

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**



**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE AJUSTE  
AUTOMÁTICO DE LAMINADORA DE  
PALANQUILLAS CONSIDERANDO EL EFECTO DEL  
DESGASTE GRADUAL DE RODILLOS**

**TESIS**

Para optar por el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

**AUTORES**

Adolfo Aarón Figueroa Bianchi 

Jacinto Xavier Arribasplata Celis 

**ASESOR**

Elvis Jara Alegria 

Lima - Perú

2023

## **DECLARACIÓN JURADA**

Yo, Mónica Cecilia Santa María Fuster identificada con DNI No 18226712 en mi condición de autoridad responsable de validar la autenticidad de los trabajos de investigación y tesis de la UNIVERSIDAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA, DECLARO BAJO JURAMENTO:

Que la tesis denominada “PROPUESTA DE UN SISTEMA DE AJUSTE AUTOMÁTICO DE LAMINADORA DE PALANQUILLAS CONSIDERANDO EL EFECTO DEL DESGASTE GRADUAL DE RODILLOS” ha sido elaborada por los señores Adolfo Aaron Figueroa Bianchi y Jacinto Xavier Arribasplata Celis, con la asesoría de Elvis Omar Jara Alegria, identificado con DNI 44008255, y que se presentan para obtener el título profesional de Ingeniero mecatrónico, ha sido sometida a los mecanismos de control y sanciones anti plagio previstos en la normativa interna de la universidad, encontrándose un porcentaje de similitud de 0%.

En fe de lo cual firmo la presente.



Dra. Mónica Santa María Fuster  
Directora de Investigación

En Barranco, el 19 de febrero 2024

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN</b> . . . . .	10
<b>ABSTRACT</b> . . . . .	11
<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
1.1 Descripción de la situación problemática . . . . .	12
1.2 Formulación del problema . . . . .	14
1.3 Objetivos de investigación . . . . .	14
1.4 Justificación . . . . .	14
1.5 Alcances y limitaciones / restricciones . . . . .	15
<b>CAPÍTULO II ANTECEDENTES</b>	<b>18</b>
2.1 Control del espesor de cintas mediante medición de la tensión . . . . .	18
2.2 Optimización de modelo matemático de desgaste de cilindros en tren de laminación . . . . .	20
2.3 Estimación teórica con Automatic Gauge Control (AGC) . . . . .	22
<b>CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO</b>	<b>23</b>
3.1 Laminado de acero en caliente . . . . .	23
3.1.1 Proceso de laminado en caliente . . . . .	23
3.1.2 Control del proceso de laminación . . . . .	24
3.1.3 Potencia requerida para la laminación . . . . .	25
3.2 Potencia necesaria para girar tornillos de potencia . . . . .	27
3.3 Dilatación térmica lineal . . . . .	29
3.4 Filtro de ventana rectangular . . . . .	30
3.5 Filtro de ponderado exponencial . . . . .	30

3.6 Filtro de Kalman . . . . .	30
--------------------------------	----

**CAPÍTULO IV MARCO METODOLÓGICO 34**

4.1 Modelado del proceso de laminación de palanquillas con desgaste de rodillos .	36
4.1.1 Suministro de palanquillas a la laminadora y desgaste de rodillos . .	36
4.1.2 Modelo matemático de la laminadora . . . . .	37
4.1.3 Sistema de control de la velocidad angular de los rodillos . . . . .	38
4.2 Diseño del algoritmo de control del espesor de palanquillas . . . . .	39
4.2.1 Estimación del espesor mediante el filtro de Kalman . . . . .	39
4.2.2 Sistema de control de la distancia entre rodillos . . . . .	44
4.3 Validación del control en simulación . . . . .	46
4.4 Diseño y fabricación de prototipo de laminadora para prueba de concepto . . .	47
4.4.1 Diseño conceptual . . . . .	48
4.4.2 Fabricación . . . . .	53
4.4.3 Pruebas experimentales del prototipo en laboratorio . . . . .	56
4.4.4 Integración del prototipo de laminadora . . . . .	58

**CAPÍTULO V RESULTADOS 59**

5.1 Resultados de la simulación de la laminadora . . . . .	59
5.1.1 Suministro al laminador y desgaste de rodillos . . . . .	59
5.1.2 Espesor final de palanquilla obtenido . . . . .	60
5.1.3 Potencia consumida y velocidad de laminado . . . . .	61
5.2 Resultados de la simulación del algoritmo de control . . . . .	64
5.2.1 Adición de ruido de medición . . . . .	64
5.2.2 Filtrado de ruido de medición . . . . .	64
5.2.3 Estimación teórica del espesor final con señales filtradas . . . . .	72
5.2.4 Fusión de data con filtro de Kalman . . . . .	74
5.2.5 Corrección del espesor final . . . . .	75
5.3 Desempeño ante el ruido . . . . .	76

5.4	Fabricación y desempeño del prototipo de laminadora . . . . .	78
5.4.1	Definición del concepto de solución óptima para la fabricación del prototipo . . . . .	78
5.4.2	Fabricación del prototipo de laminadora . . . . .	79
5.4.3	Medición de espesor de palanquillas . . . . .	81
5.4.4	Filtrado de medición de espesor de palanquillas . . . . .	83
5.4.5	Generación y funcionamiento del pulso habilitador de estimación . .	84
5.4.6	Error del espesor de las palanquillas . . . . .	85
5.4.7	Generación y funcionamiento de la ventana habilitadora de corrección	86
	<b>CONCLUSIONES . . . . .</b>	<b>88</b>
	<b>RECOMENDACIONES . . . . .</b>	<b>90</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>94</b>
	<b>ANEXOS . . . . .</b>	<b>95</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1	Comparación de materiales propuestos para ser laminados en prototipo. . . . .	49
Tabla 4.2	Requerimientos del prototipo de laminadora. . . . .	50
Tabla 5.1	Parámetros de filtros probados en señal de potencia consumida. . .	66
Tabla 5.2	Errores cuadráticos medios de señales filtradas en medición de potencia consumida. . . . .	66
Tabla 5.3	Parámetros de filtros probados en señal de velocidad angular. . . .	67
Tabla 5.4	Error cuadrático medio de señales filtradas en medición de velocidad angular. . . . .	68
Tabla 5.5	Parámetros de filtros probados en señal de espesor inicial. . . . .	69
Tabla 5.6	Error cuadrático medio de señales filtradas en medición de espesor inicial. . . . .	69
Tabla 5.7	Parámetros de filtros probados en la medición del espesor final. . . .	70
Tabla 5.8	Error cuadrático medio de señales filtradas en medición de espesor final. . . . .	71
Tabla 5.9	Parámetros de filtros probados en la estimación del espesor final. . .	73
Tabla 5.10	Error cuadrático medio de señales filtradas en estimación teórica de espesor final. . . . .	74
Tabla 5.11	Errores cuadráticos medios en relación a las varianzas de los ruidos de medición. . . . .	77
Tabla 5.12	Cantidad de adelantos y retrasos en correcciones. . . . .	77
Tabla 5.13	Componentes del concepto de solución óptimo para el diseño del prototipo. . . . .	79
Tabla 5.14	Parámetros de filtros probados en la medición real del espesor final.	84
Tabla 5.15	Comparación de métodos de medición considerados. . . . .	100
Tabla 5.16	Diámetros preferidos para roscas ACME [14]. . . . .	102

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Apertura de rodillos causada por desgaste, adaptado de [2]. . . . .	13
Figura 2.1	Esquema del sistema de medición de tensión entre stands [8]. . . . .	19
Figura 2.2	Sensor de espesor de cintas LAP Calix [9]. . . . .	20
Figura 2.3	Control adaptativo para la corrección del espesor [2]. . . . .	21
Figura 3.1	Esquema de funcionamiento del proceso de laminación. . . . .	23
Figura 3.2	Etapas del proceso de laminación en caliente, adaptado de [12]. . . . .	24
Figura 3.3	Fuerza distribuida. . . . .	26
Figura 3.4	Posición de la fuerza de reacción resultante. . . . .	26
Figura 3.5	Ángulo de rosca [14]. . . . .	28
Figura 3.6	Ángulo de avance [14]. . . . .	29
Figura 4.1	Flujo de trabajo metodológico para el diseño del sistema de control del espesor en el proceso de laminación. . . . .	35
Figura 4.2	Control de las RPM de los rodillos del laminador. . . . .	39
Figura 4.3	Diagrama de bloques del sistema de control. . . . .	39
Figura 4.4	Adición y filtrado de ruido a señales. . . . .	40
Figura 4.5	Curva típica potencia-espesor final. . . . .	42
Figura 4.6	Lógica de estimación del espesor final. . . . .	43
Figura 4.7	Sistema de actualización del setpoint del actuador. . . . .	44
Figura 4.8	Funcionamiento del bloque "Actualizar setpoint del actuador". . . . .	45
Figura 4.9	Control del actuador del algoritmo de control. . . . .	45
Figura 4.10	Generación de los pulsos $p_1$ y $p_2$ . . . . .	46
Figura 4.11	Descomposición del prototipo en sus funciones. . . . .	53
Figura 4.12	Matriz morfológica del prototipo de laminadora. . . . .	54
Figura 4.13	Husillo de bola de 50 cm de recorrido. . . . .	55
Figura 4.14	Transmisión y recepción de datos del algoritmo en Simulink. . . . .	56

