sistema en lazo cerrado ante un cambio escalón en el *setpoint* ($sp=1$) para distintos valores de K_p . El eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical la señal medida (*input*).

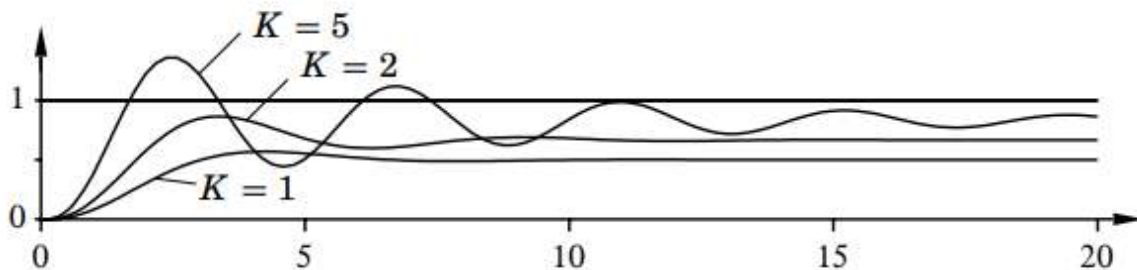


Figura 31. Simulación de un sistema en lazo cerrado con control proporcional [16].

Como se observa en las curvas, el comportamiento del sistema depende del valor de la ganancia proporcional. Para un $K_p=1$, se tiene una respuesta lenta y un error estacionario significativo. Al incrementar la ganancia a $K_p=2$, el error en estado estacionario disminuye. Sin embargo, para un $K_p=5$ la respuesta exhibe un comportamiento oscilatorio con sobre impulso que decrece en el tiempo.

En síntesis, el aumento del valor de K_p incrementa la rapidez de respuesta y reduce el error en estado estacionario, pero en el caso del tensionador introduce *overshooting*, es decir, la señal sobrepasa momentáneamente el *setpoint* y genera picos de tensión que pueden alcanzar valores excesivamente altos, comprometiendo la calidad del laminado y la integridad de la fibra. Un incremento excesivo de K_p puede conducir a un comportamiento inestable, con sobre impulso creciente y oscilaciones de amplitud cada vez mayor. Este último caso corresponde precisamente a la condición buscada por el método de Ziegler-Nichols para la determinación de la ganancia crítica, tal como se describió en los ensayos de la sección anterior.

En el presente trabajo la ecuación de salida incorporada a la lógica de control es:

$$\text{Output} = - K_p \cdot e(t) + \text{BIAS}$$

El signo negativo responde a la lógica inversa de operación del sistema: ante un error negativo, cuando la tensión medida supera el *setpoint*, la salida debe incrementar las rpm del motor para entregar más fibra y reducir la tensión, mientras que, ante un error positivo, cuando la tensión se sitúa por debajo del *setpoint*, la salida debe reducir las rpm para permitir que la tensión aumente. El término BIAS representa la velocidad de operación base del motor cuando el error es nulo, es decir, el punto de equilibrio en torno al cual el controlador corrige las desviaciones de tensión.

Con la implementación de esta ecuación se logró simplificar la lógica del código de la placa Arduino, e independizarse del remapeo lineal inverso empleado en los ensayos anteriores y evitar los problemas inducidos por el uso de los términos integrales y derivativos.

4.3 Ensayos experimentales

Con la ecuación de control definida, el siguiente paso consistió en hallar la combinación de parámetros que permitiera alcanzar un control estable de la tensión durante el bobinado. La variable principal a determinar fue la ganancia proporcional K_p . Sin embargo, como se describe más adelante, limitaciones asociadas al motor hicieron necesario explorar también el *feedrate* de la máquina CNC como parámetro de ajuste complementario. Para ello, se realizaron ensayos sobre un mandril de 2 pulgadas de diámetro utilizando un código G, el mismo que se utilizará para la laminación real de un tubo. De esta forma se garantiza que los parámetros obtenidos sean representativos de las condiciones de operación.

Ventana operativa

Previo al inicio de los ensayos, se determinaron los límites teóricos de K_p a partir de la ecuación de control, de modo de acotar la búsqueda experimental a un rango de valores que garantice el correcto funcionamiento del sistema. Dado que el motor opera en un único sentido de giro, la salida del controlador debe ser siempre positiva:

$$\text{Output} = - K_p \cdot (SP - \text{input}) + \text{BIAS} \geq 0$$

Al despejar la ganancia proporcional se obtiene:

$$Kp \leq \frac{BIAS}{error}$$

Si se reemplaza el error por el máximo posible del sistema, correspondiente al arranque cuando la tensión medida se encuentra en cero (condición de *stand by*), calculado como la diferencia entre el *setpoint* de la celda (4 kg) y el umbral mínimo de lectura (0,3 kg) establecido en el código, es decir Error Máx. = 3,7 kg. A su vez, el BIAS se calcula a partir de la velocidad lineal de fibra y el perímetro del rodillo alimentador:

$$BIAS = \frac{1000 \text{ mm/min}}{2.\pi.R_{rod}} = \frac{1000}{2.\pi.47,5} = 3,35 \text{ rpm}$$

A este valor real de rpm se lo debe multiplicar por el factor de conversión de 20 correspondiente a la configuración del motor (véase Apéndice 2). Como resultado se tiene un valor de BIAS programado de:

$$BIAS = 67$$

Reemplazando en la condición anterior, el valor máximo admisible de Kp es de:

$$Kp \leq \frac{67}{3,7} \leq 18$$

No obstante, si bien los parámetros obtenidos mediante la sintonización de Ziegler-Nichols no son directamente trasladables a la ecuación con BIAS (dado que fueron determinados con un remapeo lineal intermedio entre la salida del controlador y la velocidad del motor), con los ensayos de sintonización previos se pudo establecer que para valores de Kp superiores a 10 el sistema presenta una marcada tendencia a la inestabilidad. Por este motivo, los ensayos se concentraron en un rango de Kp inferior a 18, donde previamente se observó mejor respuesta del sistema.

Estas relaciones definieron los límites de la ventana operativa, garantizando que la salida del controlador se mantuviera positiva y que las rpm del motor permanecieran dentro de un rango admisible. Las condiciones generales bajo las cuales se realizaron todos los ensayos de esta sección son:

Parámetros	Valor
Setpoint	2 kg
Velocidad lineal de la fibra	1000 mm/min
Diámetro de rodillo alimentador	95 mm
Diámetro del mandril	2 pulgadas / 50,8 mm
BIAS	67

4.3.1 Metodología de ensayo

El proceso de ajuste experimental se organizó en etapas sucesivas, en las cuales se fue acotando progresivamente la ventana de valores operativos a partir de los resultados obtenidos en cada tanda de ensayos. Cabe señalar que la obtención de las condiciones operativas finales requirió un proceso iterativo de ajuste experimental que involucró un gran número de ensayos adicionales a los presentados a continuación. La totalidad de los ensayos mostrados y sus respectivas condiciones se documentan en el Apéndice 5.

Si bien el método de Ziegler-Nichols podría aplicarse a la nueva ecuación de control para hallar la ganancia crítica del sistema, no se consideró necesario dado que la ecuación implementada no contempla acciones integral ni derivativa, por lo que el único parámetro a determinar es K_p . En este contexto, los ensayos experimentales constituyen en sí mismos una sintonización de dicho parámetro que contempla todas las no linealidades reales del sistema.

Análisis de resultados

En la primera etapa (Tabla 3) se realizó un barrido de K_p desde 3 hasta 15 con el *feedrate* en 100%. En la Figura 32 se presentan tres ensayos representativos de esta etapa. Para valores de K_p inferiores a 7 la acción proporcional no fue suficiente para compensar el error de tensión, mientras que para valores elevados la sensibilidad excesiva del controlador generó sobreoscilaciones e inestabilidad del sistema. Este comportamiento confirma la tendencia observada durante los ensayos de sintonización por Ziegler-Nichols, donde tanto ganancias insuficientes como excesivas se alejaban de las condiciones de operación deseadas, evidenciando la necesidad de trabajar dentro de una ventana óptima de K_p .

Tabla 3. Condiciones de ensayo de la primera etapa (variación de K_p).

Ensayo	K_p	feedrate (%)
E01	3	100
E02	7	100
E03	7,5	100
E04	7,8	100
E05	8	100
E06	8,5	100
E07	10	100
E08	15	100

Para $K_p = 3$ (Ensayo E01) la tensión medida osciló entre 0 y 1 kg, significativamente por debajo de 4 kg. La ganancia proporcional resultó insuficiente debido a que las correcciones introducidas sobre la velocidad base del motor fueron demasiado pequeñas para compensar el error de tensión existente, por lo que el sistema permaneció alejado del *setpoint*. A partir de $K_p = 7$ (Ensayo E02) la tensión se incrementó al rango de 1,5 a 2,5 kg, evidenciando una mayor capacidad de corrección, aunque aún sin alcanzar el *setpoint*. Para valores intermedios de K_p entre 7,5 y 8,5 (Ensayos E03 a E06) la tensión se acercó progresivamente al *setpoint*, con picos que superaron los 3 kg.

Sin embargo, para ganancias elevadas como $K_p = 10$ y $K_p = 15$ (Ensayos E07 y E08) se observó que la tensión alcanzó e incluso superó momentáneamente el *setpoint*, pero luego cayó de forma abrupta a valores cercanos a cero, repitiéndose este ciclo de forma periódica. Este comportamiento se atribuye a la pérdida de torque efectivo del motor a bajas rpm. Al acercarse la tensión al *setpoint*, el error se achica y la ecuación de control calcula velocidades cada vez más bajas, hasta que el motor no pudo mantener un giro suave y continuo. En ese punto, el motor dejó de responder, lo que provocó una entrega repentina de fibra y en consecuencia la caída brusca de la tensión. Este fenómeno se repitió de forma cíclica, impidiendo que el sistema se estabilizara en el *setpoint* a pesar de que la ganancia proporcional era suficiente para alcanzarlo.

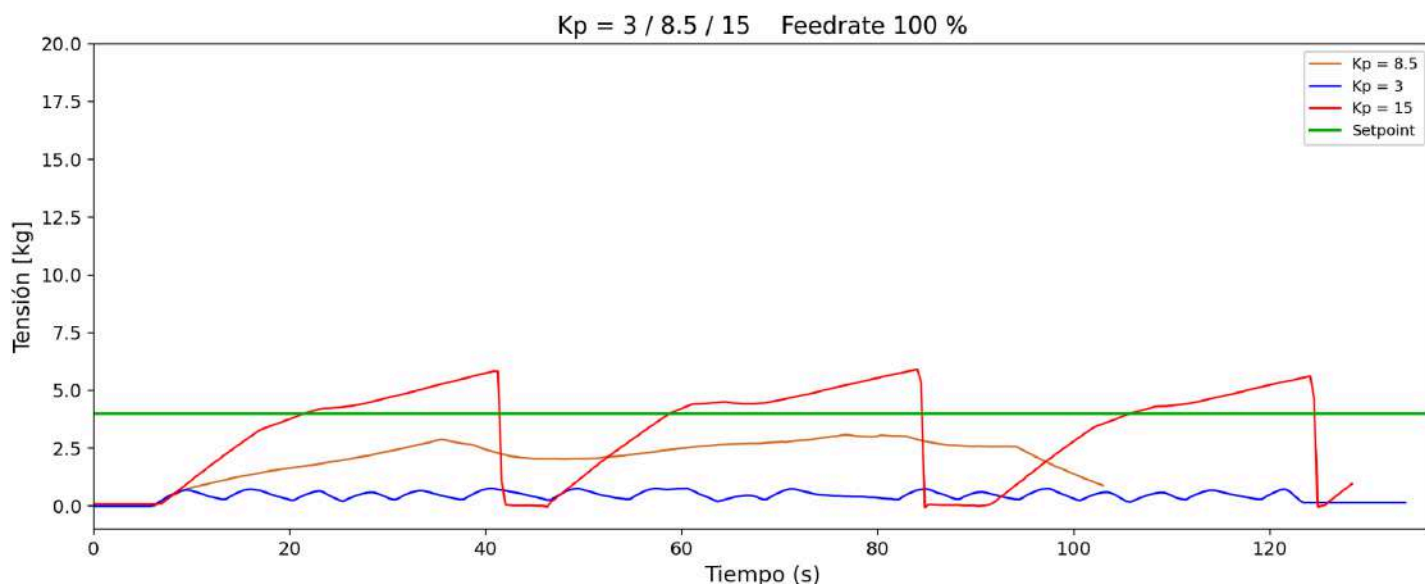


Figura 32. Evolución del Input para valores bajos, intermedios y altos de ganancia proporcional.

En esta etapa se identificaron dos condiciones: por un lado, el rango de Kp entre 7,5 y 8,7 como la zona donde el sistema mostró la mejor aproximación al *setpoint*; por otro, la saturación del motor a bajas rpm como la principal limitación operativa del sistema con *feedrate* al 100%.

Ante la limitación identificada en la etapa anterior, en esta segunda etapa se hizo variar el *feedrate* del mandril como parámetro de ajuste. El incremento del *feedrate* aumenta la velocidad de rotación del mandril, lo que genera una mayor tracción sobre la fibra desde el lado del bobinado. De este modo, el motor no necesita reducir tanto su velocidad para alcanzar la tensión deseada. Los valores de *feedrate* ensayados (110%, 120% y 130%) se seleccionaron de forma conservadora para no comprometer la integridad del proceso de bobinado ni dañar la fibra por exceso de tracción. En la Tabla 4 se presentan los ensayos de esta etapa, con valores de Kp acotados entre 7,5 y 8,7 y BIAS fijo en 67. En la Figura 33 se presenta un ensayo representativo de esta etapa y en la Figura 33 la condición final de laminado.

Tabla 4. Condiciones de ensayo de la segunda etapa (variación de *feedrate*).

Ensayo	Kp	<i>feedrate</i> (%)
E09	7,5	110/120
E10	8	100/110
E11	8,4	100/110
E12	8,5	110/120
E13	8,5	130
E14	8,7	100/110/120
E15	8,7	120

Para $K_p = 7,5$ con *feedrate* de 110/120 % (Ensayo E09), la tensión medida permaneció por debajo del *setpoint* durante la primera mitad del ensayo, alcanzando valores máximos cercanos a 3 kg. Posteriormente, se observó una caída abrupta atribuida a una saturación momentánea del motor. Tras incrementar el *feedrate* de 110 % a 120 %, la tensión aumentó y alcanzó valores en torno a los 4 kg. Este comportamiento indica que el aumento del *feedrate* mejora la capacidad del sistema para compensar perturbaciones y sostener niveles de tensión más elevados. Sin embargo, hacia el final del ensayo se registró una nueva disminución abrupta de la tensión asociada a la saturación del motor, lo que indica que la ganancia proporcional aún era insuficiente para mantener el sistema cercano al *setpoint*.

Los ensayos intermedios E10, E11, E12, E13 y E14 mostraron una tendencia consistente. A medida que se incrementaron progresivamente K_p y el *feedrate*, la tensión alcanzó valores cada vez más próximos al *setpoint* y permaneció durante intervalos más prolongados en su entorno. En los ensayos E10, E11 y E12 aún se observaron caídas puntuales de tensión asociadas a episodios de saturación del motor, mientras que en los ensayos E13 y E14 este fenómeno dejó de observarse. Estos resultados indican que el aumento conjunto de K_p y *feedrate* mejoró progresivamente la capacidad de corrección del sistema y disminuyó la probabilidad de caer en regímenes de operación inestables a bajas revoluciones.

La combinación de parámetros correspondiente al ensayo E15 ($K_p = 8,7$, *feedrate* = 120%) fue la que logró el mejor ajuste de la tensión respecto al *setpoint* sin presentar caídas abruptas asociadas a la saturación del motor. En esta condición, la tensión se mantuvo dentro del rango del *setpoint* durante

casi todo el ensayo. El incremento del *feedrate* al 120% proporcionó la tracción adicional necesaria para que el motor operara en un rango de rpm sin pérdidas significativas de torque.

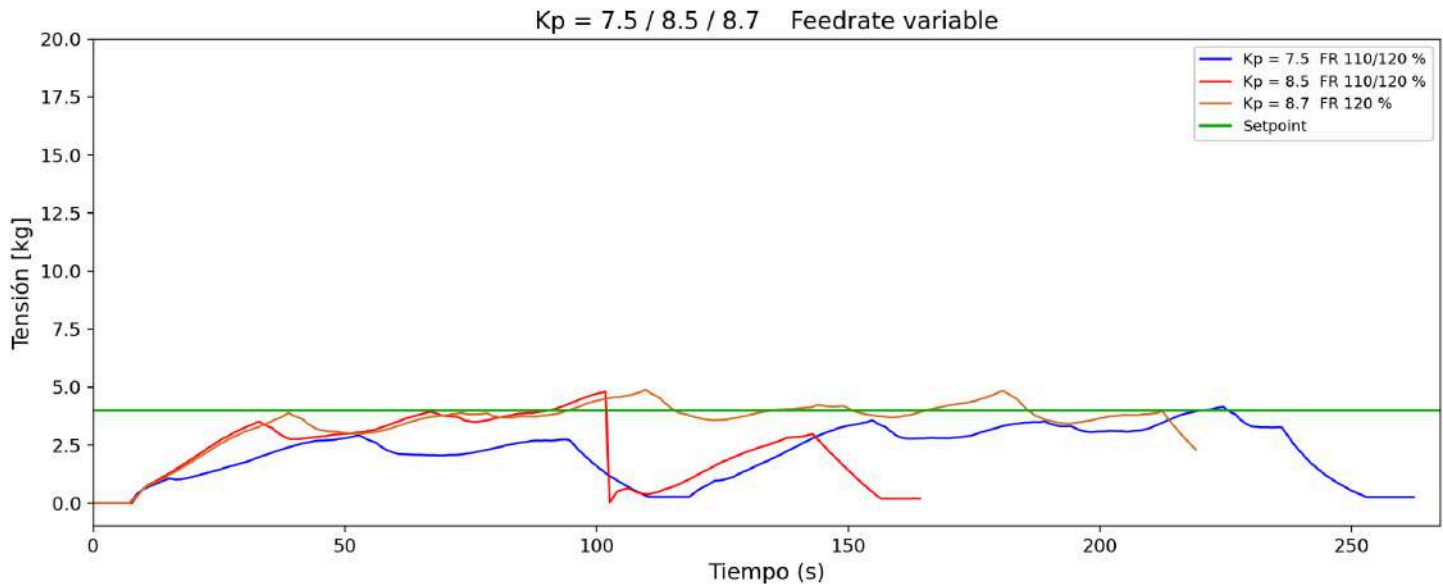


Figura 33. Evolución del Input ante incrementos del feedrate para valores fijos de Kp.

A partir de los ensayos realizados se determinaron los siguientes valores operativos: **Kp = 8,7**, **BIAS= 67** y **feedrate = 120%**. La respuesta del sistema bajo estas condiciones se presenta en la Figura 34. Si bien en dicha figura se muestra un único ensayo representativo, esta condición fue ensayada múltiples veces, obteniéndose resultados consistentes. En todos los casos, el sistema logró mantener la tensión de la fibra en torno al valor de referencia de 2 kg de forma estable. Esta combinación de parámetros fue seleccionada como condición operativa para los ensayos de laminación descritos en el Capítulo 5.

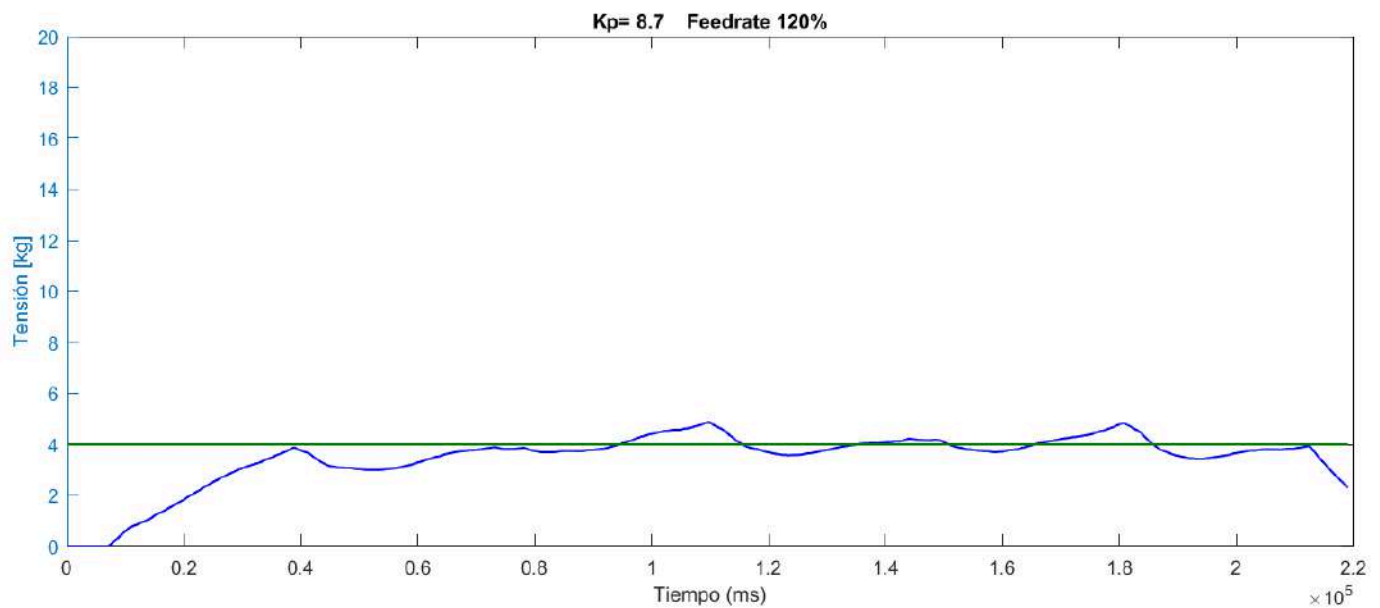


Figura 34. Respuesta del sistema durante el ensayo de determinación de las condiciones finales de laminación.

4.3.2 Conclusión parcial

Los ensayos realizados permitieron identificar una combinación de parámetros de control capaz de proporcionar el mejor desempeño integral del módulo tensionador dentro de las condiciones evaluadas. Se comprobó que tanto la ganancia proporcional como el *feedrate* ejercen influencia sobre la capacidad del sistema para incrementar la tensión de la fibra y llevarla al valor de referencia.

Los resultados obtenidos mostraron que valores bajos de Kp generan acciones correctivas insuficientes, mientras que valores elevados producen respuestas agresivas y una pérdida de estabilidad, comportamiento consistente con el observado durante la etapa de sintonización desarrollada en la Sección 4.2. Asimismo, al incrementar el *feedrate* se pudo ampliar la capacidad de control del sistema, favoreciendo el acercamiento al *setpoint*.

A partir del análisis conjunto de los ensayos se seleccionaron los parámetros operativos finales de laminación, los cuales mantienen la tensión de la fibra próxima al valor de referencia de manera estable y reproducible.

Capítulo 5

Validación experimental del módulo tensionador

El desarrollo del módulo tensionador y la implementación de su sistema de control, requieren de una instancia de validación en condiciones reales de operación. Por ello, se llevó a cabo la fabricación de un tubo de material compuesto de fibra de carbono y resina epoxi, lo cual permitió evaluar el comportamiento del sistema a lo largo de un laminado continuo de seis capas con tres ángulos de bobinado distintos. De esta manera, el proceso de fabricación del tubo pone a prueba el sistema en su conjunto, integrando la mecánica del módulo, el algoritmo de control y su sincronización con la máquina CNC durante un bobinado real. Véase código implementado en Arduino IDE y su descripción en apéndice 4.

5.1 Acondicionamiento

Antes de dar inicio al proceso de laminación, se realizó la puesta a punto del equipo y la preparación de los materiales e insumos. El mandril de acero fue recubierto con una capa de teflón con el fin de facilitar la extracción del tubo una vez completado el curado. Se cargó el código G en el software *Mach3Mill*, encargado de controlar los movimientos del sistema CNC. Además, se verificó que tanto la batea de impregnación como el devanador se encontraran libres de residuos de resina curada provenientes de procesos anteriores que pudieran entorpecer el bobinado. Se colocó la batea con todos sus elementos correspondientes, incluyendo un termómetro para monitorear la temperatura de la resina. Finalmente, se instaló el sistema de resistencias debajo de la batea, conectado a un controlador de temperatura instrumentado con una termocupla que mantiene la temperatura constante mediante sistema de calentamiento tipo baño maría. Las condiciones de laminación empleadas se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. *Parámetros de procesamiento definidos para el bobinado del tubo.*

Parámetros	Valor
Kp	8,7
BIAS	67
Setpoint	2 kg
Velocidad lineal de la fibra	1000 mm/min
feedrate CNC	120 %
Diámetro de mandril	50,8 mm (2")
Ancho de la fibra (w')	8 mm
Ángulos de laminado	54,7° / 65° / 87°
Largo del tubo	200 mm
Temperatura de la batea	35°C

En la Figura 35 se muestra una vista general del sistema ya instalado, donde se aprecia el módulo tensionador, las poleas guía, la batea de impregnación y la máquina al fondo. La mecha de fibra recorre el sistema desde el rodillo alimentador, pasa a través del módulo tensionador, atraviesa los rodillos alineadores, ingresa a la batea de impregnación y luego se dirige al mandril a través del devanador.

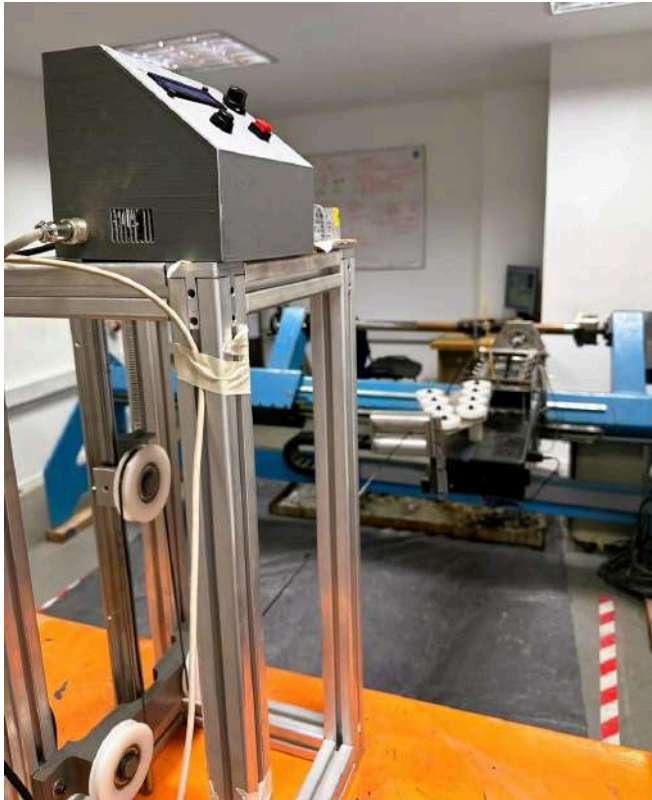


Figura 35. *Izquierda: ubicación del módulo tensionador en el proceso.
Derecha: paso de la mecha de fibra por los rodillos alineadores.*

Paralelamente, se programó el código G, archivo de instrucciones que define los movimientos de la máquina CNC de FW especificando la velocidad de rotación del mandril y el largo del tubular deseado. En el presente trabajo, el código G fue generado con el software *Filwind5* a partir de las siguientes condiciones iniciales: los ángulos de laminado $[54, 7_2 / 65_2 / 87_2]$, el ancho de la mecha de 8mm, la distancia entre el devanador y el eje del mandril en 40 mm, la longitud del tubo a laminar de 200 mm y el coeficiente de roce entre la fibra y el mandril de 0,4. La velocidad lineal de salida de fibra del rodillo alimentador en 1000 mm/min. Se recuerda que las rpm del mandril no permanecen constantes durante el bobinado, sino que varían a lo largo del proceso en función de la geometría de la pieza y del ángulo de bobinado definido en el código G.

Como se muestra en la Figura 36, los datos fueron cargados en el software y se obtuvieron los patrones de laminado correspondientes. El tubo está compuesto por seis capas, a razón de dos capas por cada ángulo de bobinado.

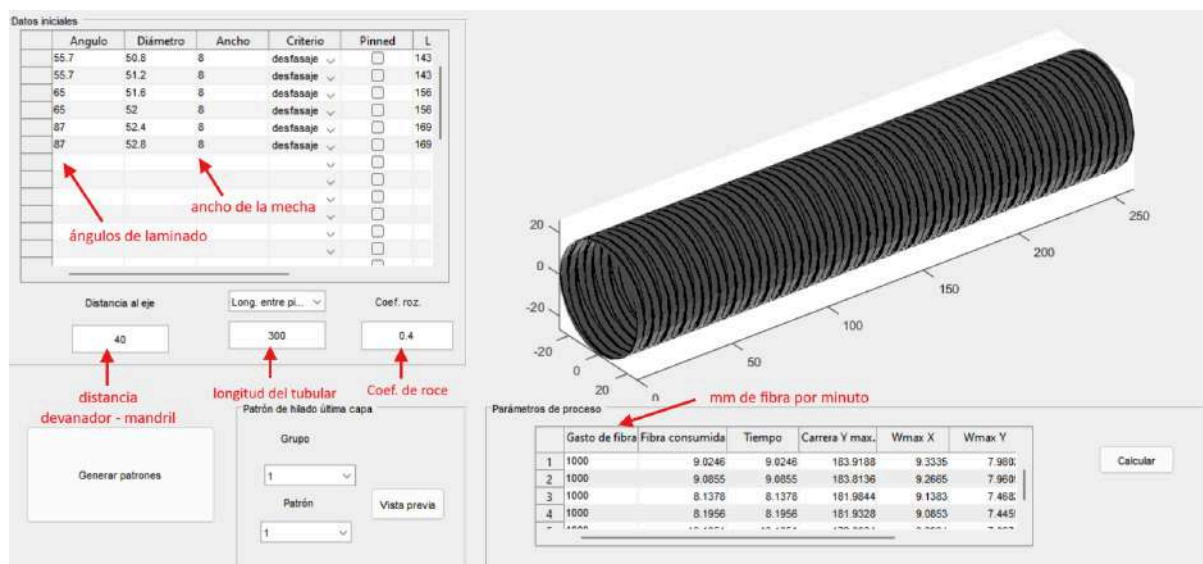


Figura 36. Software Filwind5 empleado para la generación del código G.

Preparación del sistema de resina

Como primer paso, se prepara en el laboratorio el sistema de resina a utilizar. La resina epoxi fue calentada en estufa a 45°C aproximadamente, con el objetivo de reducir su viscosidad y facilitar su homogeneización. Esta etapa es fundamental para incorporar de forma adecuada el resto de los componentes y favorecer la liberación de las pequeñas burbujas de aire que puedan introducirse durante el proceso de mezclado.

A continuación, se incorporó el diluyente reactivo en una proporción de 5 % en peso respecto de la resina, conformando así la mezcla epoxídica base (95 % resina + 5 % diluyente) . La mezcla se realizó con varilla de vidrio, empleando movimientos suaves para evitar el ingreso de aire y la formación de burbujas, luego se sometió a ultrasonido para completar la homogeneización. Posteriormente, se agregó antiespumante en una proporción de 0,1 % respecto de la masa de resina, con el fin de minimizar la incorporación de burbujas de aire que pudieran generar porosidad durante el laminado. Por último, se incorporó el agente de curado, en este caso la amina, de forma cuidadosa. La cantidad de agente de curado fue determinada según la relación estequiométrica correspondiente al sistema epoxi-amina empleado. La formulación completa de la resina se detalla en la Tabla 6.

Tabla 6. *Formulación del sistema de resina.*

Componente	Nombre Comercial	Masa (%)	Función
Resina Epoxi	DGEBA	95%	Matriz/base
Diluyente	DLR001	5%	Modificador de viscosidad
Amina	Jeffamine®	32% *	Agente de curado
Antiespumante	BYK-052	0,1% *	Aditivo

**Respecto al total de la mezcla epoxídica.*

Con la resina formulada y el equipo debidamente acondicionado, se vertió la mezcla en la batea de la máquina de *filament winding* y se reguló la temperatura mediante el sistema de resistencias hasta alcanzar la viscosidad adecuada para el proceso, como se muestra en la Figura 37. Verificadas estas condiciones, se dio inicio al bobinado.



Figura 37. *Batea con la resina formulada. Se observa el termómetro para el monitoreo de la temperatura del baño y la mecha de fibra durante su paso a través de la resina en dirección al rodillo devanador.*

5.2 Ejecución del bobinado

La fabricación del tubo se desarrolló de forma continua e ininterrumpida, sin necesidad de intervenir manualmente sobre el módulo tensionador durante toda su ejecución. Una vez iniciada la laminación, el proceso consistió en cargar cada capa en el software de la máquina de *filament winding* y ejecutarla. El módulo tensionador permaneció en funcionamiento continuo durante los aproximadamente 70 minutos que duró la laminación completa, sin necesidad de pausarlo entre capas. Los datos de tensión, *setpoint* y rpm fueron registrados con el software *RealTerm* a través del puerto serial de Arduino, guardando los registros de cada capa de forma independiente para su posterior análisis.

Durante el proceso, la tensión de la fibra y las rpm del motor fueron monitoreadas en tiempo real a través de la pantalla LCD del módulo, como se muestra en la Figura 38. En todo momento los valores se mantuvieron dentro de los rangos esperados. No se registró saturación del motor ni comportamientos erráticos.



Figura 38. Pantalla LCD del módulo durante el proceso de laminación.