Figura 4.15	Medición y filtrado del espesor. . . . .	57
Figura 4.16	Control de posición de los husillos del prototipo. . . . .	58
Figura 4.17	Algoritmo de control del espesor del prototipo. . . . .	58
Figura 5.1	Simulación del suministro de palanquillas al laminador. . . . .	60
Figura 5.2	Simulación de desgaste de rodillos del laminador. . . . .	60
Figura 5.3	Espesor final de palanquilla vs tiempo. . . . .	61
Figura 5.4	Controlador de velocidad angular de los rodillos del laminador. . .	62
Figura 5.5	Potencia consumida vs tiempo. . . . .	63
Figura 5.6	Velocidad angular de los rodillos vs tiempo . . . . .	63
Figura 5.7	Medición de la potencia consumida. . . . .	64
Figura 5.8	Medición de la velocidad angular de los rodillos. . . . .	65
Figura 5.9	Medición del espesor inicial de las palanquillas. . . . .	65
Figura 5.10	Medición del espesor final de las palanquillas. . . . .	65
Figura 5.11	Desempeño de filtros en medición de potencia consumida. . . . .	66
Figura 5.12	Error de filtros en medición de potencia consumida. . . . .	67
Figura 5.13	Desempeño de filtros en medición de velocidad angular. . . . .	68
Figura 5.14	Error de filtros en medición de velocidad angular. . . . .	68
Figura 5.15	Desempeño de filtros en medición de espesor inicial. . . . .	69
Figura 5.16	Error de filtros en medición de espesor inicial. . . . .	70
Figura 5.17	Desempeño de filtros en medición de espesor final. . . . .	71
Figura 5.18	Error de filtros en medición de espesor final. . . . .	71
Figura 5.19	Estimación teórica del espesor final. . . . .	72
Figura 5.20	Desempeño de filtros en estimación de espesor final. . . . .	73
Figura 5.21	Error de filtros en estimación de espesor final. . . . .	74
Figura 5.22	Fusión de data de espesor final con filtro de Kalman. . . . .	75
Figura 5.23	Error de la estimación óptima del espesor final. . . . .	75
Figura 5.24	Estimación óptima del espesor final en frío y umbral de corrección. .	76
Figura 5.25	Actualización del setpoint del actuador. . . . .	77

Figura 5.26	Modelo 3D del prototipo y componentes seleccionados. . . . .	80
Figura 5.27	Disposición de pines de los componentes del prototipo. . . . .	80
Figura 5.28	Prototipo funcional a escala de laminadora y palanquilla de espuma. . . . .	81
Figura 5.29	Medición del espesor final de la pieza de espuma. . . . .	82
Figura 5.30	Ruido de medición entregado por el sensor infrarrojo. . . . .	82
Figura 5.31	Histograma del ruido de medición entregado por el sensor infrarrojo. . . . .	83
Figura 5.32	Medición filtrada del espesor final de la pieza de espuma. . . . .	83
Figura 5.33	Pulso de habilitación de recolección de medición $p_1$ . . . . .	85
Figura 5.34	Muestras seleccionadas del filtrado del espesor final. . . . .	85
Figura 5.35	Error de espesor final. . . . .	86
Figura 5.36	Ventana de corrección de espesor final $p_2$ . . . . .	86
Figura 5.37	Posición angular de los husillos. . . . .	87
Figura 5.38	Esquema de implementación sensores ópticos. . . . .	96
Figura 5.39	Esquema de implementación sensores ultrasónicos. . . . .	96
Figura 5.40	Curva esfuerzo-deformación real típica [1]. . . . .	99
Figura 5.41	Modelo 3D del prototipo de laminadora. . . . .	103
Figura 5.42	Listado de componentes del prototipo. . . . .	104
Figura 5.43	Dimensiones del prototipo de laminadora diseñado. . . . .	104

# ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Selección de sensores y actuadores para implementación en laminadora industrial . . . . .	95
ANEXO 2: Roscas ACME . . . . .	102
ANEXO 3: Especificaciones del prototipo fabricado . . . . .	103

## RESUMEN

En la presente investigación se muestra el diseño de un sistema para el ajuste automático del espesor de palanquillas laminadas al rojo vivo, cuya medida tiende a aumentar debido al desgaste gradual de los rodillos de laminación. Actualmente, en la industria siderúrgica peruana este proceso de ajuste se realiza de forma manual y requiere de la extracción de un ejemplar de la línea de producción para verificar su espesor. Dicho acto implica una inevitable pausa en la producción y su manipulación inicial supone el riesgo de quemaduras graves en los operadores. Es por esto que se necesita un sistema que estime y corrija el espesor de las palanquillas de forma continua. Para ello se propone fusionar mediante el filtro de Kalman dos estimaciones del espesor, la primera por medición directa usando sensores de nivel y la segunda basada en el modelo de consumo de corriente del motor que mueve a los rodillos, el cual disminuye mientras los rodillos se desgastan. Con dicha información, se diseña un algoritmo que modifica automáticamente el setpoint del actuador encargado de ajustar la distancia entre los rodillos. Para validarlo, se simula el algoritmo considerando condiciones típicas de un sistema de laminación industrial. Esto involucra la presencia de ruido en los sensados realizados para obtener las estimaciones, por lo que se evalúa el desempeño de varios filtros, siendo el filtro de media móvil de ventana rectangular es el que entrega el filtrado con error cuadrático medio menor. Finalmente, se fabrica un prototipo básico y a escala reducida para validar el concepto del sistema de control y corrección diseñado, considerando únicamente la síntesis cinemática del sistema. A partir de las pruebas realizadas, el algoritmo realiza la corrección del espesor final al superar un umbral de error de 5mm hasta que este disminuya a menos de 1mm. Los resultados de simulación y la implementación del prototipo demuestran que esta propuesta es viable desde el punto de vista de la cinemática del sistema.

### **PALABRAS CLAVES:**

Laminación plana; desgaste de rodillos de laminación; control PD; estimación y corrección de error; filtrado de señales; filtro de Kalman; fusión de sensores.

# **ABSTRACT**

## **PROPOSAL OF A SELF-TUNNING SYSTEM FOR BILLET ROLLING MILL CONSIDERING THE EFFECT OF GRADUAL WEAR OF ROLLERS**

The present research seeks to design a system for the automatic adjustment of the thickness of hot rolled billets, whose measurement tends to increase due to the gradual wear of the rolling rolls. Currently, in the Peruvian steel industry this adjustment process is carried out manually and requires the extraction of a specimen from the production line to verify its thickness. This action involves an unavoidable production pause, and its initial handling poses a risk of severe burns to the operators. This is why a system that estimates and adjusts the thickness of the billets continuously is needed. To do this, it is proposed to fuse two thickness estimates using the Kalman filter, the first by direct measurement using level sensors and the second based on the current consumption model of the motor that moves the rollers, which decreases as the rollers wear out. With this information, an algorithm is designed that automatically modifies the setpoint of the actuator responsible for adjusting the distance between the rollers. To validate it, the algorithm is simulated considering typical conditions of an industrial rolling system, which involves the presence of noise in the sensing carried out to obtain the estimates. Thus, the performance of several filters is tested, with the rectangular window moving average filter being the one that provides the filtering with the lowest mean square error. Finally, a reduced-scale prototype is manufactured to validate the concept of the control and correction system, considering only the kinematic synthesis of the system. Based on the tests carried out, the algorithm corrects the billet thickness when it exceeds an error threshold of 5mm until it decreases to less than 1mm. The simulation results and the implementation of the prototype demonstrate that the proposal is viable from the point of view of the system kinematics.

### **KEYWORDS:**

Flat rolling; wear of rolls; PD control; error estimation and correction; signal filtering; Kalman filter; sensor fusion.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La creciente competitividad del sector siderúrgico ha generado que las empresas dedicadas a este rubro busquen cada vez mejores formas de optimizar sus procesos y mejorar la calidad de sus productos. Uno de los campos más importantes dentro de este sector es la fabricación de aceros laminados en caliente. Este proceso consiste en la reducción del espesor de palanquillas de acero a altas temperaturas, haciéndolas pasar a través de rodillos motorizados [1], los cuales deforman las palanquillas mediante la compresión y fricción ejercidas.

### 1.1 Descripción de la situación problemática

Un problema crítico y siempre presente al realizar este proceso es el desgaste de los rodillos a causa de la fricción entre cada rodillo y la pieza de trabajo. Como se muestra en la Figura 1.1, esta fricción produce que, conforme transcurra el tiempo, el diámetro de los rodillos disminuya progresivamente y la apertura entre estos se incremente. Como consecuencia, las piezas producidas tendrán un espesor mayor al deseado. Esto implica, además, que las piezas tengan más material de lo planificado, generando pérdidas económicas. Por tal razón, es necesario medir continuamente el espesor de las piezas producidas y ajustar la posición de los rodillos acercándolos frecuentemente, a fin de reducir el error respecto al espesor nominal de las piezas.

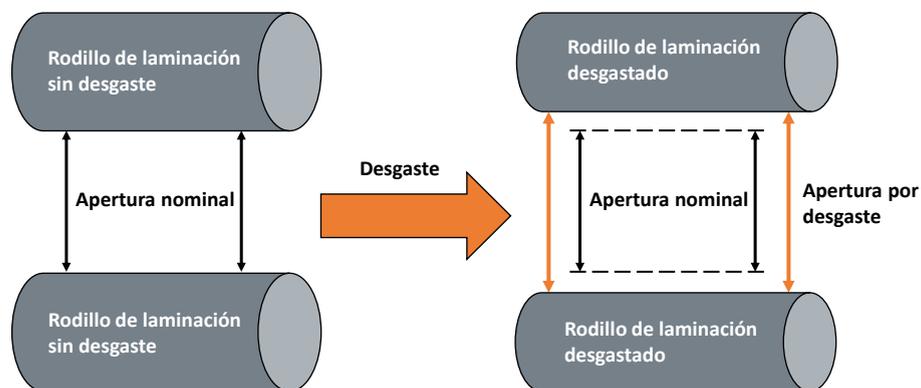


FIGURA 1.1: Apertura de rodillos causada por desgaste, adaptado de [2].

En el Perú, debido a limitaciones tecnológicas, en gran parte de la industria siderúrgica, el proceso de medición de palanquillas de acero laminadas continúa realizándose de manera tradicional, usualmente, empleando micrómetros manuales colocados en varios puntos de la palanquilla. De igual manera, la corrección del espesor también se realiza de forma manual mediante un volante que ajusta los husillos que gradúan la distancia entre los rodillos de la laminadora. Realizar los mencionados procesos de esta forma conlleva varios problemas. Por un lado, la medición manual está sujeta a errores debido a, principalmente, cambios en los operadores encargados de la medición o en los métodos empleados para tomar las muestras [3]. Por otro lado, es poco eficiente pues se genera la necesidad de esperar hasta que la palanquilla baje su temperatura para realizar la medición. Esto también implica una posterior pausa en la producción para realizar la corrección mediante el ajuste de la distancia entre los rodillos. Adicionalmente, si es que se mide el espesor sin esperar a que la palanquilla se enfríe, se tiene que considerar los efectos en el espesor causados por la contracción térmica; así como, los riesgos que implica este proceso para la salud de los operadores, quienes pueden sufrir quemaduras graves o inhalar gases perjudiciales durante la manipulación de las palanquillas a altas temperaturas [4].

## **1.2 Formulación del problema**

En base a lo mencionado surge la siguiente interrogante: ¿De qué forma se puede implementar un sistema de control automático capaz de detectar y corregir en tiempo real las fallas en el espesor de palanquillas causados por el desgaste de los rodillos de laminación?

## **1.3 Objetivos de investigación**

Objetivo general: Diseñar de un sistema mecatrónico para el ajuste automático en tiempo real de laminadoras de palanquillas, considerando el desgaste gradual de los rodillos de laminación.

Objetivos específicos:

- Modelar una laminadora para la simulación del proceso de laminación de palanquillas teniendo en cuenta el desgaste de sus rodillos.
- Diseñar un algoritmo de control retroalimentado del espesor de las palanquillas en el proceso de laminación.
- Validar la propuesta de control en simulación con el modelo de laminadora.
- Validar el concepto de ajuste automático de laminadora mediante la implementación de un prototipo de laboratorio.

## **1.4 Justificación**

Con el fin de abastecer las múltiples necesidades del mercado siderúrgico, los trenes de laminación en caliente son plantas diseñadas para elaborar muchos productos. Esta

necesidad implica un costo considerable por el tiempo que deben detenerse las operaciones para cambiar de formato [5]. En gran parte de la industria siderúrgica peruana, realizar el proceso de control de calidad de las palanquillas requiere realizar la medición del espesor y ajuste de la posición de los rodillos de forma manual. De esta manera, la importancia de la presente investigación radica en la necesidad de mejorar el proceso de laminado en caliente a través del control automático del espesor, reduciendo además los riesgos a los que se exponen los operadores por manipular materiales a altas temperaturas. Adicionalmente, el método tradicional puede presentar errores al momento de medir las palanquillas o ajustar los rodillos manualmente.

Por otro lado, un sistema automatizado suele ser más preciso para las tareas anteriormente mencionadas, garantizando que la calidad de los productos no se vea perjudicada debido a errores en sus dimensiones. No obstante, los costos de la implementación de sistemas de automatización y control del espesor comerciales, basados en la presión ejercida por los rodillos (AGC) y en sensores de rayos X, como el modelo OWT-1011-2 X-ray de la empresa Hebei Moran Technology Corp [6] continúan siendo muy elevados para la mayoría de las empresas del sector siderúrgico peruano principalmente porque se necesitarían decenas de estos equipos para una típica planta de laminadoras. Por tanto, esta necesidad motiva el diseño de una propuesta para el control del espesor que considere el desgaste de los rodillos y permita cumplir con los estándares en las dimensiones de los productos. De igual manera, es importante fabricar un prototipo a escala para realizar una primera etapa de validación en la implementación del concepto del algoritmo de control del espesor.

### **1.5 Alcances y limitaciones / restricciones**

En base a los objetivos planteados, el presente trabajo posee los siguientes alcances y limitaciones. En primer lugar, en el apartado del modelo matemático de la potencia necesaria para la laminación propuesto, no se consideran las fuerzas de rozamiento con

las paredes laterales de los rodillos a las que puede estar sometida una palanquilla en determinadas etapas del proceso, dependiendo de la geometría del rodillo que se use.

Dado que es necesario poder detectar el error en el espesor de las palanquillas y corregir la distancia entre los rodillos de la laminadora en tiempo real, se requiere que el algoritmo de control ejecute dicha corrección apenas sea posible, es decir, cuando no haya una palanquilla entre los rodillos.

Por otro lado, en el apartado de simulación, se asumió que el ruido de medición que se obtendría en el proceso de estimación del espesor final sería del tipo blanco gaussiano y no coloreado. Tampoco se consideraron perturbaciones del tipo escalón en dichas mediciones.

Adicionalmente, el algoritmo de control no se va a implementar en un controlador, sino en una computadora con el software Simulink y los datos serán transmitidos desde y hacia una tarjeta de Arduino, la cual se encargará únicamente de la lectura y escritura de los sensores y actuadores respectivamente.

Debido a la limitación de implementar el sistema de corrección diseñado en una laminadora industrial real, el presente proyecto abarca la fabricación de una laminadora básica a escala. Esta permitirá validar la corrección del espesor de palanquillas mediante el algoritmo de control propuesto. Dentro de las consideraciones tomadas para la fabricación del prototipo se establece que el proceso de validación se realiza a temperatura ambiente y no al rojo vivo como sucede en el proceso de laminación en caliente. Adicionalmente, para simular el comportamiento del acero laminado a altas temperaturas, se utiliza espuma de poliuretano rígido, denominada comúnmente como espuma floral, cuyas propiedades permiten que su deformación sea posible utilizando bajas fuerzas de compresión. Por otro lado, debido a que la información de las propiedades mecánicas de esta espuma no es abundante, no se implementará la estimación teórica por consumo de corriente que sí se realizará en la simulación del algoritmo de control en un sistema industrial. Además, debido a la falta de esta estimación teórica en la implementación del

algoritmo con el prototipo a escala, solo se tendrá una medición del espesor, por lo que no se usará el filtro de Kalman para obtener una estimación óptima del espesor de las palanquillas mediante la fusión de información. Por último, dado que no sería posible reproducir el desgaste de los rodillos metálicos en el prototipo a corto ni mediano plazo, se validará el algoritmo de control iniciando el sistema con un setpoint de espesor menor al espesor que se obtiene con la distancia a la que se ubican los rodillos del prototipo en ese momento. Posteriormente, se dejará que el algoritmo de control regule dicha distancia automáticamente para entregar el espesor final deseado, considerando un error tolerable del 2 %.

# CAPÍTULO II

## ANTECEDENTES

La literatura asociada a investigaciones que buscan resolver los problemas mencionados en la introducción es reducida, sin embargo, existen algunos antecedentes importantes. En el presente capítulo se muestra la literatura asociada al control de espesor de cintas, la optimización del modelo matemático del desgaste de cilindros de laminación, además de un método de estimación del espesor de las piezas de laminación llamado Automatic Gauge Control.

### 2.1 Control del espesor de cintas mediante medición de la tensión

Para lograr controlar el espesor de cintas laminadas, W. Hong usó el sistema de control de tensión de dichas cintas llamado *Looper Tension Measuring System*, el cual fue previamente implementado entre los espacios de los *stands* de laminación como se muestra en la Figura 2.1 [7].

Este sistema consiste en un rodillo que es empujado contra la cinta en medio de dos *stands* de laminación. Este rodillo está conectado a un brazo llamado *looper*, cuya posición es controlada por un motor eléctrico o, en otras ocasiones, por un actuador hidráulico. El propósito de la implementación de este control de tensión se debe a que la velocidad de entrada de la cinta en cada stand de laminación es inferior a su velocidad de salida, por lo que es necesario eliminar posibles holguras en la cinta entre *stands* de laminación.

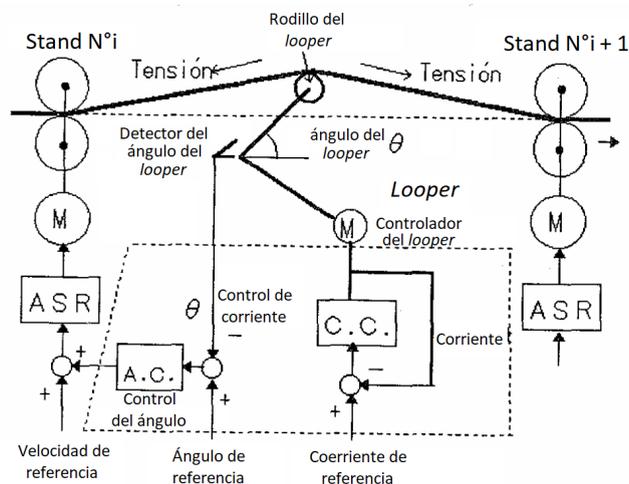


FIGURA 2.1: Esquema del sistema de medición de tensión entre stands [8].

Mediante el procesamiento de datos realizado por el algoritmo llamado “Looper Data Processing System” o LDPS se pudo obtener el espesor que fue entregado por cada stand en función de la tensión generada en la cinta. Dicho algoritmo fue elaborado teniendo en cuenta parámetros como la posición e inclinación del looper, las tensiones calculadas en la cinta laminada basadas en el torque ejercido por el motor del looper, las dimensiones de las bobinas formadas por la cinta al final de la producción, número de vueltas alcanzadas al formar la bobina con la cinta, etc. Con esta información de entrenamiento, el algoritmo logra establecer una relación entre la tensión de la cinta y su espesor.

No obstante, el algoritmo LDPS solo puede ser provisto de una retroalimentación cuando se realizan mediciones manualmente para verificar su desempeño. Por ende, no se trata de un método de control automático real y las estimaciones y correcciones realizadas por este modelo de regresión podrían, eventualmente, ser incorrectas.