Desde el punto de vista mecánico, el sistema de poleas y el resorte presentaron un comportamiento estable a lo largo de todo el bobinado. En la Figura 39 se observa el módulo tensionador en funcionamiento, donde se muestra el desplazamiento de la polea móvil y el estiramiento del resorte producto de la tensión aplicada sobre la fibra. El desplazamiento de la polea fue suave y constante, sin movimientos abruptos ni estiramientos excesivos del resorte. Se observó un estiramiento levemente mayor del resorte cuando el carro llegaba a los extremos del tubo, previo al cambio de sentido, lo cual es coherente con la variación de tensión que se analiza con mayor detalle en

las curvas de control de la sección 5.3.1. En la Figura 40 se observa el devanador durante la deposición de la fibra sobre el mandril.

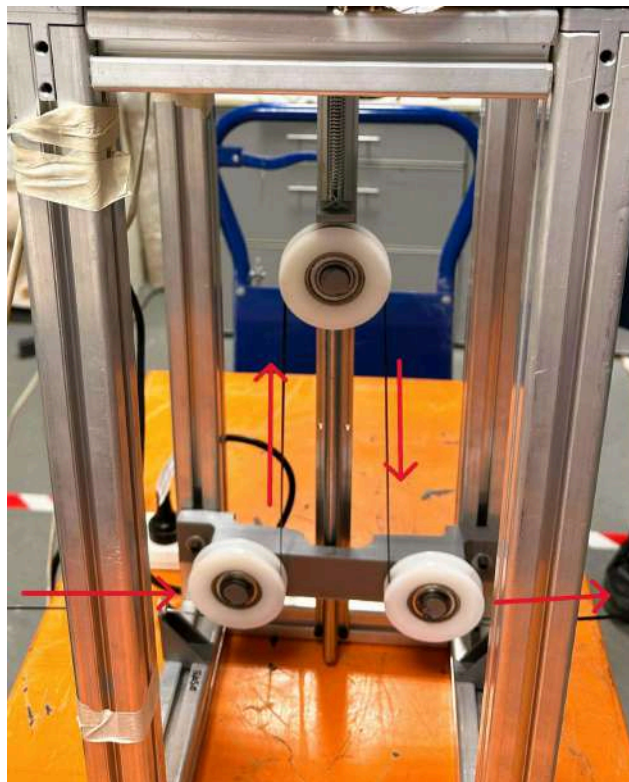


Figura 39. Vista frontal del módulo tensionador durante el bobinado.



Figura 40. Deposición de la mecha de fibra impregnada sobre el mandril por el devanador durante la última capa de bobinado.

La laminación se extendió hasta completar la sexta capa. El desfase angular calculado para cada capa hizo que la mecha de fibra se depositara de manera adyacente y, al alcanzar la sexta capa, se obtuvo un recubrimiento uniforme y libre de espacios vacíos (*gaps*) o discontinuidades. Finalizado el bobinado, se procedió al curado del material compuesto. El mandril fue desmontado del equipo y colocado en un horno a temperatura controlada durante cuatro horas. Durante el ciclo de curado, el mandril se mantuvo en rotación sobre su propio eje con el fin de evitar el escurrimiento de resina hacia la parte inferior. Una vez alcanzada la temperatura ambiente, se realizó el desmolde del tubo, como se muestra en la Figura 41, y luego se obtuvieron muestras del espesor del tubo por micrografía óptica.

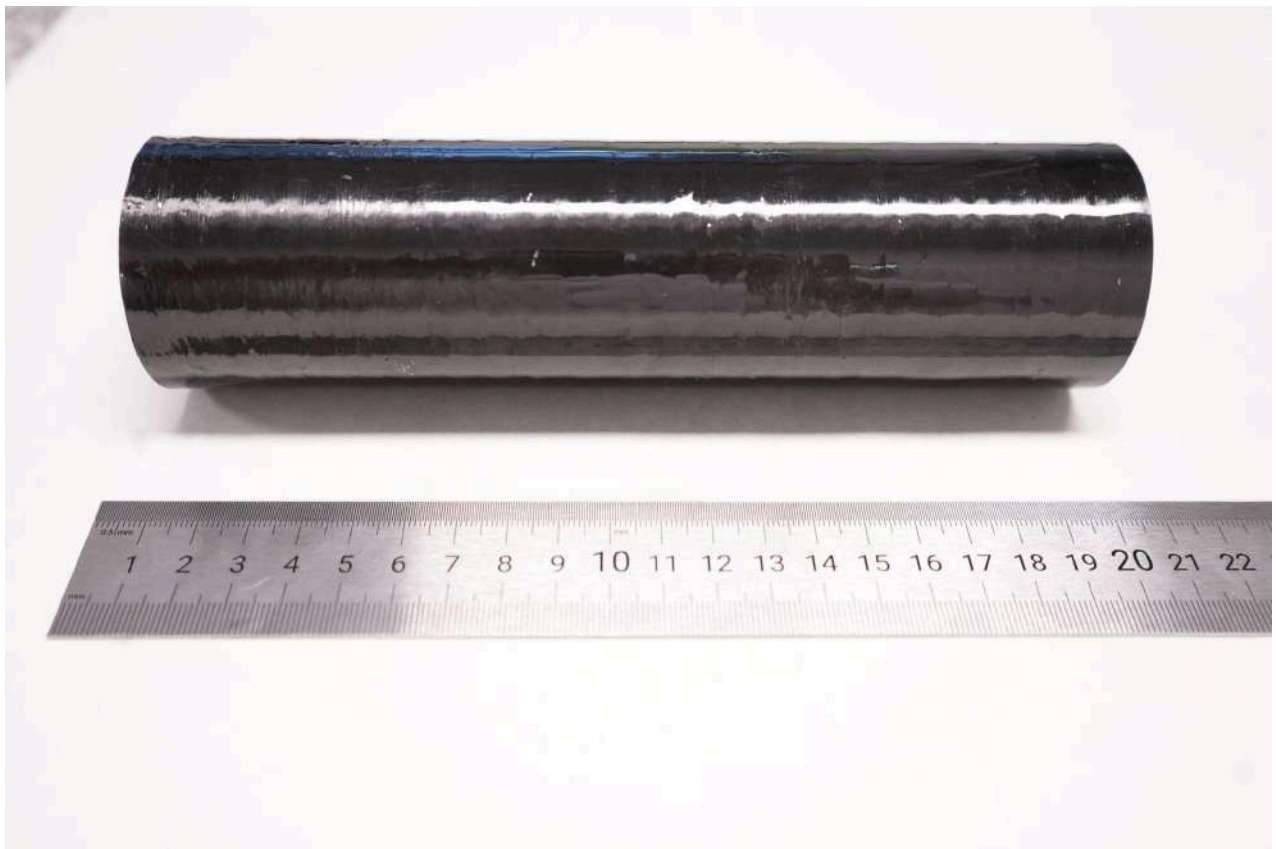


Figura 41. *Tubo de material compuesto de 20 cm de longitud obtenido tras el curado, desmolde y corte de los extremos.*

5.3 Análisis de resultados

Finalizado el proceso de fabricación, se procedió al análisis de los datos registrados durante el bobinado y a la caracterización del tubo obtenido. El objetivo de esta sección es evaluar el desempeño del sistema de control de tensión a partir de las curvas registradas en tiempo real y contrastar dichas curvas con la calidad del laminado, determinada con la medición del espesor de pared sobre micrografías ópticas.

5.3.1 Curvas de control

Durante el proceso de laminación se registraron los datos de *input*, rpm y *setpoint*. A continuación, se presenta el análisis de las curvas obtenidas, agrupadas según el ángulo de laminado correspondiente a cada capa. Para cada ángulo se muestra una gráfica representativa del sistema en dichas condiciones.

Capas 1 y 2 - Ángulo de 54,7°

La Figura 42 muestra las curvas de control correspondientes a las capas laminadas con un ángulo de 54,7°. En estas capas, el código G define unos 11 a 12 ciclos de ida y vuelta del carro (se entiende por ciclo un recorrido completo del carro desde un extremo del tubo al otro y su retorno). En cada extremo, el carro desacelera y cambia de sentido, lo que genera una caída en la velocidad del mandril. Este cambio de velocidad en los extremos produce una variación en la tensión de la fibra, que se refleja en las oscilaciones de rpm observadas en los gráficos. Cada valle en la curva de rpm corresponde a un cambio de sentido del carro.

A pesar de estas perturbaciones, se observa que el sistema tensionador es capaz de responder a estos cambios de velocidad y mantener la tensión de la fibra cerca del valor deseado.

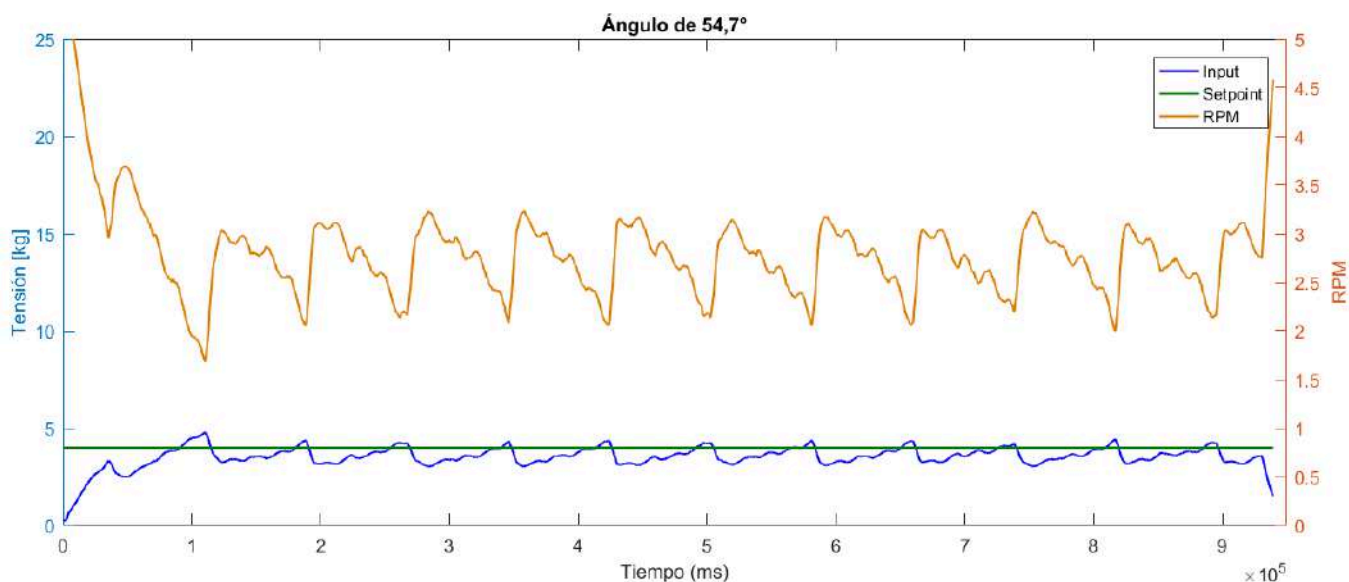


Figura 42. Curvas de control para un ángulo de 54,7°.

Capas 3 y 4 — Ángulo de 65°

La Figura 43 presenta las curvas correspondientes a las capas laminadas con un ángulo de 65°. Al aumentar el ángulo, el código G reduce el número de ciclos y disminuye a 9 por capa. Además, la diferencia de velocidad entre el tramo recto y durante el cambio de sentido se reduce, entonces, las variaciones de tensión asociadas a los cambios de dirección del carro resultan menos frecuentes y de menor amplitud que en las capas anteriores.

Esto se observa con claridad en el gráfico, donde la curva de rpm presenta valles menos pronunciados. La señal de *input* se mantiene cerca al *setpoint* de forma más precisa que en las capas anteriores, ya que las perturbaciones sobre la tensión son menos frecuentes.

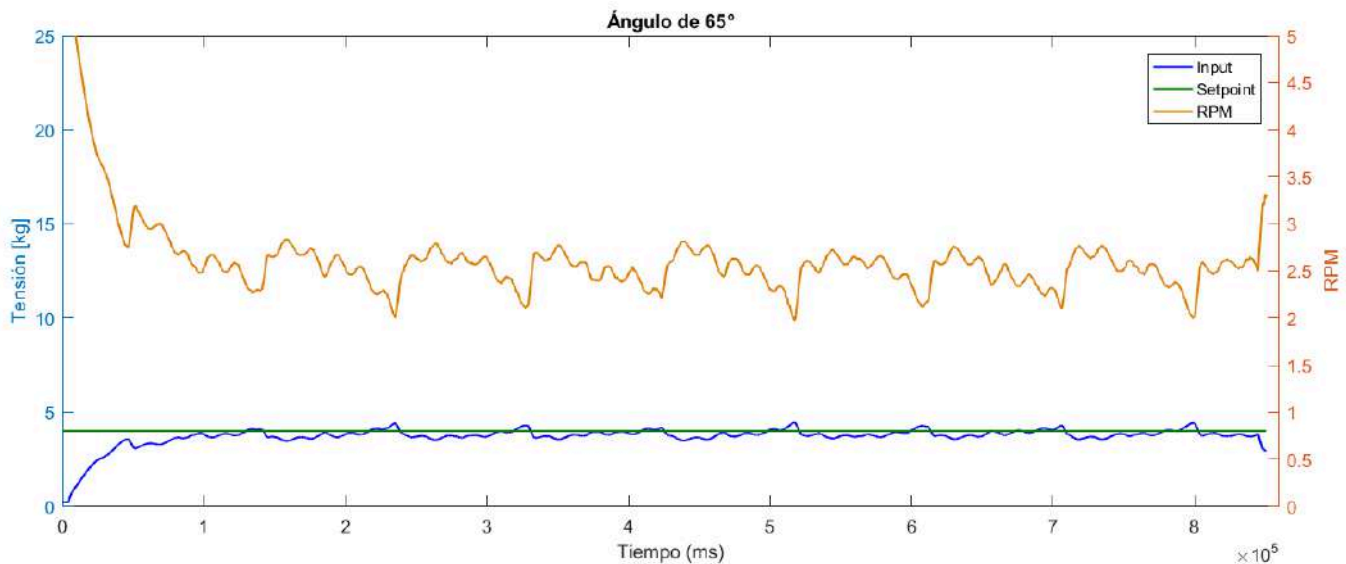


Figura 43. Curvas de control para un ángulo de 65°.

Capa 5 y 6 — Ángulo de 87°

La Figura 44 muestra la curva correspondiente a la quinta y sexta capa, laminadas de forma continua con un ángulo de 87°, cercano al bobinado circunferencial. En este caso, el carro se desplaza lateralmente a mucha menor velocidad que en ángulos más bajos. El código G define dos ciclos de ida y vuelta, uno por cada capa.

En consecuencia, la curva de rpm es notablemente más estable que en las capas previas, sin las oscilaciones cíclicas generadas por los cambios de sentido del carro. La tensión se mantiene prácticamente superpuesta al *setpoint* durante toda la capa, evidenciando las condiciones más favorables para el sistema de control dentro de la secuencia de laminado.

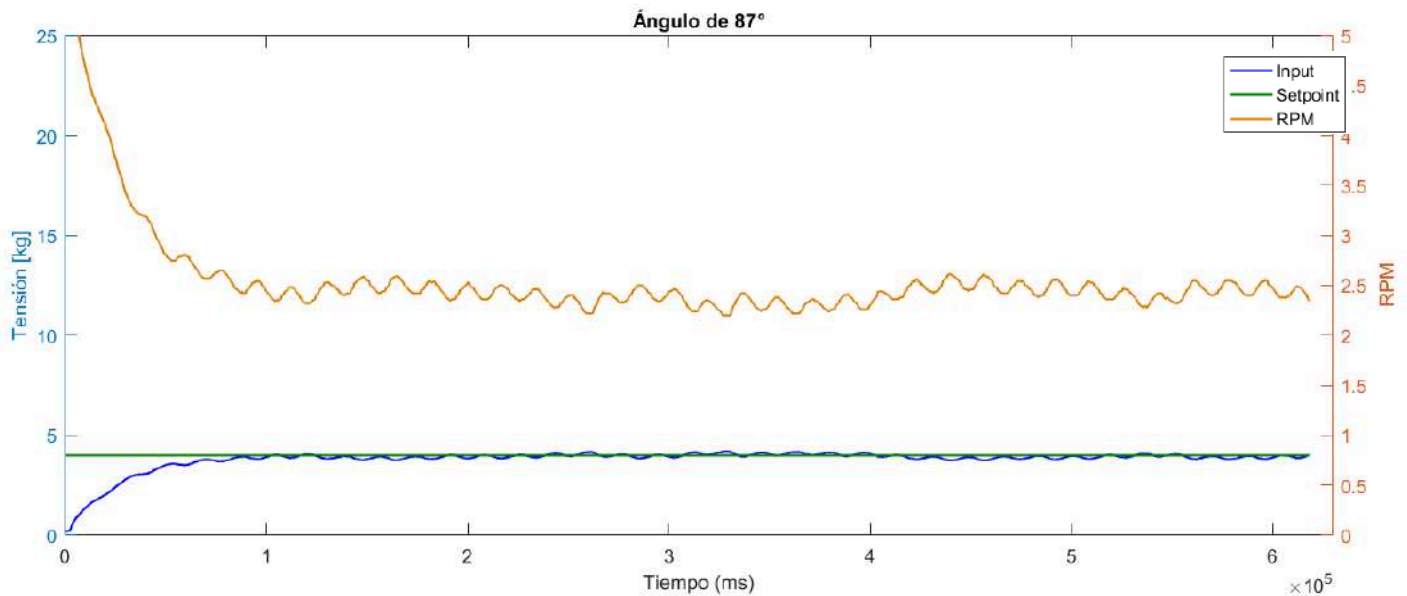


Figura 44. Curvas de control para un ángulo de 87°.