Este método de estimación de espesor de cintas puede ser complementado con una medición real realizada directamente sobre la cinta al final del tren de laminación. Sin



FIGURA 2.2: Sensor de espesor de cintas LAP Calix [9].

embargo, para el caso de palanquillas al rojo vivo, no es posible hacer uso de estos dispositivos de medición entre *stands* de laminación dado que es necesario cumplir ciertos requisitos. Uno de ellos es que el material de la pieza de trabajo no debe estar a más de cierta temperatura, la cual suele estar muy por debajo de lo necesario para poder laminar en caliente. El modelo de la Figura 2.2 no es capaz de medir correctamente el espesor de cintas que se encuentren a más de 60°C [9]. Por otro lado, la pieza de trabajo no debe exceder un determinado espesor, el cual, una vez más, es muy inferior al espesor típico de una palanquilla. Para el modelo mostrado este espesor no debe superar los 30 mm [9].

## 2.2 Optimización de modelo matemático de desgaste de cilindros en tren de laminación

A partir de un modelo matemático de desgaste de cilindros en el tren continuo de laminación en caliente, previamente realizado por la empresa SIDOR y basado en el modelo de Archard, José Ibarra optimiza la corrección del espesor de salida ocasionado por el desgaste realizando ajustes al modelo y desarrollando un esquema adaptativo [2]. De esta manera, logra implementar un control en lazo abierto realizando el ajuste de los husillos o tornillos de potencia de la laminadora a partir del modelo de desgaste.

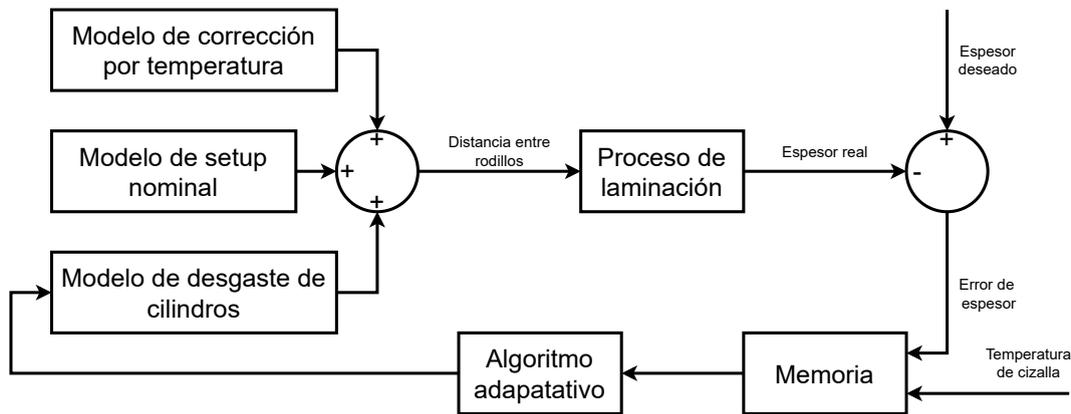


FIGURA 2.3: Control adaptativo para la corrección del espesor [2].

En primer lugar, el modelo original calcula el desgaste a partir de la posición y dimensiones del bastidor y los cilindros, así como el número de bobinas procesadas en el bastidor. Al analizar la ecuación del modelo, se observó que contiene un parámetro  $k$  asociado al tipo de acero a ser laminado. En el modelo original este parámetro fue determinado mediante una metodología práctica durante su implementación, sin embargo, su valor debe estar asociado a factores como la lubricación, rugosidad y temperatura de la combinación de los materiales del cilindro y el bastidor. Por tal motivo, la optimización realizada por Ibarra convierte el parámetro  $k$  en una función multivariable a partir de los factores antes mencionados. Adicionalmente, se logra optimizar la reducción del espesor en el proceso de laminado mediante la medición y análisis de los diferentes lotes de laminación, y la implementación de un algoritmo adaptativo (ver Figura 2.3) que retroalimenta el sistema de acuerdo al error del espesor de salida obtenido.

De esta manera, la implementación del ajuste del modelo de desgaste de cilindros de laminación realizada por Ibarra logra reducir las demoras ocasionadas por el ajuste manual de los rodillos, así como, disminuir ligeramente el error en el espesor de las láminas procesadas. No obstante, la implementación de este modelo presenta un problema al no realizar la medición de las bandas de laminación de manera continua, por lo cual la

ganancia del algoritmo adaptativo no puede ser optimizada continuamente. Además, el intervalo de muestreo no es periódico debido a que los lotes procesados pueden variar en cantidad, lo cual impide que el tiempo de muestreo para dos líneas sucesivas sea el mismo y no se pueda ajustar la desviación del error en el espesor.

### **2.3 Estimación teórica con Automatic Gauge Control (AGC)**

En 1974, R. Fox elaboró un método de estimación teórica del espesor entregado por los stands de laminación [10]. Este método estima el error del espesor de la pieza de trabajo relacionándola con la velocidad con la que esta sale del stand y corrige la distancia entre los rodillos mediante un ajuste previamente determinado para cada stand. Sin embargo, es posible que este ajuste predeterminado pueda presentar fallas conforme pase el tiempo, dado que el sistema de la laminadora, al igual que muchos otros sistemas electromecánicos, sufrirá descalibraciones eventualmente.

En base a lo analizado en el estado de arte, se observa que los principales métodos utilizados para el control del espesor en laminación de palanquillas no realizan una retroalimentación con una medición directa en tiempo real del espesor final. En algunos casos, las mediciones realizadas para el control de calidad se realizan una vez se concluye la laminación de un lote de palanquillas y los resultados son almacenados para su posterior análisis e incorporación en el algoritmo de corrección o en el modelo de estimación empleado. Por consiguiente, se requiere un método basado en un control de lazo cerrado, que deba ser capaz de transmitir en tiempo real la medición de las palanquillas a la salida de la banda de laminación. Asimismo, la corrección de la distancia entre los rodillos debe ser efectiva para la próxima palanquilla a laminar. De este modo, en los capítulos siguientes se busca desarrollar y validar una propuesta de control que posea estas características.

# CAPÍTULO III

## MARCO TEÓRICO

### 3.1 Laminado de acero en caliente

El laminado en caliente es uno de los procesos más desarrollados en la industria de la manufactura del metal. Como se puede observar en la Figura 3.1, consiste en la inserción de una pieza de trabajo entre varios pares de rodillos con el fin de utilizar su fuerza compresiva para moldear y reducir el espesor del material. De esta forma, se aprovecha su capacidad de deformación, la cual se incrementa cuanto más elevada sea su temperatura. Para el acero, esta temperatura oscila entre 800 °C y 1250 °C [11].

#### 3.1.1 Proceso de laminado en caliente

El proceso de laminación en caliente se puede dividir en cuatro etapas o zonas: el horno de recalentamiento, el tren de desbaste, el tren de acabado y la zona de enfriamiento [12]. El horno de recalentamiento permite mantener la temperatura del material. El tren de desbaste es el primer conjunto de rodillos que se utilizan para disminuir el espesor del acero. Luego, los rodillos del tren de acabado continúan reduciendo el espesor hasta

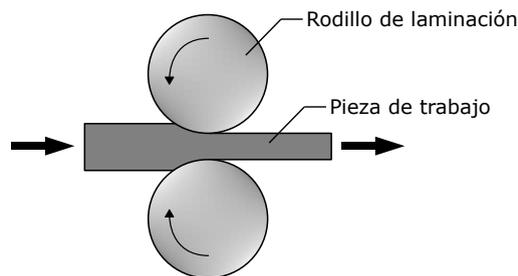


FIGURA 3.1: Esquema de funcionamiento del proceso de laminación.

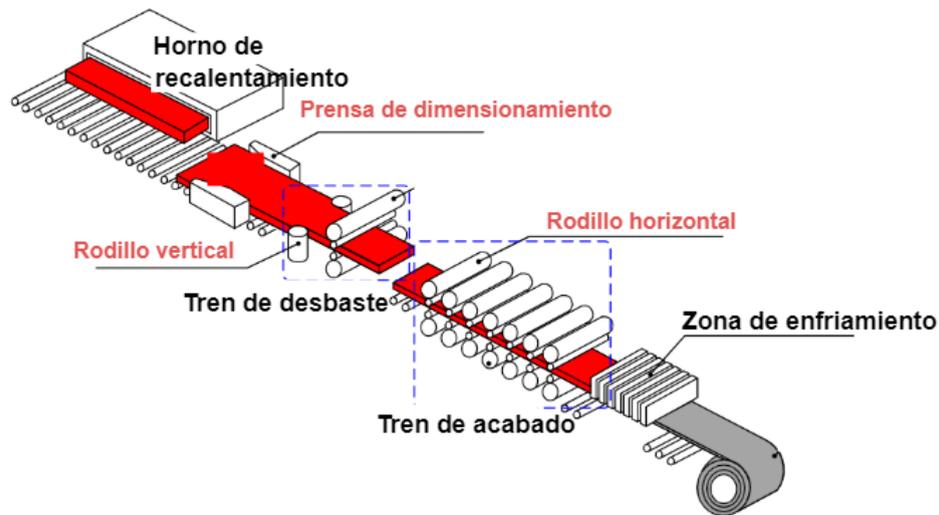


FIGURA 3.2: Etapas del proceso de laminación en caliente, adaptado de [12].

el perfil requerido. En esta etapa el control de la temperatura es muy importante para no afectar las propiedades mecánicas del acero. Finalmente, luego del proceso de recuperación estática debido a la deformación, el producto pasa a la zona de enfriamiento. La Figura 3.2 muestra el proceso de laminado en caliente.

### 3.1.2 Control del proceso de laminación

Dada la complejidad del proceso, en sus múltiples etapas los trenes de rodillos cuentan con distintos sensores y equipos para mantener la calidad de los productos y la seguridad en el proceso. Con respecto a los rodillos de laminación, se controlan las fuerzas ejercidas, la velocidad de los cilindros y su posición durante la operación. Asimismo, también es necesario tener controlada la temperatura de laminado, lubricación y las dimensiones de la banda conforme al tipo de producto requerido. Para esto existen distintas técnicas de medición. En el caso de la temperatura, se utilizan termopares o pirómetros; mientras que, para medir las dimensiones de la pieza de trabajo se utilizan sensores de tipo óptico y rayos X, entre otros [11], además de métodos de cálculo y estimación a partir de modelos matemáticos.

### 3.1.3 Potencia requerida para la laminación

La fuerza que se requiere para que los rodillos puedan deformar la pieza de trabajo  $F$  es equivalente al área de contacto que hay entre el rodillo y la pieza  $A$  multiplicada por la presión o esfuerzo necesario para la deformación  $\sigma$  [1] y por un factor de multiplicación de la presión que depende de las propiedades geométricas de la sección transversal de la pieza de trabajo  $Q_i$  [13].

$$F = Q_i A \sigma \quad (3.1)$$

Este esfuerzo varía desde su valor más bajo al inicio del arco de contacto, donde la deformación es nula, hasta su valor más alto donde ocurre la máxima deformación. Para simplificar el modelo, se tomará un promedio de ambos esfuerzos al calcular la fuerza necesaria:

$$\sigma_{\text{prom}} = \frac{\sigma_o + \sigma_f}{2} \quad (3.2)$$

donde  $\sigma_o$  y  $\sigma_f$  son los esfuerzos sufridos por la pieza de trabajo en deformación nula y máxima.

Si se reemplaza el factor del área por el ancho de la pieza  $w$  y la longitud del arco de contacto  $L$ , se obtiene la siguiente relación:

$$F = Q_i L w \sigma_{\text{prom}} \quad (3.3)$$

Cabe mencionar que la presión ejercida por los rodillos no se da uniformemente dado que la superficie de estos no es plana sino curva, por lo que se supondrá que el ángulo de contacto es muy pequeño para reducir lo más posible las variaciones en la dirección

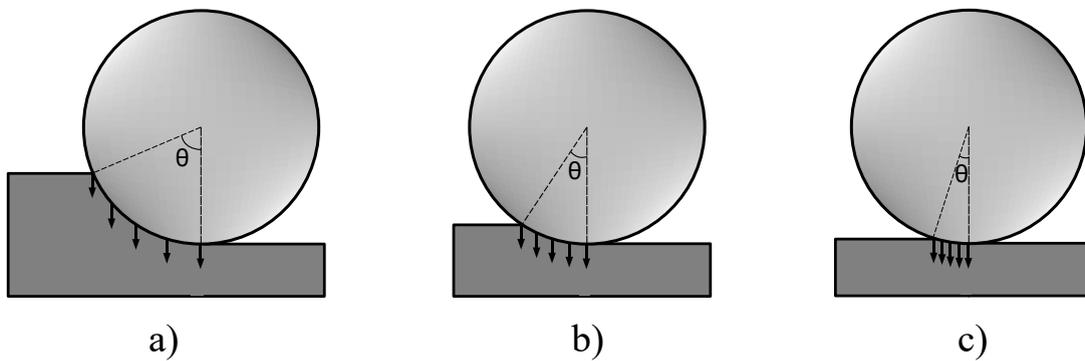


FIGURA 3.3: Fuerza distribuida.

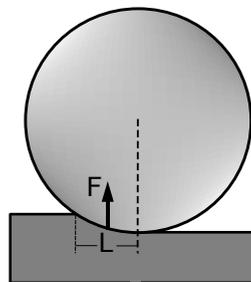


FIGURA 3.4: Posición de la fuerza de reacción resultante.

de la presión a lo largo de la superficie de contacto. Como se puede observar en la Figura 3.3, la superficie de contacto se hace cada vez más plana y, por consiguiente, la posición de la fuerza resultante se ubica cada vez más al centro del arco de contacto.

La fuerza de reacción que ejerce la pieza de trabajo sobre los rodillos actuará, idealmente, a la mitad del arco de contacto, como lo muestra la Figura 3.4.

Por lo tanto, el torque de laminación  $T$  necesario para un rodillo se calcula con (3.4).

$$T = F \frac{L}{2} \tag{3.4}$$

Una vez se conoce el torque necesario, se propone (3.5) para calcular la potencia  $P$  necesaria para ambos rodillos con la velocidad angular  $\omega$ :

$$P = (T + T_r)\omega \quad (3.5)$$

donde  $T_r$  es el torque necesario para vencer el rozamiento de los cojinetes en los que se apoyan los rodillos. Asimismo, es posible expresar el ángulo de contacto  $\theta$  en función del radio de los rodillos  $R$  y de los espesores inicial  $h_i$  y final  $h_f$ :

$$\theta = \arccos \left( \frac{R - \frac{h_i - h_f}{2}}{R} \right) \quad (3.6)$$

Al obtener el ángulo de contacto, se calcula la longitud del arco de contacto  $L$ :

$$L = R \arccos \left( 1 - \frac{h_i - h_f}{2R} \right) \quad (3.7)$$

Con expresiones anteriormente mostradas, se puede expandir la ecuación de la potencia necesaria para ambos rodillos de la siguiente manera:

$$P = \left( R \arccos \left( 1 - \frac{h_i - h_f}{2R} \right) \right)^2 Q_i w \omega \sigma_{\text{prom}} + T_r \omega \quad (3.8)$$

### 3.2 Potencia necesaria para girar tornillos de potencia

La potencia necesaria para un husillo o tornillo de potencia está en función al torque necesario y la velocidad angular a la que se mueva.

$$P = T\omega \quad (3.9)$$

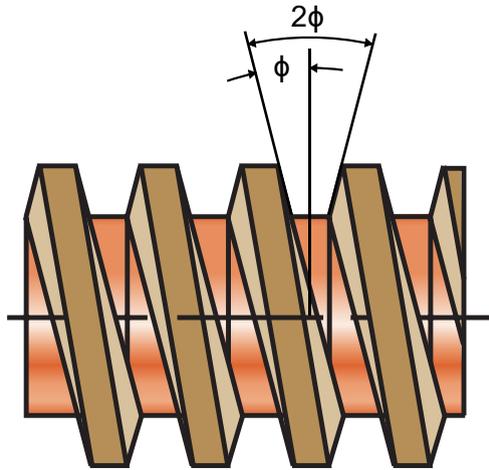


FIGURA 3.5: Ángulo de rosca [14].

El torque necesario dependerá de si la fuerza que el tornillo necesita ejercer se produce en la dirección en la que este se enrosca  $T_d$  o en la dirección contraria  $T_u$  [14]:

$$T_u = \frac{FD_p}{2} \left( \frac{f + \cos \phi \tan \lambda}{\cos \phi - f \tan \lambda} \right) \quad (3.10)$$

$$T_d = \frac{FD_p}{2} \left( \frac{f - \cos \phi \tan \lambda}{\cos \phi + f \tan \lambda} \right) \quad (3.11)$$

donde  $F$  es la fuerza que necesita soportar el husillo,  $D_p$  es el diámetro de paso del husillo,  $f$  es el coeficiente de fricción entre el husillo y su tuerca,  $\phi$  es el ángulo de rosca y  $\lambda$  es el ángulo de avance. Dichos ángulos son representados gráficamente en las Figuras 3.5 y 3.6 respectivamente.

El ángulo de avance puede ser calculado en función del avance del tornillo o paso  $L_a$  y el diámetro de paso  $D_p$ .

$$\tan \lambda = \frac{L_a}{\pi D_p} \quad (3.12)$$

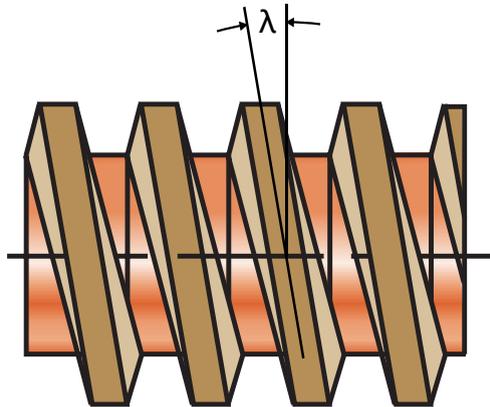


FIGURA 3.6: Ángulo de avance [14].

### 3.3 Dilatación térmica lineal

Se le llama dilatación térmica lineal al aumento de longitud que sufre un cuerpo debido al aumento de temperatura [15]. Dado que el espesor nominal de palanquillas que se desea alcanzar corresponde a cuando esta se encuentra a temperatura ambiente, es necesario obtener una estimación de la dilatación que se produce al estar la palanquilla al rojo vivo. Dicha dilatación es descrita por (3.13):

$$L_{\text{caliente}} = L_{\text{frío}}(1 + \gamma|\Delta T|) \quad (3.13)$$

donde  $L_{\text{caliente}}$  y  $L_{\text{frío}}$  son las longitudes del cuerpo en sus estados caliente y frío respectivamente,  $\gamma$  es el coeficiente de dilatación térmica lineal del material del que está hecho el cuerpo y  $|\Delta T|$  es el valor absoluto de la diferencia de temperaturas entre ambos estados del cuerpo.

### 3.4 Filtro de ventana rectangular

Un filtro de promedio móvil de ventana rectangular es un filtro que toma la media de las últimas muestras de una señal [16] [17] [18]. El nivel de filtrado depende de la cantidad de muestras que se toman para calcular la media.

$$y(n) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x(n-k) \quad (3.14)$$

donde  $y(n)$  es la señal filtrada,  $x(n)$  es la señal sin filtrar y  $M$  es la cantidad de muestras consideradas, también conocida como tamaño de la ventana del filtro.