El análisis de las curvas de control permitió verificar el correcto funcionamiento del módulo tensionador en los tres ángulos de laminado evaluados. En todos los casos, la tensión medida se solapó al *setpoint*, con un transitorio inicial breve y un comportamiento estable durante el resto del bobinado.

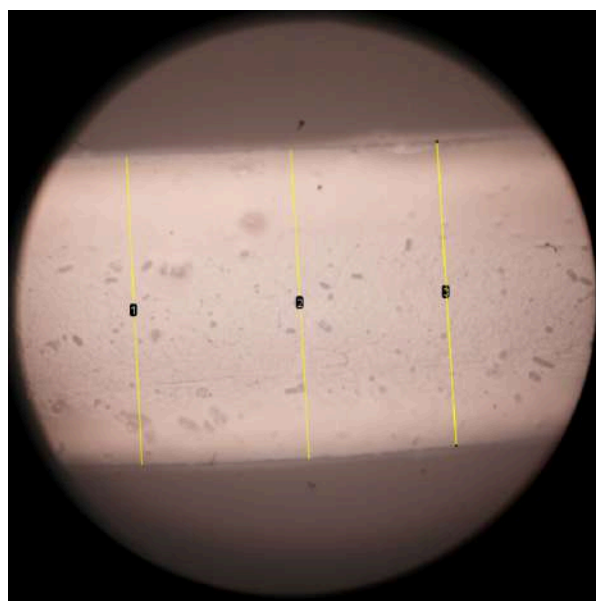
Se observó que el comportamiento del sistema de control varía en función del ángulo de bobinado. A ángulos bajos, la mayor separación entre pasadas adyacentes requiere un mayor número de ciclos de ida y vuelta del carro para completar la capa. Esto se traduce en cambios de sentido más frecuentes que hacen variar la tensión de la fibra de forma cíclica. A medida que el ángulo aumenta, la cantidad de ciclos disminuye y las condiciones de bobinado se vuelven más estables, tal como se refleja en la suavización progresiva de las curvas de rpm.

A pesar de estas diferencias, el sistema de control respondió de forma satisfactoria en todas las condiciones, manteniendo la tensión dentro de un rango acotado respecto a la tensión de trabajo. Este resultado valida el diseño del módulo tensionador y el algoritmo de control implementado, demostrando su capacidad para operar de manera continua a lo largo del procesamiento.

5.3.2 Medición de espesor

Con el fin de evaluar la calidad del laminado y verificar la uniformidad del espesor de pared, se tomaron muestras de la sección transversal del tubo y luego se observaron mediante microscopía óptica. Se tomaron cuatro micrografías en distintas zonas de la sección y se midió el espesor de pared haciendo uso del software de procesamiento de imágenes *ImageJ*. La calibración de la escala se realizó a partir de una imagen de referencia, obtenida con el mismo aumento óptico que las micrografías.

A continuación, se realizaron tres mediciones de espesor por cada micrografía, es decir un total de doce mediciones. Los resultados se presentan en la Tabla 7. El espesor de pared promedio obtenido fue de $1,115 \pm 0,042$ mm. La baja dispersión entre las mediciones indica una buena uniformidad del espesor a lo largo de la sección, lo cual es consistente con el comportamiento estable del sistema de control de tensión observado en la sección anterior. En la Figura 45 se muestra una micrografía representativa de la sección transversal del tubo.



	Area	Mean	Min	Max	Perim.	Angle	%Area	Length
1	9.386E-4	190.083	110.352	211.788	1.127	-87.121	0	1.127
2	9.469E-4	199.012	119.000	215.001	1.137	-86.643	0	1.137
3	9.310E-4	182.161	121.683	197.709	1.117	-86.413	0	1.117

Figura 45. Micrografía óptica representativa de la sección transversal del tubo utilizada para la determinación del espesor de pared en milímetros .

Tabla 7. Medición de espesor de pared del tubo sobre cuatro micrografías ópticas.

Medición (mm)	Micrografías			
	Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3	Imagen 4
1	1,135	1,141	1,133	1,039
2	1,137	1,154	1,140	1,045
3	1,129	1,154	1,114	1,057
Promedio (mm)	1,134	1,150	1,129	1,047
Promedio total (mm)	1,115 ± 0,042			

Nuevamente, el control de la tensión cobra relevancia dado que la fuerza que sufre la fibra durante el bobinado tiene una influencia directa sobre el espesor final del componente. Cuando se trabaja con tensiones altas, se promueve un mayor escurrimiento de resina entre capas y una compactación más efectiva del laminado, por lo que se obtienen capas de menor espesor y con mayor contenido de fibra.

A partir del espesor de pared medido (1,115 mm) y considerando las seis capas bobinadas, se puede estimar un espesor promedio por capa de aproximadamente 0,186 mm. Este valor constituye un parámetro de referencia importante a la hora de diseñar laminados compuestos, ya que permite predecir el espesor final de una pieza en función del número de capas previsto. Su determinación experimental es de utilidad para futuras fabricaciones, ya sea bajo las mismas condiciones utilizadas o variando los parámetros de procesamiento como la tensión de diseño o los ángulos de bobinado.

5.3.3 Conclusión parcial

Con la fabricación del tubo de material compuesto se pudo corroborar el funcionamiento del módulo tensionador y su algoritmo de control en condiciones reales de operación. El proceso se completó con éxito de forma continua sin interrupciones ni intervenciones manuales sobre el módulo.

El análisis de las curvas de control hizo posible monitorear la tensión en tiempo real, verificando que el sistema mantuviera el *input* en torno al *setpoint*, tanto en condiciones más demandantes (ángulos bajos con múltiples pasadas), como también en las más estables (ángulos altos y cercanos al bobinado circunferencial).

Por otra parte, con el análisis micrográfico se estimó un espesor de pared promedio de $1,115 \pm 0,042$ mm, con baja dispersión entre las mediciones realizadas en distintas zonas de la sección transversal. Esto refuerza el comportamiento estable del sistema de control, ya que variaciones grandes en la tensión de la fibra habrían provocado diferencias de compactación y, por ende, en irregularidades en el espesor del laminado.

Estos resultados confirman que el módulo tensionador, desde su diseño mecánico hasta su electrónica de control, cumple con el objetivo para el cual fue desarrollado: regular la tensión de la fibra ante las variaciones propias del procesamiento, manteniéndola estable y próxima al *setpoint* a lo largo de toda la laminación. Como trabajo a futuro, se propone explorar la influencia de distintos niveles de tensión sobre el espesor de cada capa, así como el efecto del ángulo de bobinado en el escurrimiento de resina y el espesor final.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo a futuro

Conclusiones

Durante el presente trabajo se logró cumplir con el objetivo general planteado. Se diseñó, desarrolló y validó experimentalmente el módulo tensionador capaz de medir y controlar en tiempo real la tensión de la fibra durante el proceso de *filament winding*. El módulo fue integrado exitosamente al equipo de FW del grupo CET y operó de forma autónoma y efectiva durante un ciclo completo de laminación.

El desarrollo por etapas del diseño del tensionador fue clave para alcanzar este resultado. Problemas como la no linealidad en la medición de la tensión de la configuración preliminar o la fricción del prototipo sobre el compensador aparecieron al construir y ensayar cada versión, y su mitigación fue definiendo los criterios de diseño de la etapa siguiente. De esta manera el módulo tensionador se fabricó con la disposición de poleas y el sistema de control ya validado experimentalmente.

Desde el punto de vista mecánico, se destaca la disposición de la polea flotante, que resolvió dos problemas en simultáneo. Por un lado, estableció una relación lineal entre la señal de la celda de carga y la tensión de la fibra y, por otro, aportó la capacidad de almacenar y liberar fibra según la dinámica del proceso. De esta manera, se integraron las funciones de tensionador y compensador de tensión en un único dispositivo, eliminando la necesidad de un componente independiente en el equipo.

El desarrollo de la electrónica y del sistema de control representó uno de los mayores desafíos del proyecto, dado que se partió sin experiencia previa en la materia. Tanto las conexiones electrónicas entre la celda de carga, la placa Arduino, el driver, el motor paso a paso, y demás componentes, como la programación de la lógica de control, requirieron un proceso intensivo de investigación, prueba y error. El trabajo incluyó además el diseño y la impresión 3D del gabinete que aloja la pantalla LCD y los botones, integrando todos los componentes en un módulo compacto y funcional. En este sentido, el proyecto no solo dio como logro un dispositivo operativo, sino también la incorporación de

conocimientos en electrónica, programación y sistemas de control que quedan disponibles para trabajos futuros.

El desempeño del módulo tensionador durante la fabricación del tubo fue satisfactorio. La tensión logró acercarse al setpoint en todos los ángulos de laminado, el proceso se desarrolló de forma continua y el sistema no presentó imprevistos ni desvíos en la lectura de la celda de carga, manteniendo su rendimiento de principio a fin.

Este buen desempeño se vio reflejado directamente en la calidad de la pieza obtenida. La uniformidad del espesor de pared medida sobre las micrografías constituye la evidencia física de que el control funcionó correctamente, dado que variaciones significativas en la tensión habrían generado zonas con distinta compactación e irregularidades a lo largo del tubo. Asimismo, con las mediciones obtenidas se estimó el espesor promedio de cada capa, y se pudo correlacionar con la tensión de la fibra. Este es un dato que el laboratorio no disponía hasta el momento y que facilita el diseño de futuras piezas al poder predecir la cantidad de capas necesarias para alcanzar un espesor determinado.

En síntesis, este trabajo pone de manifiesto la importancia del control de la tensión de la fibra como parámetro de proceso en la fabricación de materiales compuestos por *filament winding*. La tensión incide directamente sobre la calidad del laminado, el contenido de fibra y el espesor final de la pieza, propiedades que determinan el desempeño estructural de componentes como tubos y recipientes a presión. Contar con un dispositivo capaz de regular esta variable en tiempo real representa una mejora concreta en la capacidad de procesamiento del equipo de FW del grupo CET, y representa un avance hacia la fabricación de componentes de mayor calidad y reproducibilidad. El módulo desarrollado, junto con el conocimiento generado durante su construcción, deja una base sólida sobre la cual continuar avanzando en la optimización del proceso y en el desarrollo de estructuras de material compuesto de mayor complejidad.

Trabajo a futuro

A partir de las conclusiones obtenidas surgen tres líneas principales de trabajo que permitirán ampliar el alcance del desarrollo.

La primera consiste en profundizar la caracterización experimental del laminado. Para ello se propone fabricar varios tubos variando la tensión de trabajo y los patrones de bobinado, empleando distintos ángulos y trayectorias de laminado, y complementar con ensayos de porosidad y de contenido volumétrico de fibra. Con los resultados se podría construir una base de datos con la relación entre tensión de fibra y espesor de capa que funcione como herramienta de diseño para futuras piezas.

En segundo lugar, se propone explorar estrategias adaptativas de control, en las que el algoritmo ajuste automáticamente la ganancia proporcional en función del ángulo de bobinado, dado que se observó que el comportamiento del sistema varía ligeramente según las condiciones de laminado. También sería conveniente incorporar un sistema de alarma o parada automática ante desvíos de tensión fuera de un rango admisible, de modo de proteger el procesamiento de la pieza.

Por último, se propone avanzar hacia el bobinado de geometrías más complejas. Además de laminar sobre mandriles de mayor diámetro, el objetivo de mayor interés es la fabricación de tanques con domos, cuyos casquetes representan la condición más crítica para el control de la tensión. En estas geometrías los movimientos del devanador son mucho más complejos que en un tubo cilíndrico, lo que pone a prueba tanto el sistema de control y el motor como la capacidad de acumulación de fibra del sistema.

Anexo

Materiales y componentes

Componentes estructurales

Los materiales y elementos utilizados para la construcción del dispositivo y sus configuraciones preliminares fueron los siguientes:

- Rodillo alimentador de fibra de carbono montado sobre soportes metálicos y base de madera.
- Cadena + piñón para el acoplado del motor al rodillo.
- Poleas guías + polea móvil.
- Soportes y ejes plásticos por impresión 3D en PLA.
- Anillos de cerámica.
- Placas de madera para el montaje.
- Resorte (constante elástica no determinada).

Elementos específicos del módulo tensionador:

- Perfiles estructurales de aluminio (tipo Bosch)
- Guías lineales y rodamiento lineal.
- Soporte impreso 3D en PLA para anillos cerámicos
- Soporte impreso 3D en PLA para polea móvil y poleas fijas.
- Elementos de fijación (tornillos, bulones, etc.)

Componentes electrónicos y de control

A continuación, se detallan los materiales y componentes requeridos para la implementación del sistema electrónico:

- Placa adquisidora de datos Arduino UNO.
- Driver A4988 del motor paso a paso
- Celda de carga de 10kg + módulo amplificador de señal HX711

- Motor paso a paso RS 440-464 [19]
- Fuente de alimentación de 12V
- Pantalla LCD 16x2
- Botones de control (Inicio y Pausa)
- *Encoder rotatorio*
- Elementos auxiliares (cableado, conectores, capacitores, resistencias, borneras, etc.)

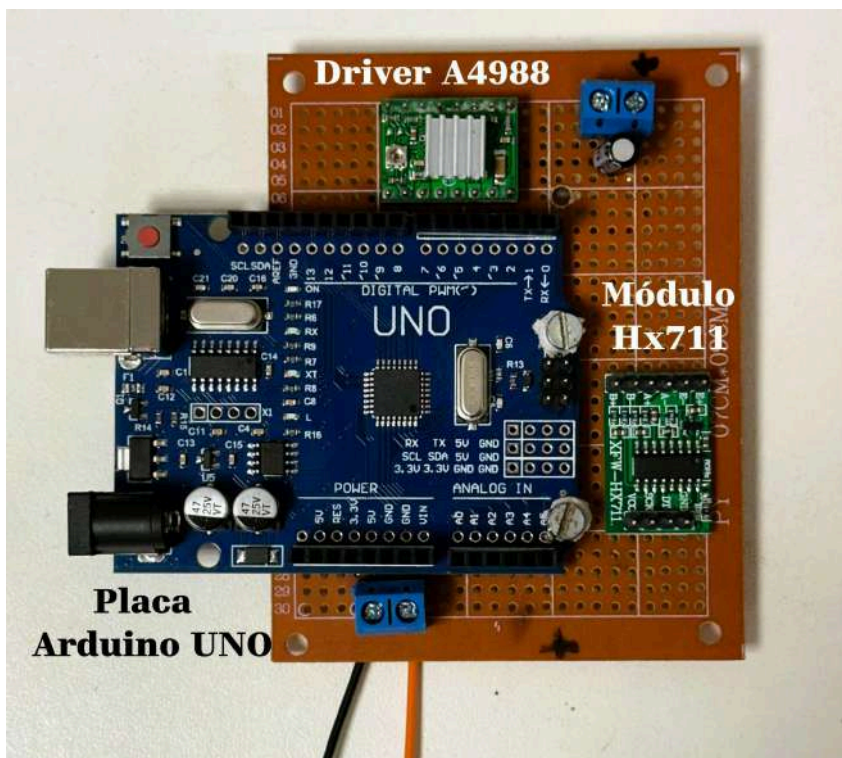


Figura A. Placa Arduino UNO; driver de motor paso a paso; módulo amplificador de la celda de carga; celda de carga de 10 Kg.