### 3.5 Filtro de ponderado exponencial

Un filtro de media móvil con ponderado exponencial es un filtro que, en su forma recursiva, toma el promedio ponderado de la última muestra de una señal y la última muestra entregada por el filtro [16] [17] [18].

$$y(n) = \beta y(n-1) + (1-\beta)x(n) \quad (3.15)$$

El factor de olvido  $\beta$  representa el peso que se le da a la última muestra entregada por el filtro en relación a la última muestra de la señal sin filtrar.

### 3.6 Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo que permite obtener una estimación óptima de un estado a partir de una o más mediciones con ruido gaussiano sin la necesidad de

una elevada capacidad computacional ni de memoria haciendo uso de las propiedades estadísticas del ruido [16] [17] [19] [20] [21].

Para el caso en el que hay 2 estimaciones primarias, dicha estimación óptima  $e$  es el promedio ponderado de las estimaciones primarias  $e_1$  y  $e_2$ . Los pesos con los que se promediará cada estimación dependerá de cuan confiables sean dichas estimaciones. Las confiabilidades de cada estimación pueden ser cuantificadas con una variable llamada precisión  $v_1$  y  $v_2$ .

$$e = \frac{v_1 e_1 + v_2 e_2}{v_1 + v_2} \quad (3.16)$$

Dichas precisiones, a su vez, son equivalentes a las inversas de las varianzas  $\sigma_1^2$  y  $\sigma_2^2$  de estas estimaciones. Si se reemplaza las precisiones con las varianzas de cada estimación se obtiene (3.17).

$$e = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} e_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} e_2 \quad (3.17)$$

Adicionalmente, la precisión de esta estimación será equivalente a la suma de las precisiones de las estimaciones primarias:

$$v_e = v_1 + v_2 \quad (3.18)$$

De la misma manera, se puede obtener obtener la varianza de la estimación óptima en función de las varianzas de las estimaciones primarias:

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}} \quad (3.19)$$

Se puede generalizar las expresiones anteriores para un número  $n$  de estimaciones primarias en términos de las precisiones de las estimaciones primarias [19]:

$$v_e = \sum_{j=1}^n v_j \quad (3.20)$$

$$e = \frac{1}{v_e} \sum_{i=1}^n v_i e_i \quad (3.21)$$

Al igual que es posible generalizar las expresiones que usan las varianzas de las  $n$  estimaciones primarias:

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_j^2}} \quad (3.22)$$

$$e = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 e_i \quad (3.23)$$

Para los casos en los que hay varios estados que se quieren estimar, se obtiene la siguiente expresión:

$$V = \sum_{j=1}^n V_j \quad (3.24)$$

$$E = V^{-1} \sum_{i=1}^n V_i E_i \quad (3.25)$$

donde las matrices de estimación  $E_i$  son vectores de longitud igual al número de estados que se quieren estimar y las matrices  $V_i$  son matrices diagonales que indican las precisiones de cada estado.

Por último, las ecuaciones de estimación con matrices de covarianza para varios estados son las siguientes:

$$\Sigma_E^2 = \left( \sum_{j=1}^n \Sigma_j^{2-1} \right)^{-1} \quad (3.26)$$

$$E = \sum_{i=1}^n \Sigma_i^2 E_i \quad (3.27)$$

# CAPÍTULO IV

## MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se explica la metodología empleada para lograr cumplir los objetivos propuestos para esta investigación. A tal efecto, se describen las etapas del diseño y validación del sistema mecatrónico para el ajuste automático de laminadoras de palanquillas. En primer lugar, la metodología considera una investigación aplicada de carácter tecnológico, pues se plantea desarrollar una solución para la corrección de fallas en el proceso de laminación de palanquillas de acero. Asimismo, se trata de una investigación de enfoque cuantitativo, debido a que mediante el cálculo de diferentes variables involucradas en el proceso de laminación, se realiza la sintonización de un algoritmo de control para, finalmente, medir y analizar el error en el espesor final de las palanquillas.

En líneas generales, la solución planteada consiste en establecer un método de medición que transmita hacia un controlador el espesor de las palanquillas en la salida del laminador. Con la información recolectada, se diseña un algoritmo de control que corrija el espesor para mantener el valor de salida deseado, a pesar de la variación producida por el desgaste de los rodillos. Esta corrección es ejecutada por un actuador que ajusta la posición de los husillos para acercar los rodillos del laminador cada vez que el espesor de las palanquillas sobrepase un umbral de error predeterminado. Puesto que la medición se realiza de manera continua, el sistema se encuentra en lazo cerrado.

Para el desarrollo de esta investigación se toma como base dos metodologías. La primera corresponde a la utilizada en el diseño del algoritmo de control del espesor en el proceso de laminación. Para esta se ha tomado como referencia las etapas de desarrollo planteadas en [22]. De esta manera, los procedimientos principales del desarrollo del

algoritmo de control son mostrados en el diagrama de la Figura 4.1, incluyendo el desarrollo del modelo matemático, el diseño del control y la simulación de su desempeño en Simulink.

Por otro lado, tal como se propone en los objetivos del proyecto, se plantea el diseño y fabricación de un prototipo para validar el algoritmo de control desarrollado. Para el desarrollo del mismo se utiliza un enfoque generalizado de la metodología de diseño y desarrollo de productos de Ulrich [23]. Este fue empleado para la etapa de diseño conceptual del prototipo y para identificar las limitaciones tecnológicas y de fabricación al momento realizar la implementación del algoritmo de control del espesor.

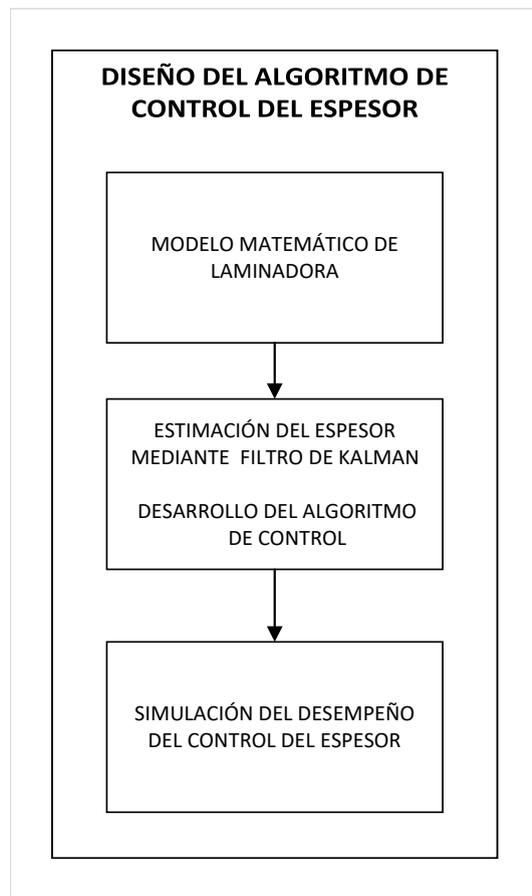


FIGURA 4.1: Flujo de trabajo metodológico para el diseño del sistema de control del espesor en el proceso de laminación.

#### 4.1 Modelado del proceso de laminación de palanquillas con desgaste de rodillos

A continuación, se detallan los aspectos tomados en cuenta para realizar el modelado del proceso de laminación.

##### 4.1.1 Suministro de palanquillas a la laminadora y desgaste de rodillos

Para modelar el suministro al laminador, se propone el tren de pulsos  $h_i$  descrito por (4.1) que representa la presencia de las palanquillas en la entrada del laminador a través del tiempo:

$$h_i(t) = \frac{h_0}{2} + \frac{h_0}{2} \operatorname{sgn} \left( \sin \left( \frac{2\pi}{T_p} t \right) \right) \quad (4.1)$$

donde  $h_0$  es el espesor de las palanquillas a la entrada del laminador y  $T_p$  es el lapso de tiempo que demora una palanquilla al entrar al laminador después de que entre la anterior. De esta manera, cuando  $h_i$  valga 0, se interpreta que no hay una palanquilla siendo laminada y, cuando  $h_i$  valga  $h_0$ , se interpreta que se está laminando una palanquilla de espesor  $h_0$ .

El desgaste de los rodillos se modeló en función al suministro. Dicho desgaste puede ser descrito con (4.2):

$$R(t) = R_0 - k_{\text{desgaste}} \int_0^t h_i(t_2) dt_2 \quad (4.2)$$

donde  $k_{\text{desgaste}}$  es un valor que permite ajustar la velocidad de desgaste de los rodillos y  $R_0$  es el radio inicial de los rodillos, es decir, sin desgaste.

#### 4.1.2 Modelo matemático de la laminadora

El espesor entregado por la laminadora ( $h_f$ ) puede ser calculado como lo indica (4.3):

$$h_f = \begin{cases} d - 2R, & \text{si } h_i = h_0 \\ 0, & \text{si } h_i = 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

donde  $R$  es el radio de los rodillos y  $d$  es la distancia entre los ejes de los mismos. Ambas magnitudes son medidas en metros. Dado que esta distancia varía a través del tiempo por la acción del actuador, esta puede ser calculada como lo indica (4.4):

$$d = d_0 - \alpha \frac{L_a}{2\pi} k_r \quad (4.4)$$

donde  $\alpha$  es la posición angular del actuador en radianes,  $d_0$  es la distancia en metros entre los rodillos cuando  $\alpha$  es 0,  $k_r$  es el factor que relaciona la posición angular del actuador y la posición angular de los husillos y  $L_a$  es el paso de los husillos.