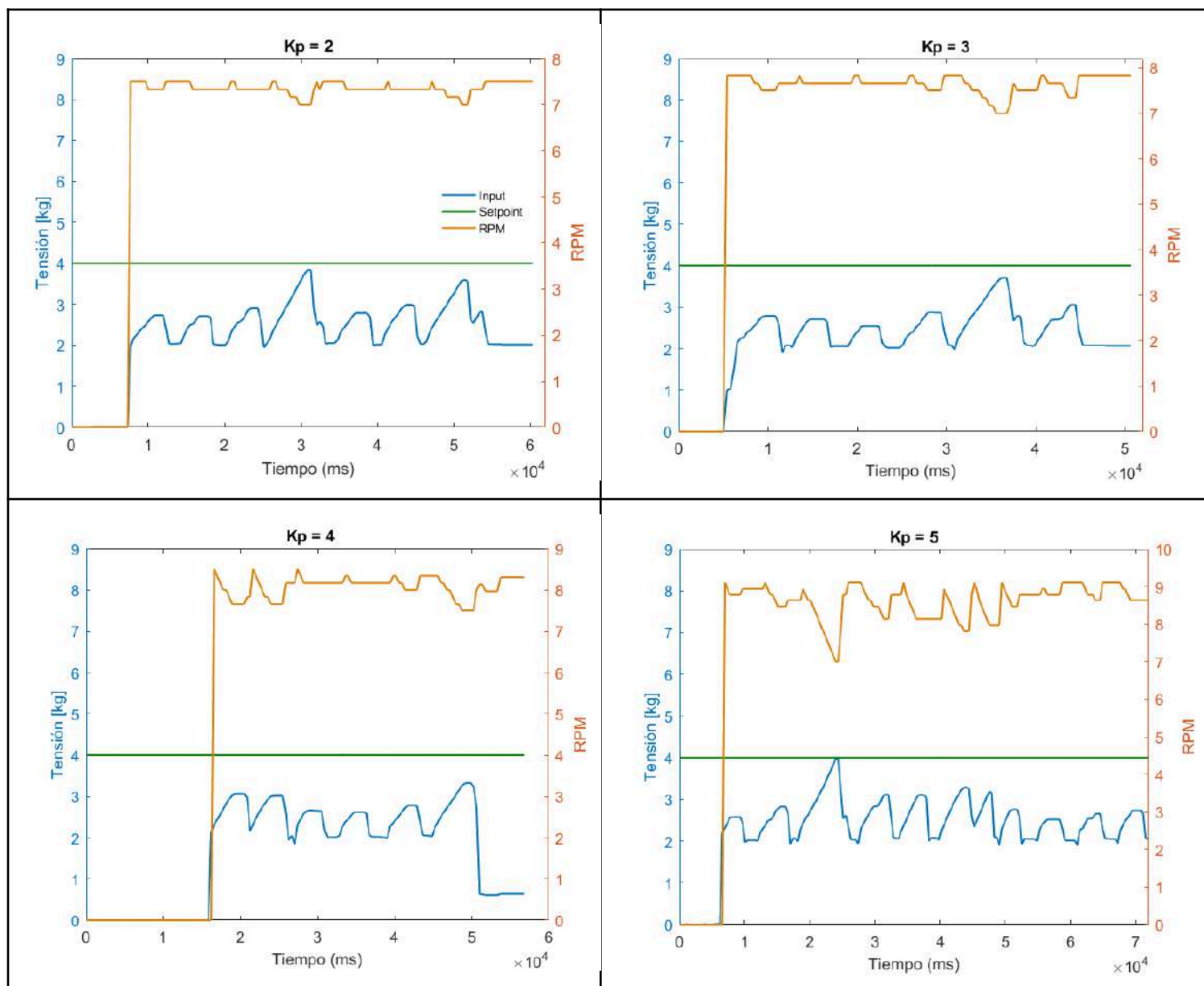
Componentes de programación y softwares adicionales

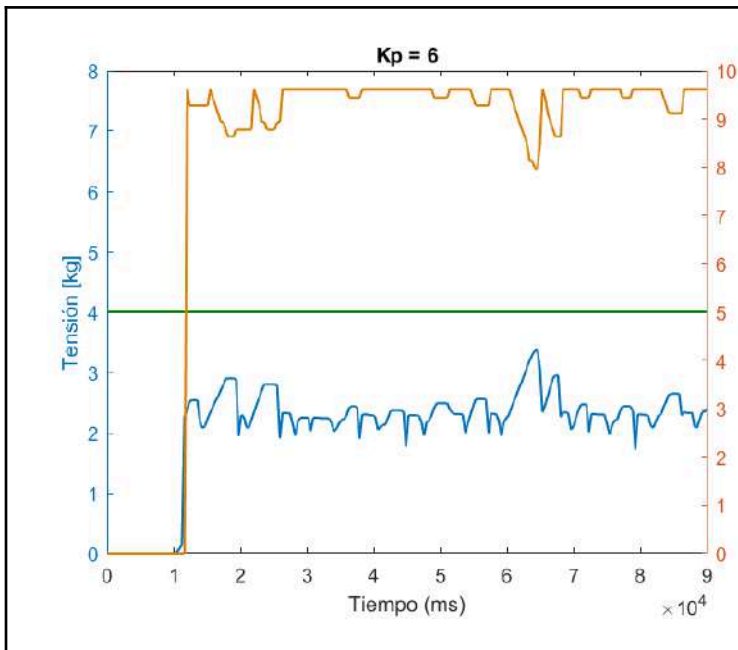
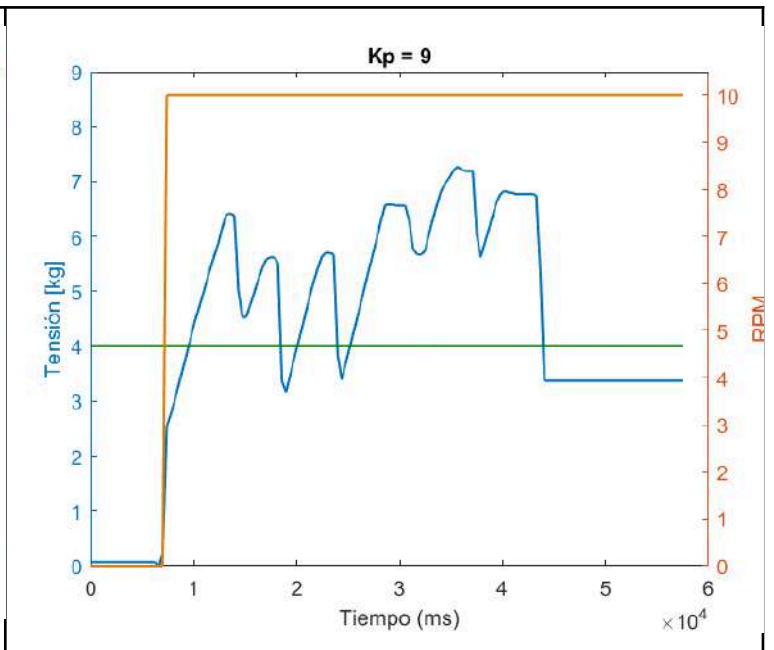
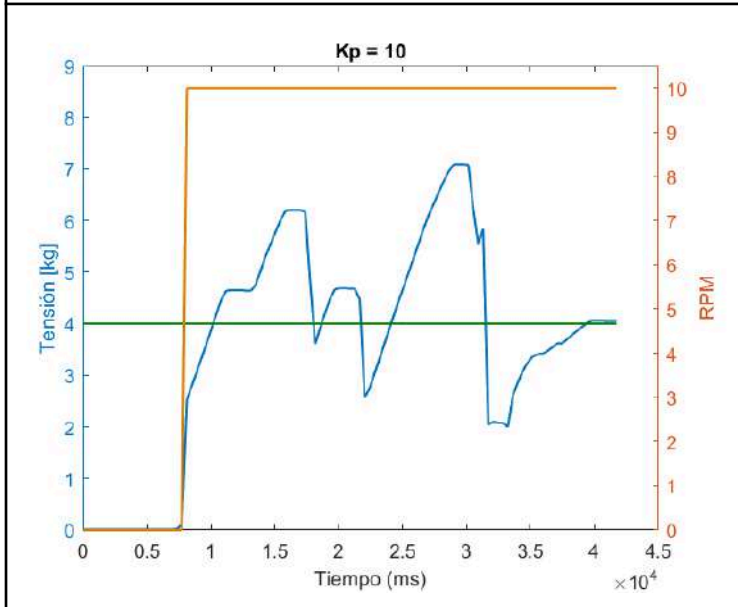
- *Arduino IDE*: entorno oficial para la escritura del código de programación.
- *SolidWorks*: software de diseño 3D.
- *RealTerm*: herramienta de monitoreo y registro de datos transmitidos por el puerto serie desde el microcontrolador Arduino UNO.

Apéndices

Apéndice 1. Sintonización de PID en el prototipo

Gráficos representativos de los ensayos de sintonización realizados sobre el prototipo del módulo tensionador. Se representan la tensión medida (*input*) en kg, la velocidad del motor en rpm y el valor de referencia (*setpoint*) en función del tiempo en milisegundos.





Apéndice 2. Configuración y conexión del motor paso a paso RS 440-464

El actuador del sistema es un motor paso a paso híbrido RS 440-464 (NEMA 34) [19], con una resolución original de 200 pasos por revolución. El motor dispone de 8 cables que dan acceso a los puntos medios y extremos de sus dos pares de bobinas, lo que permite distintas configuraciones de conexión.

En el presente trabajo se utilizaron únicamente 4 cables (rojo, negro, amarillo y verde), correspondientes a los extremos de cada par de bobinas (posiciones A, D, E y H según el datasheet), dejando sin conectar los puntos medios. Esta disposición configura el motor en modo bipolar serie, en el cual cada fase utiliza la bobina completa. Dicha configuración permite obtener mayor torque a bajas velocidades de rotación, característica adecuada para la aplicación del rodillo alimentador, donde se requieren rpm bajas con fuerza suficiente para controlar la entrega de fibra. El driver utilizado para la gestión de las señales de paso y dirección fue un A4988, el cual opera en modo bipolar y requiere 4 cables de entrada (2 por fase).

En cuanto a la configuración de micropasos, se seleccionó un modo de 1/8 de paso mediante los pines MS1, MS2 y MS3 del driver. Esto implica que cada paso completo del motor se subdivide en 8 micropulsos, lo que resulta en 1600 micropulsos por revolución real (200×8). Sin embargo, en el código se declaró un valor de 800 pasos por revolución ($\text{stepsPerRev} = 100 \times 8$), lo cual, combinado con la forma en que la librería MobaTools escala internamente la función `setSpeed()`, genera un factor de conversión de 20 entre el valor ingresado en el código y las rpm reales del eje del motor. A modo de ejemplo, para obtener 2 rpm reales es necesario indicar un valor de 40 en el código. Esta relación fue verificada experimentalmente y se incorporó en el programa por medio de la expresión $\text{rpm}/20$ tanto para la visualización en la pantalla LCD como para el registro de datos enviados por puerto serie.

Apéndice 3. Remapeo lineal de la salida del controlador

Durante los ensayos de sintonización de Kp y los ensayos con controladores PI y PID, la salida del controlador se convirtió a velocidad del motor usando un remapeo lineal implementado con la función `map()` del entorno Arduino: $\text{rpm} = \text{map}(\text{output}, -100, 20, 500, 30)$

Esta función traslada linealmente el rango de salida del controlador (de -100 a 20) a un rango de valores de velocidad del motor (de 500 a 30). Estos últimos valores corresponden a unidades internas del código y deben dividirse 20 (debido a la configuración del motor especificada en el Apéndice 2) para obtener las rpm reales del eje.

La lógica de la conversión es inversa: cuando el output adopta su valor más negativo (-100), lo que indica es que la tensión medida supera ampliamente al setpoint, el motor recibe la máxima velocidad ($500/20 = 25$ rpm) para entregar más fibra y reducir la tensión. En el extremo opuesto, cuando el output alcanza su valor máximo (20), lo que indica es baja tensión, el motor recibe la mínima velocidad ($30/20 = 1,5$ rpm) para frenar la entrega de fibra y permitir que la tensión aumente.

Los límites del remapeo se establecieron considerando el rango de velocidades típicas del rodillo alimentador durante el proceso de *filament winding*. Esta estrategia fue posteriormente reemplazada por la incorporación del término BIAS en la ecuación de control, el cual eliminó la necesidad del remapeo al garantizar directamente una salida dentro del rango operativo del motor.

Apéndice 4. Código de control en Arduino UNO

El programa de control fue desarrollado en el entorno Arduino IDE y cargado en la placa Arduino UNO. Al iniciar el sistema, el código ejecuta automáticamente la calibración y tara de la celda de carga, informando a través de la pantalla LCD que el proceso ha finalizado y que el sistema está listo para operar. A partir de ese momento, el funcionamiento se organiza en varios bloques que se describen a continuación.

Configuración del *setpoint*

En el estado inicial, el sistema solicita al usuario que establezca la tensión de laminado deseada con el *encoder* rotatorio. Al girar la perilla, el valor de tensión se incrementa o disminuye en pasos de 0,2 kg dentro de un rango de 0 a 4,5 kg, mostrándose en tiempo real en la pantalla LCD. Una vez alcanzado el valor deseado, el usuario presiona el botón del *encoder* para confirmar la selección. Internamente, el código multiplica el valor seteado por dos antes de asignarlo como *setpoint* del controlador, dado que la celda de carga registra el doble de la tensión real de la fibra, de acuerdo con la relación establecida en el análisis mecánico. Tras la confirmación, el sistema pasa al estado de *standby*.

Standby

En este estado, el sistema permanece a la espera de que el operador presione el botón de inicio. La pantalla LCD muestra la leyenda "*Stand By*" junto con la tensión registrada por la celda de carga en ese instante y las rpm en cero. El driver del motor se encuentra activado, pero sin orden de giro, lo que mantiene las bobinas del motor energizadas y el eje trabado, impidiendo que el rodillo alimentador gire libremente o pueda ser movido de forma manual. Esta condición evita que la fibra se desbobine de manera incontrolada antes de iniciar el proceso.

Laminando

Al presionar el botón de inicio, el sistema ingresa al estado de control activo. El código lee la tensión medida por la celda de carga, calcula el error respecto del *setpoint* y determina la velocidad del motor a través de la lógica de control. Como medida de seguridad, si la tensión leída es inferior a 0,3 kg el controlador no actúa, de esta forma se evita que el sistema responda ante lecturas erróneas. La pantalla LCD muestra la leyenda "Laminando" junto con la tensión en tiempo real y las rpm del motor. Cabe señalar que los valores de rpm mostrados en pantalla y registrados por puerto serie son

corregidos por un factor de escala respecto a los valores internos del código, debido a la configuración de micropasos y al esquema de conexión de las bobinas del motor paso a paso, cuyas características se detallan en el Apéndice 2.

La finalización del proceso depende del modo de operación de la máquina de *filament winding*. Cuando se opera con un código G cargado en la CNC, el proceso de laminado se ejecuta de forma continua a lo largo de todas las capas programadas y finaliza automáticamente al completarse la lectura del código. En el caso de que el mandril gire libremente sin un código G programado, la finalización del proceso se realiza de forma manual con el botón de pausa, que detiene el control y retorna el sistema al estado de *stand by*. En cualquiera de los dos modos, el operador puede interrumpir el proceso en cualquier momento presionando el botón de pausa.

Adquisición de datos

En paralelo al control, el código transmite por puerto serie los valores de tiempo (millis), tensión medida (*input*), salida del controlador (*output*), rpm del motor y *setpoint*. Dado que la placa Arduino UNO no dispone de capacidad de almacenamiento interno, se utilizó el software *RealTerm* para capturar esta transmisión serie en la PC y guardar los datos en un archivo de texto, el cual fue posteriormente procesado con el software *Matlab* para graficar y analizar la respuesta del sistema durante los ensayos.

Código de control

```
#include <MultiStepper.h>
#include <Rotary.h>
#define NOT_AN_INTERRUPT -1
#define ENCODER_OPTIMIZE_INTERRUPTS
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <HX711.h>
#include <PID_v1.h>
#include <MobaTools.h>

Rotary rotary = Rotary(11, 10);
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

const int stepsPerRev = 100*8; //micropasos de 1/8

MoToStepper stepper1( stepsPerRev, STEPDIR );
```

```

// Pines del HX711
const int DT = A1;
const int CLK = A0;
HX711 balanza;

// Pines del A4988
#define STEP_PIN 8
#define DIR_PIN 9
#define ENABLE_PIN 4

// Pines de micropasos
#define MS1 5
#define MS2 6
#define MS3 7

// Configuración PID
float Kp = 8.7;
float BIAS = 67;

double error;
    double dt;
    double error_acum;
    double d_error;
    double error_prev;
    int millisant;
    int milisact;

// Variables del PID
double setpoint;
double input;
double output;
double outputmin;
double outputmax;

// Pin del botones
const int botonInicio = 3;
const int botonPausa = 2;

//Pines Encoder Rotatorio
const int pinCLK = 10 ;
const int pinDT = 11;
const int pinSW = 12;

```

```

float tensionAux = 0.0 ;
bool tens= false ;
int estadoSistema = 3;

// Variable del sistema
float peso = 0.0;
float TensionStandBy = 0.0;
float tensionLaminado = 0.0;
unsigned long previousMillis = 0;
float velocidadMotor;
double rpm=0.0;
unsigned long currentMillis;

// _____ F U N C I O N E S _____

//FUNCIÓN BOTÓN PAUSA
void BotonPausa() {
    if (tens){
        estadoSistema = 0;
        digitalWrite(ENABLE_PIN, HIGH); // Desactiva el driver
    }
}

//FUNCIÓN BOTÓN INICIO
void BotonInicio() {
    if (tens){
        estadoSistema = 1;
        digitalWrite(ENABLE_PIN, LOW); // Activa el driver
    }
}

//MOSTRAR LCD
void mostrarEstadoLCD(const String& estado, double tension = -1, double
velocidadRPM = -1) {
    lcd.clear();

    // Línea 1: Estado
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(estado); // Mostrar el estado (por ejemplo "Stand By")
    // Línea 2: Tensión y RPM
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("T:");
    lcd.print(tension, 1); // Mostrar la tensión con 1 decimal
    lcd.print("Kg ");
    lcd.print("RPM:");

```

```

    lcd.print(velocidadRPM); // Mostrar la velocidad en RPM
}
// ENCODER ROTATORIO
void Encoder() {

    unsigned char result = rotary.process();
    if (result == DIR_CW ) {
        tensionAux= tensionAux + 0.2;
        if (tensionAux > 4.5) { // Reinicia a 0.0 si supera el límite
            tensionAux = 4.5;
        }
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Setear Tension");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print(tensionAux);
        lcd.setCursor(4,1);
        lcd.println(" Kg          ");
        Serial.print(tensionAux);
    }
    else if (result == DIR_CCW) {
        tensionAux= tensionAux - 0.2;
        if (tensionAux < 0.0) {
            tensionAux = 0.0;
        }
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Setear Tension");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print(tensionAux);
        lcd.setCursor(4,1);
        lcd.println(" Kg          ");
        Serial.print(tensionAux);
    }

    // Confirmar tensión de laminado al presionar el botón del encoder
    if (digitalRead(pinSW) == LOW) {
        delay(200); // Anti-rebote
        setpoint = tensionAux*2; // Se multiplica por dos ya que la celda de
        carga registra el doble de la tensión de la fibra.
        tens=true;

        Serial.print("Tension laminado:");
        Serial.print(tensionAux);
    }
}

```

```

    Serial.println("kg");
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Tension Laminado:");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(tensionAux);
    lcd.setCursor(4,1);
    lcd.println(" Kg      OK    ");
    delay(1000);
    estadoSistema = 0;
}
}

//STAND BY
void funcionStandBy () {
    TensionStandBy = abs( balanza.get_units(2));
    mostrarEstadoLCD("Stand By", TensionStandBy, 0);
    digitalWrite(ENABLE_PIN, LOW); // Activa el driver
    stepper1.setSpeed(0);
    stepper1.rotate(0);
}

//FUNCIÓN CONTROL
void funcionControl() {
    input = abs(balanza.get_units(2));
    if (input > 0.3) {

        error = setpoint - input;
        output = -Kp*error + BIAS;
        rpm = output;

        stepper1.setSpeed(rpm);
        stepper1.rotate(-1);

    } else {
        stepper1.setSpeed( 0 );
        stepper1.rotate(0);
    }

    mostrarEstadoLCD("Laminando", input/2, rpm/20);
    Serial.print(millis());
    Serial.print(",");
    Serial.print(input);
    Serial.print(",");
    Serial.print(output);

```

```

    Serial.print(",");
    Serial.print(-rpm/20);
    Serial.print(",");
    Serial.println(tensionAux*2); //muestra setpoint
}

//-----

void setup() {

    Serial.begin(9600);
    Serial.println("millis,input,output,rpm");

    stepper1.attach( STEP_PIN, DIR_PIN );
    stepper1.setRampLen(300); // Rampa de aceleración
    pinMode(2, INPUT_PULLUP);
    pinMode(3, INPUT_PULLUP);
    attachInterrupt(0, BotonPausa, RISING);
    attachInterrupt(1, BotonInicio, RISING);

    //Configuraciones de los pines del encoder rotatorio
    pinMode(pinCLK, INPUT);
    pinMode(pinDT, INPUT);
    pinMode(pinSW, INPUT_PULLUP);

    //Configuración pines para micropasos
    pinMode(MS1, OUTPUT);
    pinMode(MS2, OUTPUT);
    pinMode(MS3, OUTPUT);
    digitalWrite(MS1, HIGH);
    digitalWrite(MS2, HIGH);
    digitalWrite(MS3, LOW); // Configuración para 1/8 de paso
    balanza.begin(DT, CLK);
    lcd.init();
    lcd.backlight();

    // Desactiva inicialmente el driver
    pinMode(ENABLE_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(ENABLE_PIN, HIGH);

    //PANTALLA INICIO
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("    Iniciando    ");
    lcd.setCursor(0, 1);

```

```

    lcd.print(" Sistema ");
    long valorSinPeso = balanza.read();
    Serial.println(valorSinPeso);
    balanza.tare(20); //El peso actual es considerado tara(0 Kg)
    delay (2000);
    lcd.clear();
    //CALIBRACIÓN
    float pesoConocido = 2.085;
    long valorConPeso = balanza.read();
    float factorDeEscala = (valorConPeso - valorSinPeso )/ pesoConocido;
    balanza.set_scale(-151962);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Calibracion");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Lista");
    delay(1000);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Setear Tension:");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(tensionAux);
    lcd.setCursor(4,1);
    lcd.println(" Kg ");
}

// _____ PROGRAMA PRINCIPAL _____

void loop() {
switch (estadoSistema) {
    case 0:
        funcionStandBy();
        break;
    case 1:
        funcionControl();
        break;
    case 3:
        Encoder ();
        break;
}
}