Por otro lado, se propone (4.5) para calcular la velocidad angular de los rodillos  $N$  en RPM:

$$N = \begin{cases} \frac{60000P}{2\pi \left( R \arccos \left( 1 - \frac{h_i - h_f}{2R} \right) \right)^2 Q_i w \sigma_{prom} + 2\pi T_r}, & \text{si } h_i = h_0 \\ \frac{60000P}{2\pi T_r}, & \text{si } h_i = 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

donde  $P$  es la potencia entregada al laminador en kW,  $R$  es el radio de los rodillos en metros,  $h_{i,f}$  son los espesores inicial y final de las palanquillas en metros,  $Q_i$  es el factor de multiplicación de la presión para la palanquilla,  $w$  es el ancho de la palanquilla en metros,  $\sigma_{prom}$  es el esfuerzo promedio necesario para laminar las palanquillas y  $T_r$  es el

torque necesario para vencer el rozamiento generado en los rodamientos en los que se apoyan ambos rodillos en N-m. Dicho torque puede ser calculado como lo indica (4.6):

$$T_r = 2F_c \mu r_c \quad (4.6)$$

donde  $r_c$  es el radio interno de los cojinetes que soportan a los rodillos en metros,  $\mu$  es el coeficiente de fricción que ofrecen los cojinetes y  $F_c$  es la carga que sufren dichos cojinetes al soportar a los rodillos en newtons. Esta carga, como se muestra en (4.7), depende de si la laminadora esta laminando o no una palanquilla:

$$F_c = \begin{cases} R \arccos \left( 1 - \frac{h_i - h_f}{2R} \right) Q_i w \sigma_{\text{prom}}, & \text{si } h_i = h_0 \\ F_r, & \text{si } h_i = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

donde  $F_r$  es el peso de los rodillos de laminación, el sistema de reducción y todo el peso muerto que deben soportar los husillos.

### 4.1.3 Sistema de control de la velocidad angular de los rodillos

Como se puede observar en (3.8), la potencia a suministrar necesaria se incrementa conforme el radio de los rodillos crece. Si se entrega al laminador una potencia constante, la velocidad angular de estos aumenta progresivamente debido al desgaste de los rodillos, por lo que para mantener esta velocidad constante, los equipos de laminación tienen implementados un lazo de control como se puede observar en la Figura 4.2. En la sección 5.1.3 se brindan más detalles sobre este lazo de control.

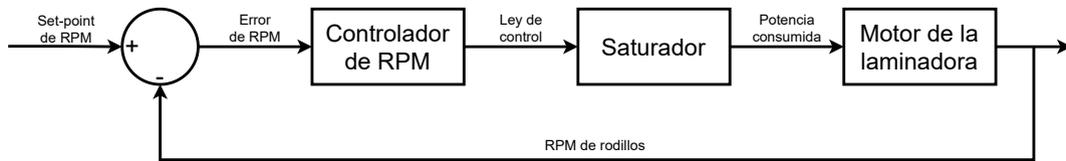


FIGURA 4.2: Control de las RPM de los rodillos del laminador.

## 4.2 Diseño del algoritmo de control del espesor de palanquillas

Los procesos del algoritmo de control se muestran en el diagrama de bloques de la Figura 4.3.

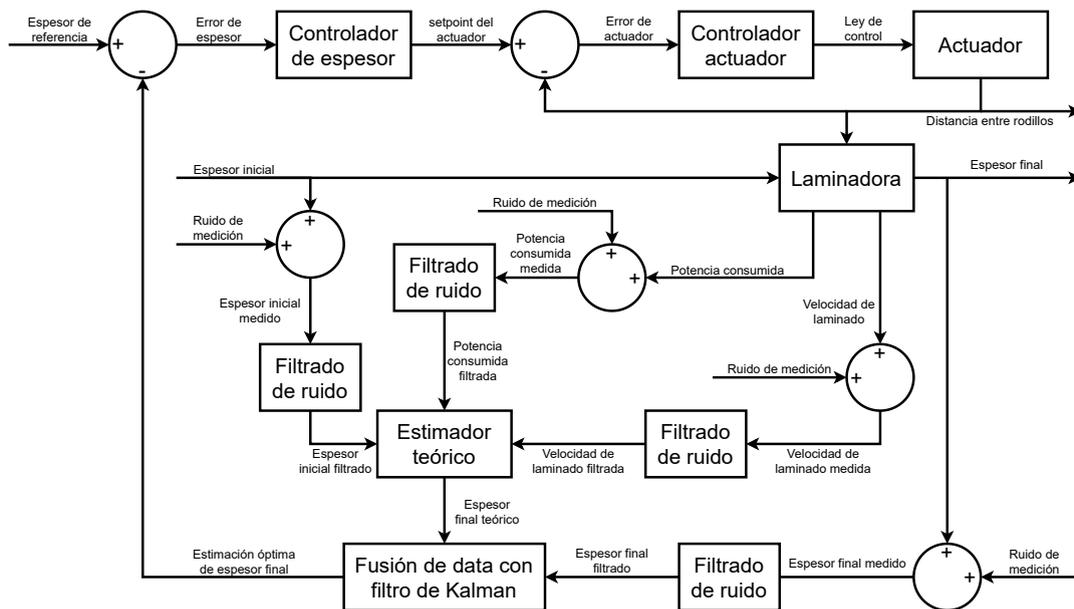


FIGURA 4.3: Diagrama de bloques del sistema de control.

### 4.2.1 Estimación del espesor mediante el filtro de Kalman

Para obtener una estimación confiable del espesor final, se consideraron dos estimaciones primarias: una medición directa del espesor final y una estimación teórica que

toma en cuenta el espesor inicial, la potencia consumida por la laminadora y la velocidad de laminado de la palanquilla. Dado que ambas estimaciones son afectadas por ruido de medición, son filtradas y posteriormente fusionadas con el uso de un filtro de Kalman para obtener una estimación óptima. A continuación, se explica el proceso para obtener estas estimaciones.

#### a) Filtrado de variables medidas

En el apartado de la medición de las variables involucradas en la estimación del espesor final, se les añade ruido de medición gaussiano de media equivalente a cero y una varianza definida para poder obtener mediciones más realistas. Posteriormente, se consideran varios tipos de filtros para remover dicho ruido, los cuales son el filtro IIR pasa bajos, filtro de promedio móvil con ponderado exponencial y filtro de promedio móvil de ventana rectangular. En la Figura 4.4 se muestra un diagrama de bloques del proceso de simulación de adición y filtrado de ruido.

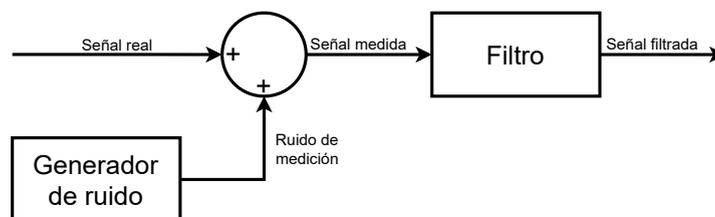


FIGURA 4.4: Adición y filtrado de ruido a señales.

Como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 4.3, las señales a las que se les añade ruido y se filtran son las de la potencia consumida, velocidad angular de los rodillos y espesores inicial y final de la palanquilla.

#### b) Estimador teórico del espesor final

Para poder estimar teóricamente el espesor entregado por el laminador, se hace uso de (3.8). Cabe resaltar que el valor del radio de los rodillos disminuye a

lo largo del tiempo, por lo que es desconocido por el algoritmo de control. Por este motivo, es necesario obtenerlo de manera indirecta. Si se despeja este valor de (4.3) y se es reemplazado en (3.8), se obtiene (4.8).

$$P = \begin{cases} \left( \frac{d_0 - \alpha \frac{L_a}{2\pi} k_r - h_f}{2} \arccos \left( 1 - \frac{h_i - h_f}{d_0 - \alpha \frac{L_a}{2\pi} k_r - h_f} \right) \right)^2 \frac{2\pi Q_i N w \sigma_{\text{prom}}(h_i, h_f)}{60000} + \frac{2\pi N T_r}{60000}, & \text{si } h_i = h_0 \\ \frac{2\pi N T_r}{60000}, & \text{si } h_i = 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

$$T_r = 2F_c \mu r_c \quad (4.9)$$

$$F_c = \begin{cases} \frac{d_0 - \alpha \frac{L_a}{2\pi} k_r - h_f}{2} \arccos \left( 1 - \frac{h_i - h_f}{d_0 - \alpha \frac{L_a}{2\pi} k_r - h_f} \right) Q_i w \sigma_{\text{prom}}(h_i, h_f), & \text{si } h_i = h_0 \\ F_r, & \text{si } h_i = 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

Dado que es complicado despejar el valor del espesor final  $h_f$  de dicha expresión, se opta por usar el método de Newton-Raphson para poder determinar numéricamente qué valor de espesor final corresponde a qué valor de potencia consumida. Para más detalle de este método, ver [24]. Como resultado, se puede observar en la Figura 4.5 que la función de potencia consumida, cuya gráfica fue obtenida utilizando valores típicos para cada variable, es inyectiva, por lo que se puede esperar que solo un valor de potencia consumida corresponde a solo un valor de espesor final.