```

Apéndice 5. *Resultados de ensayos experimentales*

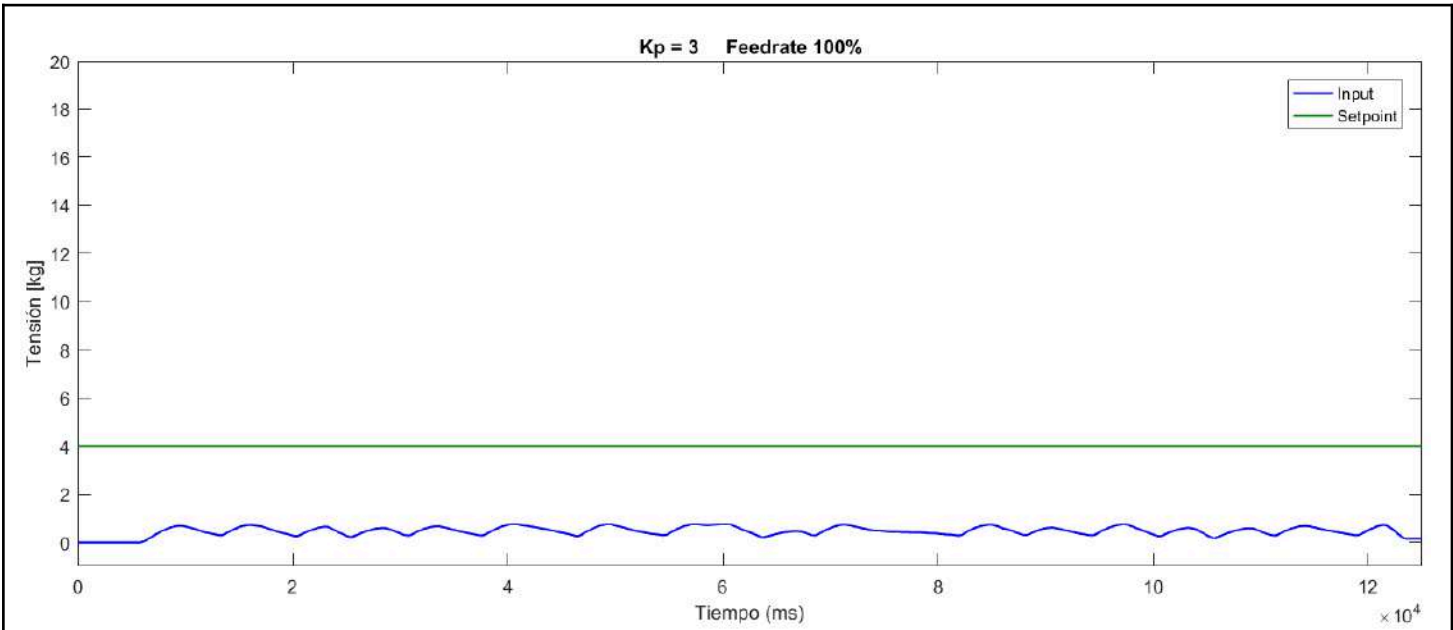


Figura 5A. *Ensayo Experimental E01*

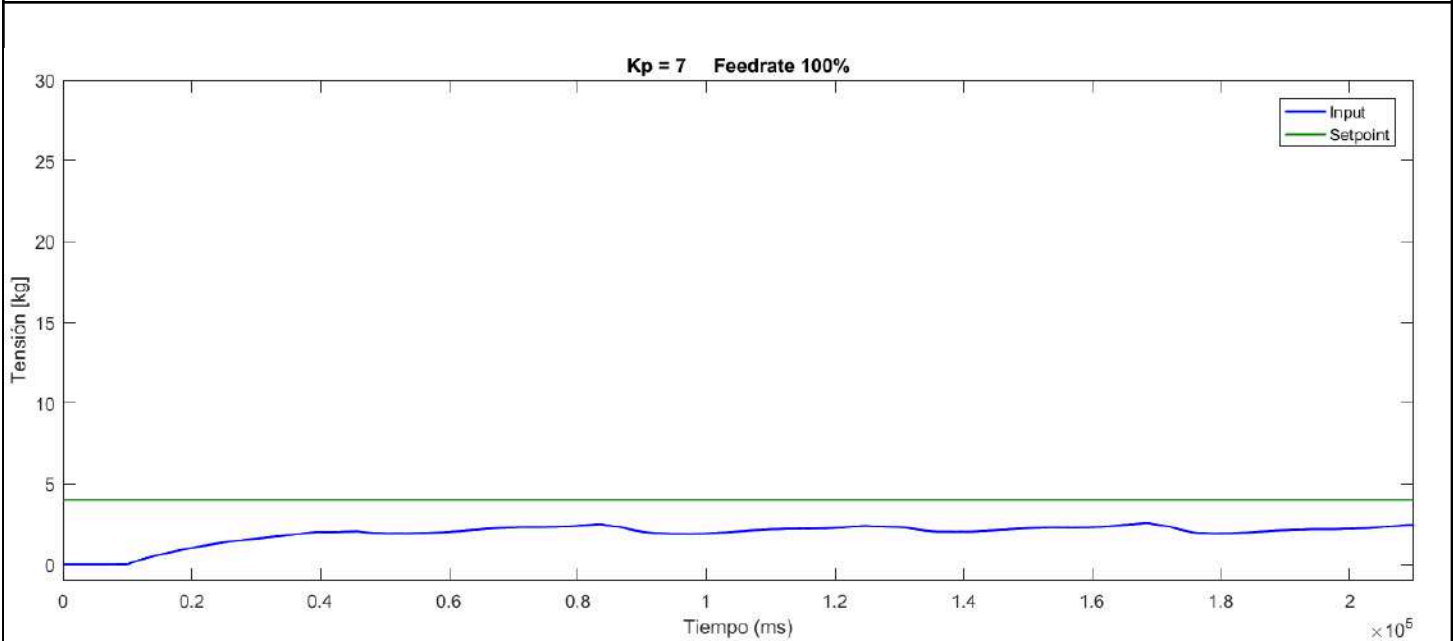


Figura 5B. *Ensayo Experimental E02*

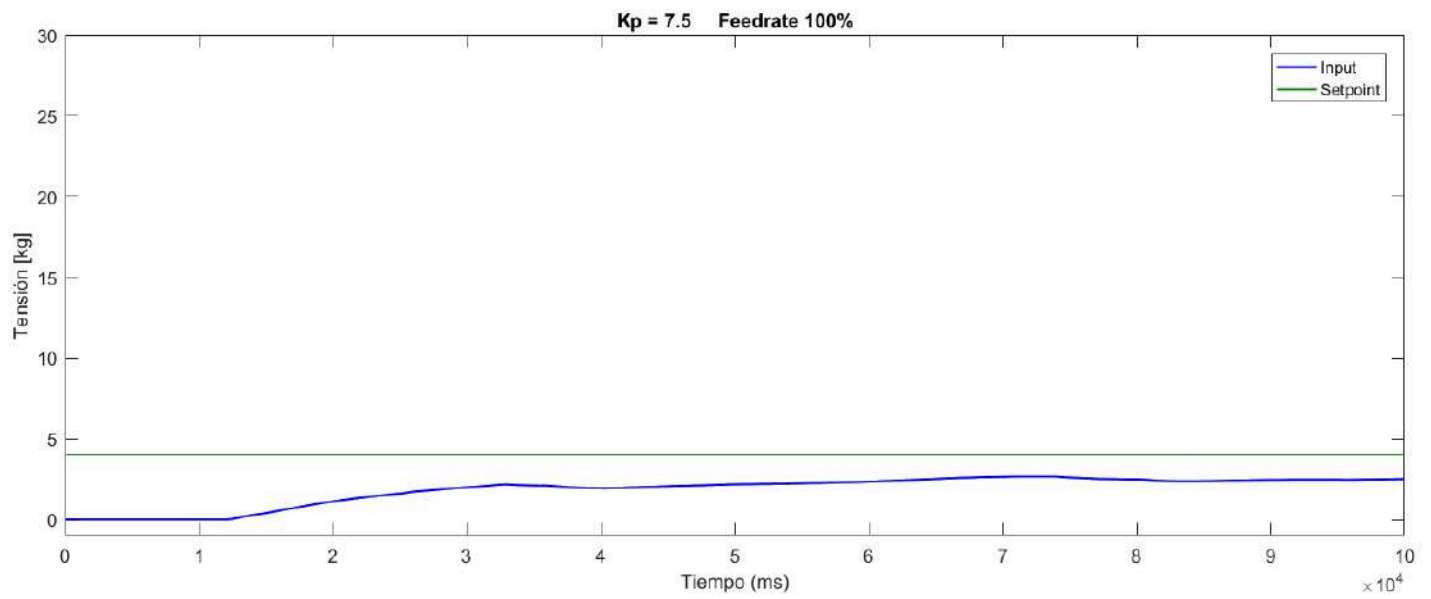


Figura 5C. Ensayo Experimental E03

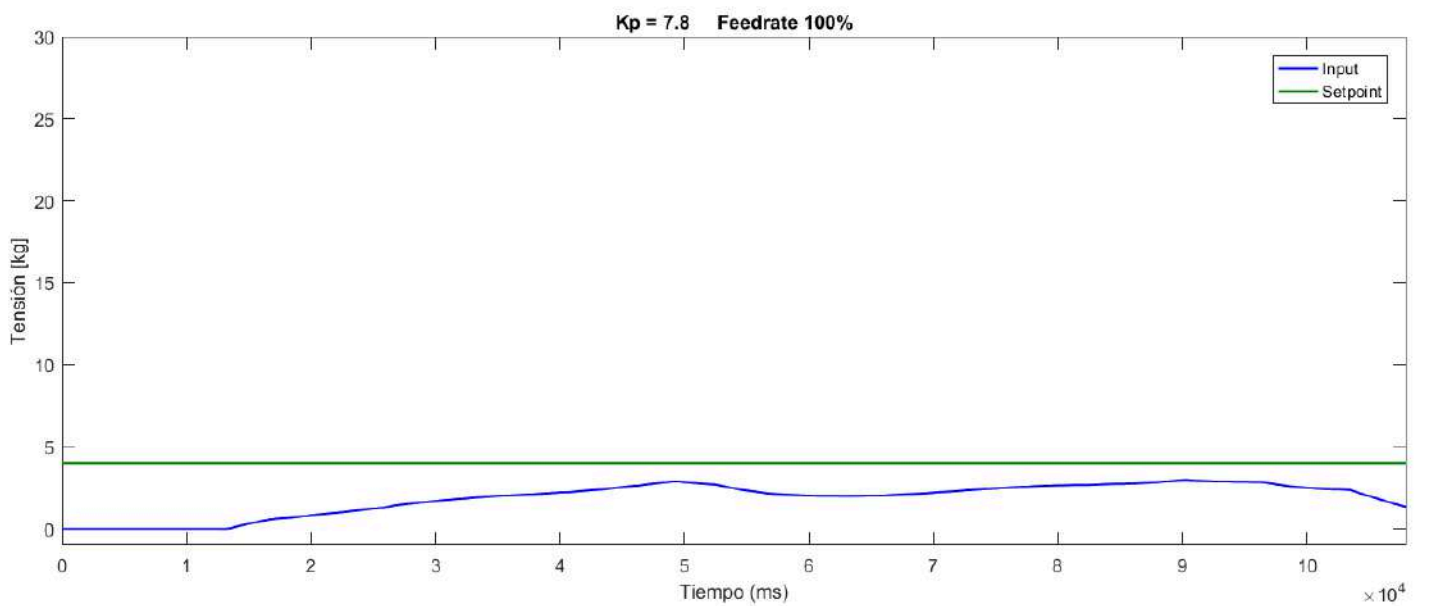


Figura 5D. Ensayo Experimental E04

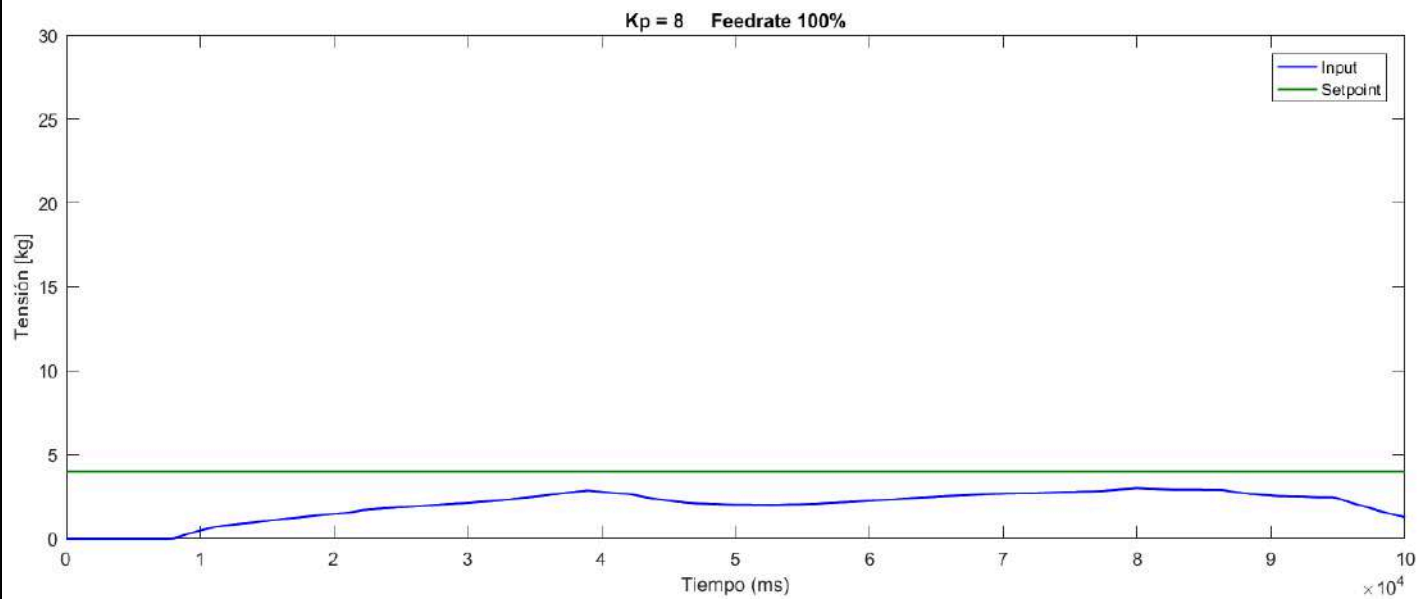


Figura 5E. Ensayo Experimental E05

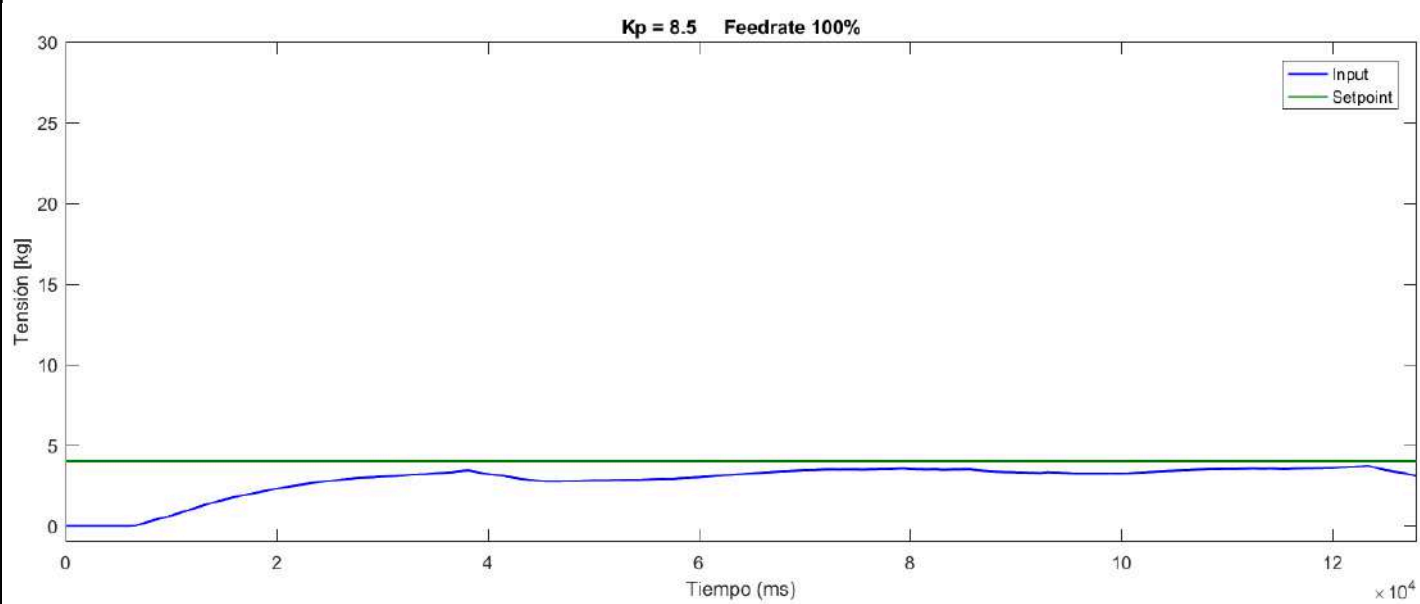


Figura 5F. Ensayo Experimental E06

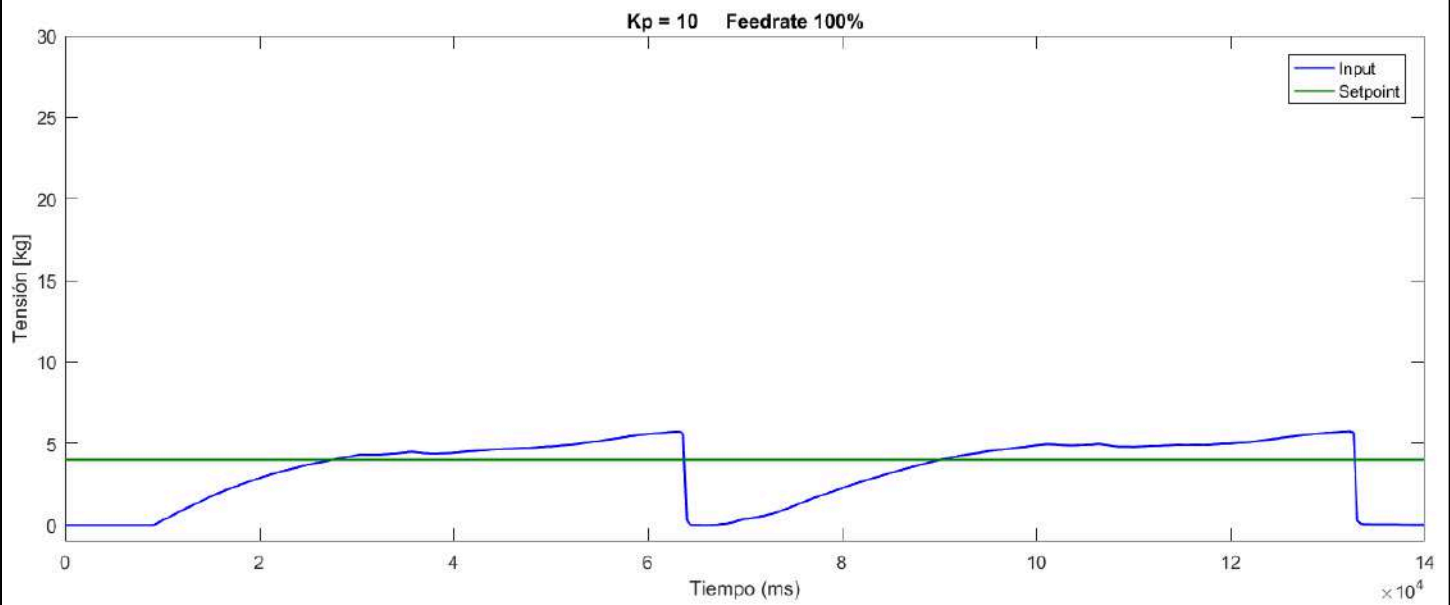


Figura 5G. Ensayo Experimental E07

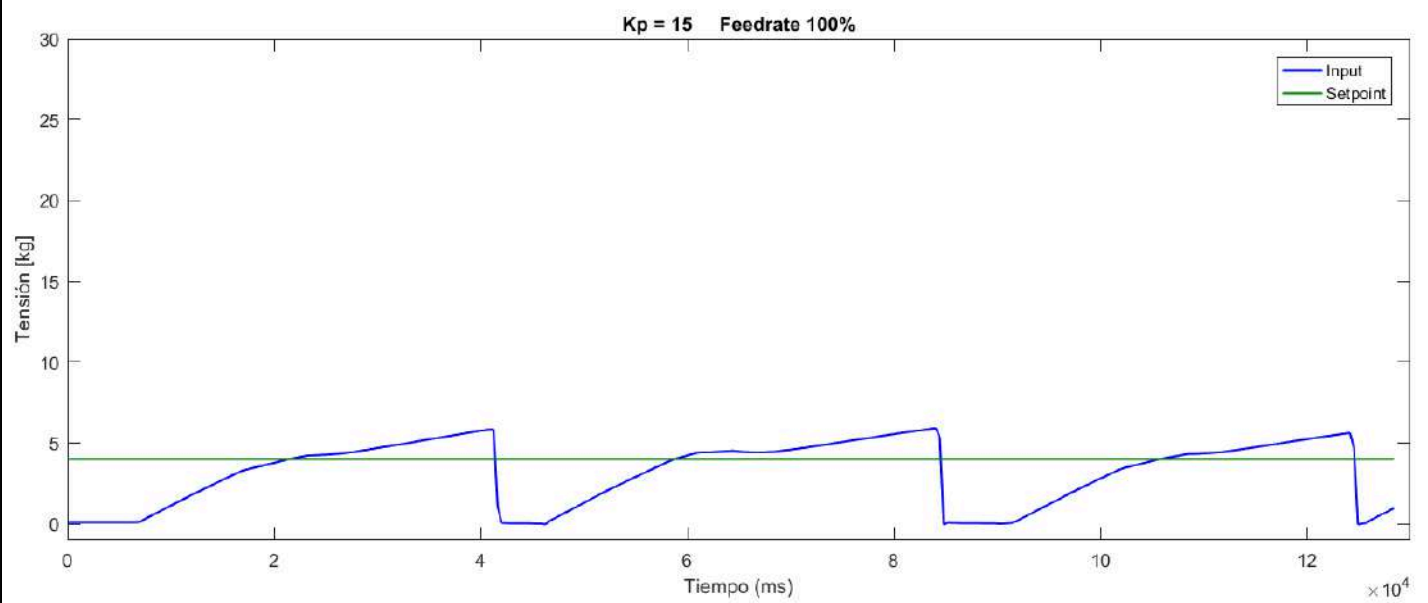


Figura 5H. Ensayo Experimental E08

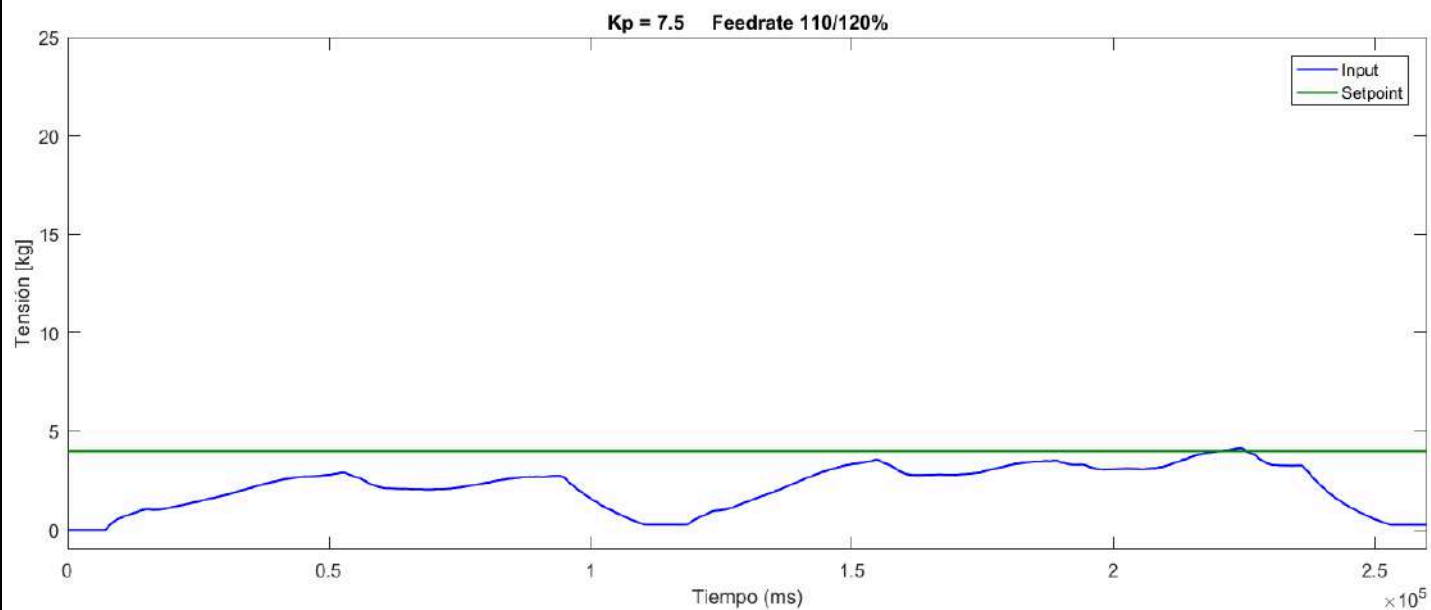


Figura 5I. Ensayo Experimental E09

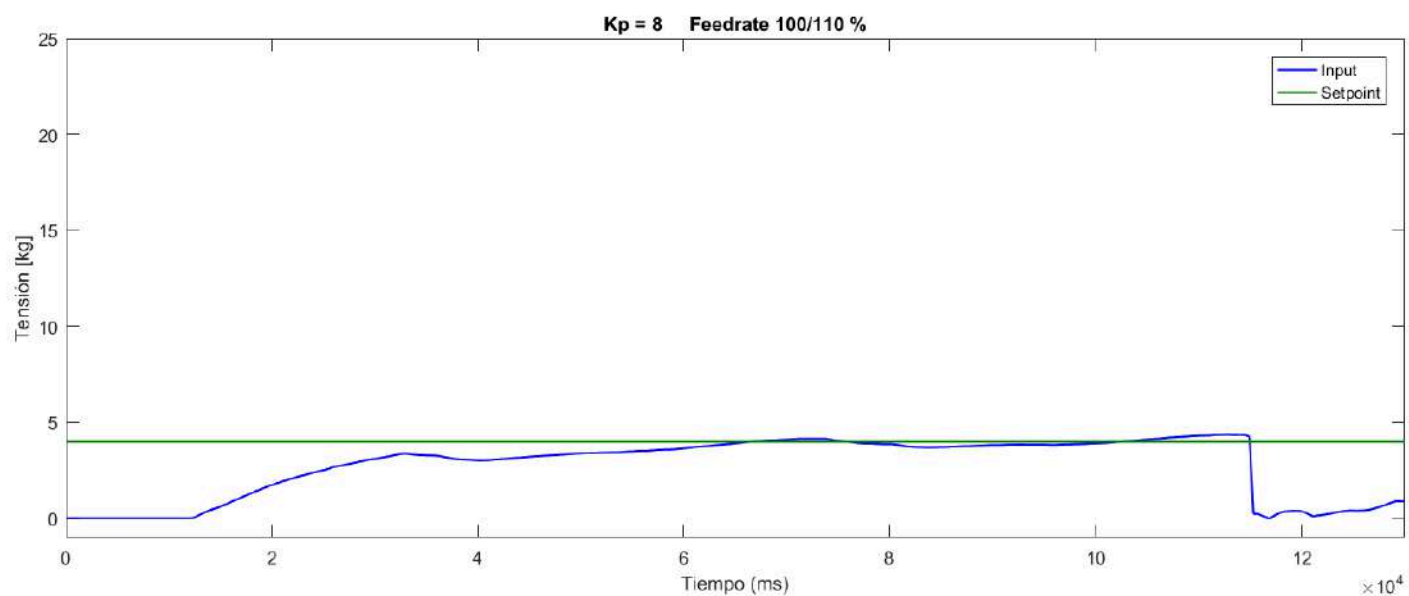


Figura 5J. Ensayo Experimental E10

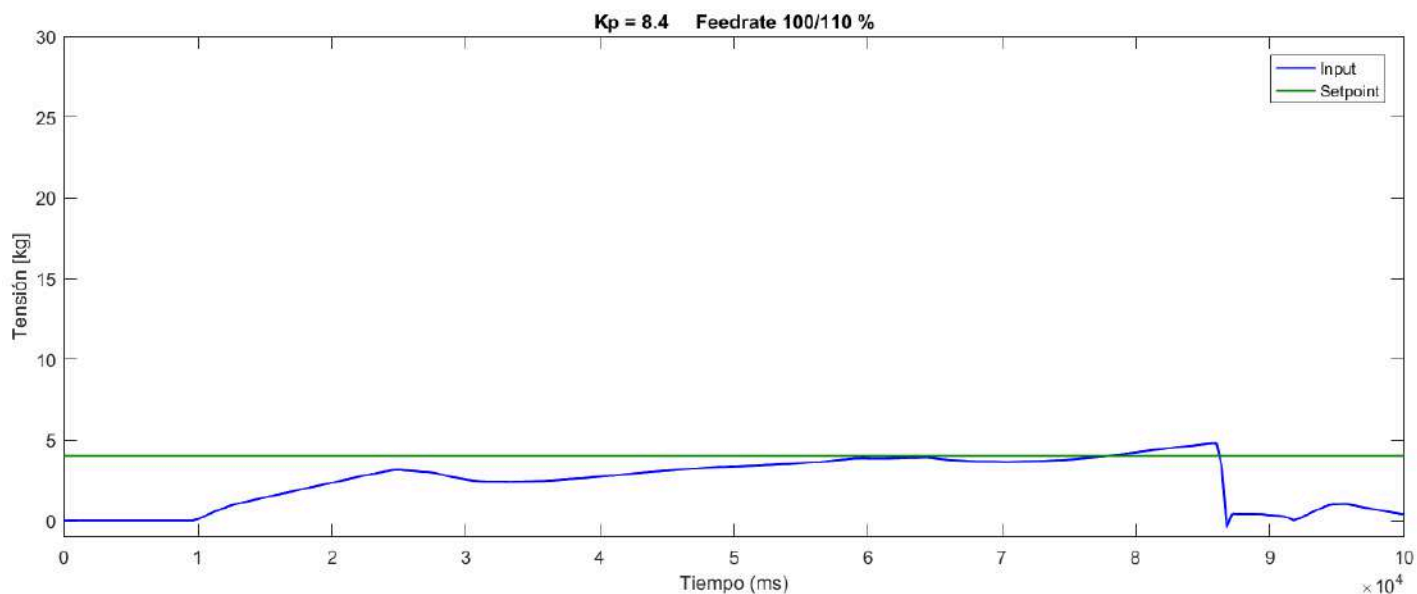


Figura 5K. Ensayo Experimental E11

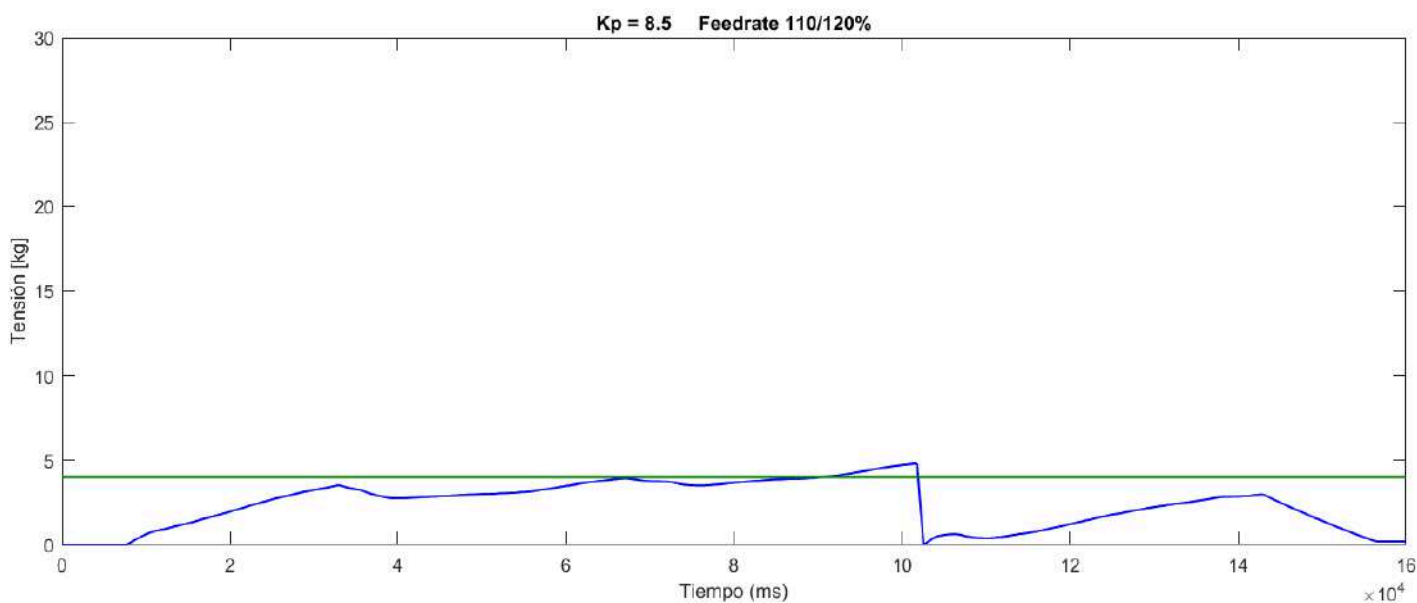


Figura 5L. Ensayo Experimental E12

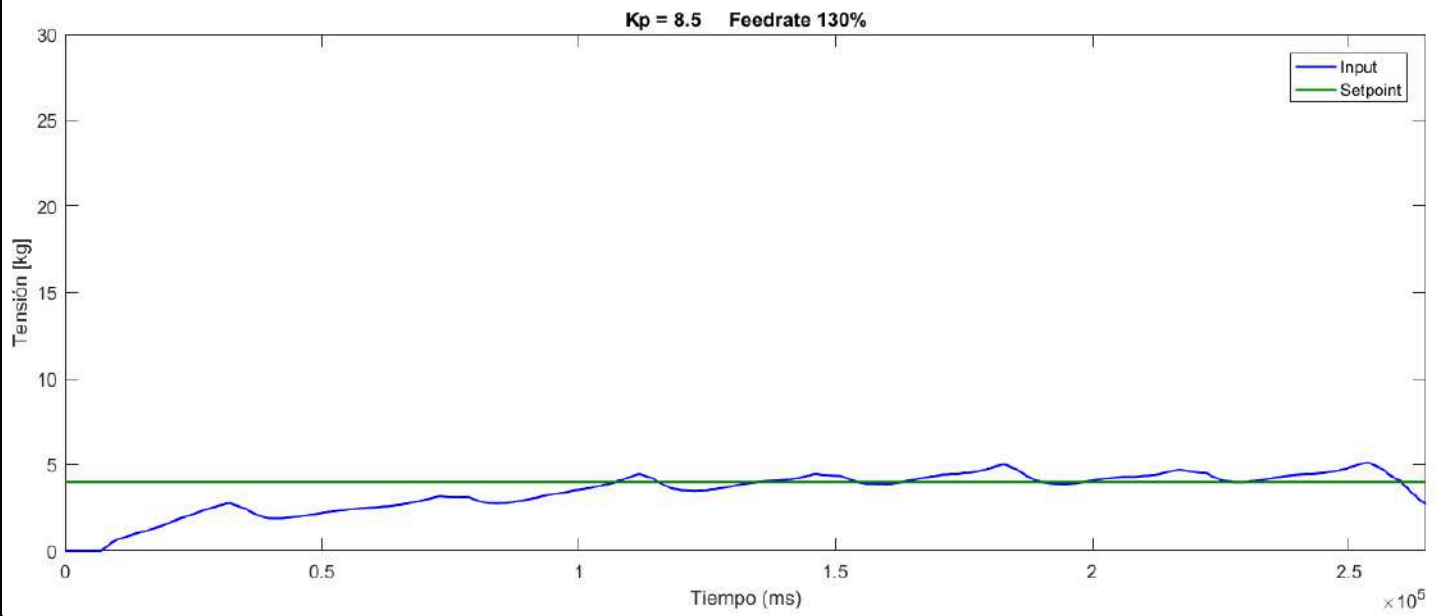


Figura 5M. Ensayo Experimental E13

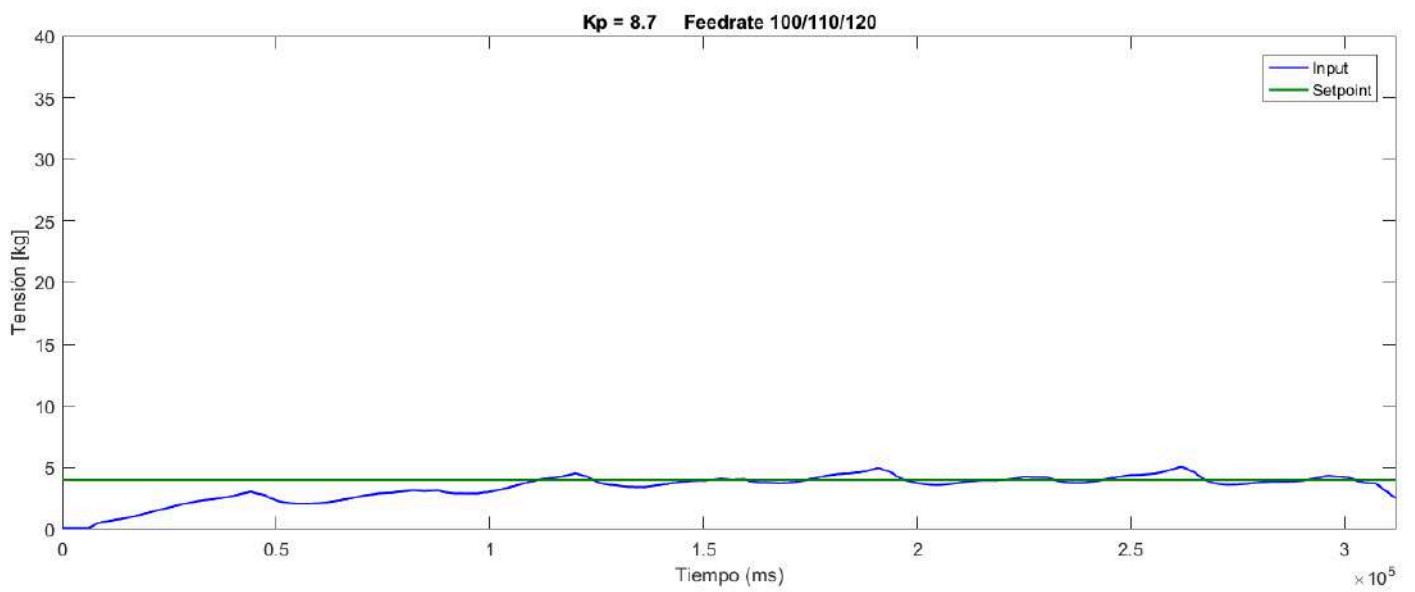
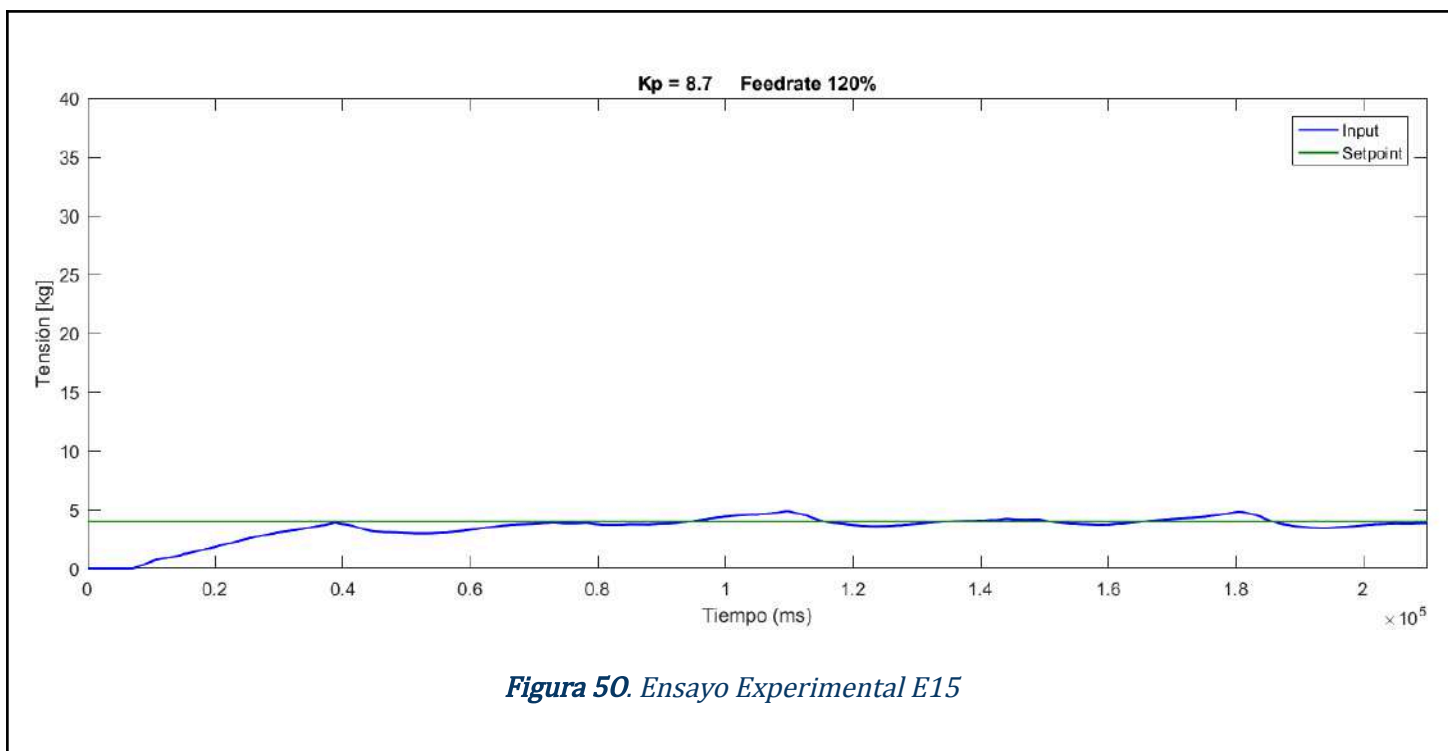


Figura 5N. Ensayo Experimental E14



Referencias

- [1] J. I. Linares Hurtado y B. Y. Moratilla Soria, *El hidrógeno y la Energía*, vol. 2. Madrid, España.: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, 2007.
- [2] M. M. Rampai, C. B. Mtshali, N. S. Seroka, y L. Khotseng, «Hydrogen production, storage, and transportation: recent advances», *RSC Adv.*, vol. 14, n.º 10, 2024, doi: 10.1039/D3RA08305E.
- [3] IEA, «The Future of Hydrogen», *Report prepared by the IEA for the G20, Japan*, jun. 2019.
- [4] O. Barrera *et al.*, «Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum», *J Mater Sci*, vol. 53, n.º 9, may 2018, doi: 10.1007/s10853-017-1978-5.
- [5] I. Feki *et al.*, «Composites in high-pressure hydrogen storage: A review of multiscale characterization and mechanical behavior», *Composites Part C: Open Access*, vol. 16, mar. 2025, doi: 10.1016/j.jcomc.2024.100555.
- [6] S. Camara, A. R. Bunsell, A. Thionnet, y D. H. Allen, «Determination of lifetime probabilities of carbon fibre composite plates and pressure vessels for hydrogen storage», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, n.º 10, may 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.12.069.
- [7] A. Elkelity, Y. Cao, M. El-Wazery, Y. Bai, y F. Wang, «Effect of Fiber Reinforcement Flexible Pipeline on Hydrogen Transportation—A Review», *Results in Engineering*, vol. 26, jun. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.105299.
- [8] D. Hull, *Materiales compuestos*. Barcelona: Reverté, 1987.
- [9] D.R. Askeland, P.P Fulay, y W.J Weight, *Ciencia e ingeniería de materiales*, 6.^a ed. Cengage Learning, 2012.
- [10] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*, 3. ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2008.
- [11] M. Davidson *et al.*, «Carbon Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites: Processing, Properties, and Applications», *Fibers*, vol. 14, n.º 3, feb. 2026, doi: 10.3390/fib14030029.

- [12] S. T. Peters, Ed., *Handbook of Composites*. Boston, MA: Springer US, 1998. doi: 10.1007/978-1-4615-6389-1.
- [13] «Filament Winding Machine Attachments | CNC Technics India». Accedido: 23 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://cnctechnics.com/attachments.html>
- [14] N. Akkuş, G. Genç, y Ç. Girgin, «Control of the pretension in filament winding process», *Acta Mechanica et Automatica*, 2008, Accedido: 3 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Control-of-the-pretension-in-filament-winding-Akku%C5%9F-Gen%C3%A7/32bc1b24748fd97a789c33eb4f5bf20eef4620a9>
- [15] G. F. Franklin, J. D. Powell, y A. Emami-Naeini, «Feedback Control of Dynamic Systems Eighth Edition Global Edition».
- [16] K. J. Åström, T. Hägglund, y K. J. Åström, *PID controllers*, 2nd ed. Research Triangle Park, N.C: International Society for Measurement and Control, 1995.
- [17] S. Dormido Bencomo y F. Morilla García, «Controladores PID, Fundamentos, sintonía y autosintonía», *Departamento de Informática y Automática, UNED*.
- [18] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 10.^a ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015.
- [19] R. 440-464 RS Components, «Hybrid Stepper Motors — Data Sheet». marzo de 1997. [En línea]. Disponible en: <https://es.rs-online.com/web/c/?searchTerm=RS+440+464>
- [20] J. G. Ziegler y N. B. Nichols, «Optimum Settings for Automatic Controllers», 1942.