Debido a que no es necesario estimar teóricamente el espesor final cuando no hay presencia de palanquilla en el laminador, la estimación está habilitada por una señal llamada  $p_1$  generada dinámicamente, la cual es un tren de pulsos que tiene

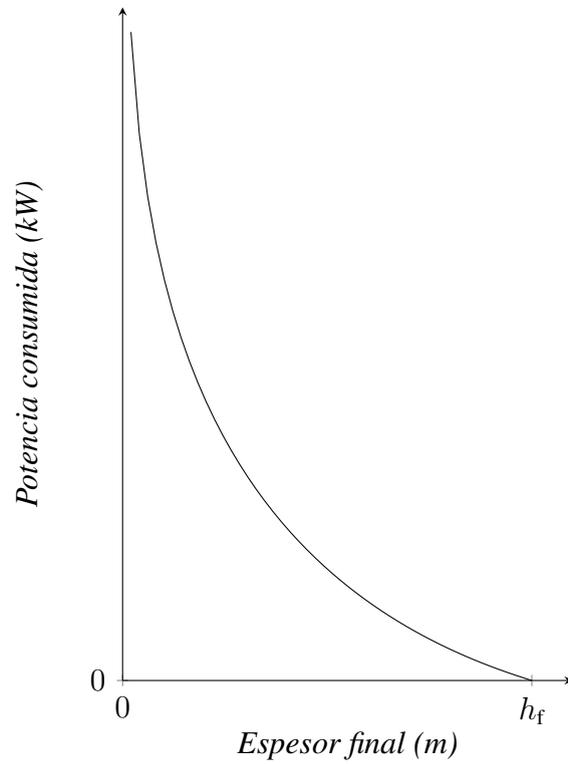


FIGURA 4.5: Curva típica potencia-espesor final.

el valor de 1 solamente cuando los sensores ultrasónicos implementados en el laminador detectan la presencia de una palanquilla dentro del mismo. Caso contrario, tendrá el valor de 0. La dependencia de la estimación teórica del espesor final con la señal  $p_1$  se explica en el diagrama de flujo de la Figura 4.6.

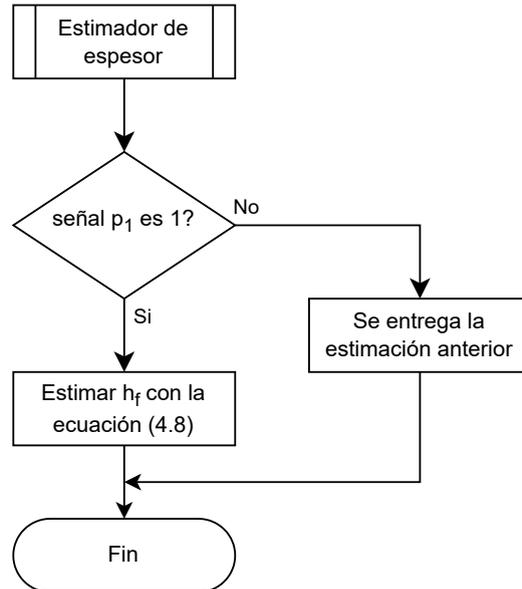


FIGURA 4.6: Lógica de estimación del espesor final.

### c) Fusión de información con el filtro de Kalman

Con la medición del espesor final filtrada ( $\bar{h}_f$ ) y su estimación teórica filtrada ( $\hat{h}_f$ ), se puede hacer uso del filtro de Kalman para fusionarlas y obtener una estimación óptima ( $h_{f_{\text{caliente}}}$ ) cuya precisión sea más alta que las de la medición y estimación teórica. Su implementación es explicada con (4.11) [21]:

$$h_{f_{\text{caliente}}} = \frac{v_{\bar{h}_f} \bar{h}_f + v_{\hat{h}_f} \hat{h}_f}{v_{\bar{h}_f} + v_{\hat{h}_f}} \quad (4.11)$$

donde  $v_{\bar{h}_f}$  y  $v_{\hat{h}_f}$  son las precisiones de  $\bar{h}_f$  y  $\hat{h}_f$  respectivamente.

### d) Corrección de estimación óptima por dilatación térmica

Cabe destacar que la estimación óptima  $h_{f_{\text{caliente}}}$  corresponde al espesor de las palanquillas al rojo vivo. Debido a la dilatación térmica que habrá sufrido el material, la palanquilla reducirá su espesor proporcionalmente a la disminución de

su temperatura una vez esta se enfríe, por lo que es necesario estimar el espesor en frío.

Usando (3.13), se obtiene (4.12):

$$h_{f_{\text{frío}}} = \frac{h_{f_{\text{caliente}}}}{1 + \gamma|\Delta T|} \quad (4.12)$$

donde  $h_{f_{\text{frío}}}$  es el espesor de la palanquilla después de enfriarse a temperatura ambiente.

#### 4.2.2 Sistema de control de la distancia entre rodillos

Cuando sea necesario realizar un ajuste en la distancia entre los rodillos para satisfacer un espesor final determinado, se toma en cuenta la estimación óptima del espesor final. Como se muestra en la Figura 4.7, si la diferencia entre dicha estimación óptima y el espesor de referencia sobrepasa un umbral predeterminado, se activa un relay, el cual, a su vez, activa un detector de flancos de subida. Al detectarse un flanco de subida, el bloque llamado "Actualizar setpoint del actuador" se encarga de actualizar el setpoint que debe seguir el actuador que corrige la distancia entre los rodillos.

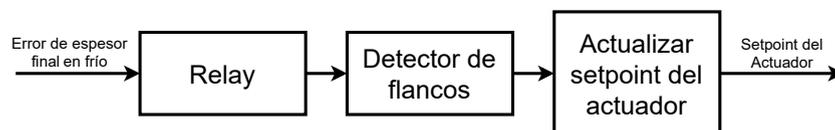


FIGURA 4.7: Sistema de actualización del setpoint del actuador.

El funcionamiento de dicho bloque es explicado con el diagrama de flujo en la Figura 4.8.

Como se puede observar en la Figura 4.9, este setpoint es la referencia a seguir por el lazo de control del actuador. Sin embargo, la corrección que este actuador ejercerá solo

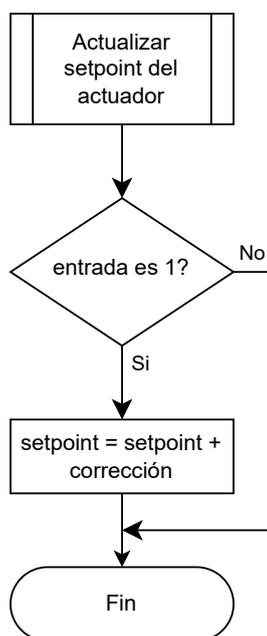


FIGURA 4.8: Funcionamiento del bloque "Actualizar setpoint del actuador".

debe darse cuando no hay una palanquilla siendo laminada, por lo que se multiplica la ley de control por un tren de pulsos  $p_2$  generado dinámicamente por el bloque "Habilitador de corrección". Dicho tren de pulsos tiene el valor de 1 solo cuando los sensores ultrasónicos implementados en el laminador no detectan la presencia de una palanquilla dentro del mismo. En otro caso, tendrá el valor de 0.

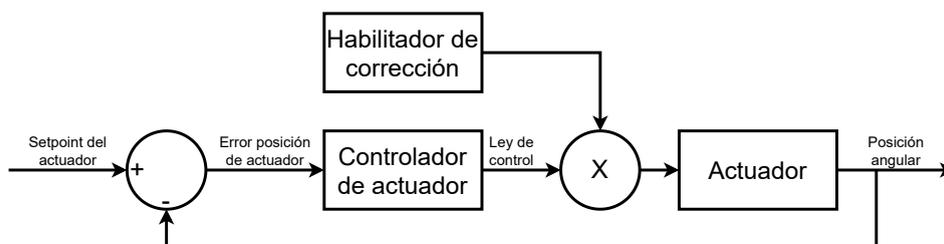


FIGURA 4.9: Control del actuador del algoritmo de control.

El funcionamiento detallado de los pulsos  $p_1$  y  $p_2$  se muestra en el diagrama de

bloques de la Figura 4.10, donde los bloques llamados Relay  $h_i$  y Relay  $h_f$  son relays con umbrales de encendido y apagado de  $0.75h_0$  y  $0.3h_0$  respectivamente.

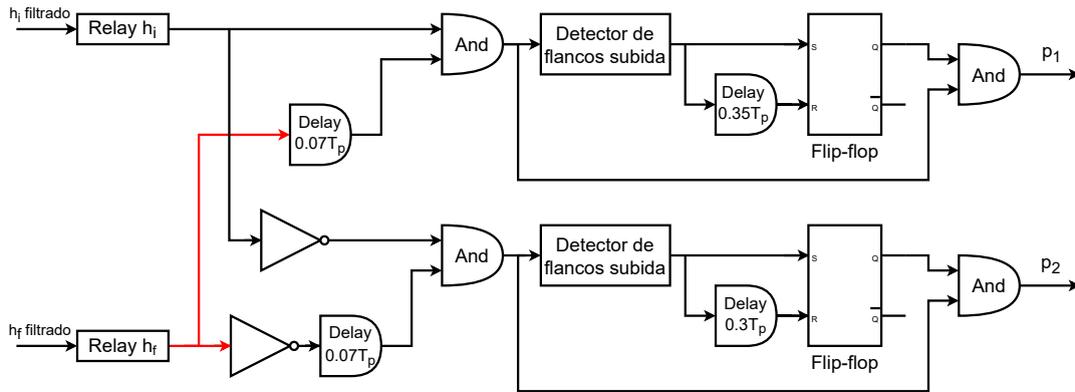


FIGURA 4.10: Generación de los pulsos  $p_1$  y  $p_2$ .

### 4.3 Validación del control en simulación

Para validar la propuesta, se simuló tanto el modelo del proceso de laminación como el algoritmo de control del espesor de palanquillas en la herramienta Simulink de MATLAB versión 2022a, ya que cuenta con herramientas para diseñar bloques y sistemas de control de manera sencilla. Esta simulación se lleva a cabo suponiendo un ingreso periódico de palanquillas al laminador durante un tiempo en el que el algoritmo de control pueda llevar a cabo su ajuste al menos una vez.

Las variables como el periodo de tiempo de ingreso de las palanquillas  $T_p$ , el espesor inicial  $h_0$ , los valores de referencia del espesor de las palanquillas y de la velocidad angular de los rodillos, las dimensiones de los rodillos, el coeficiente de fricción de los rodamientos que los soportan, etc son valores asumidos típicos en el proceso de laminación en caliente de palanquillas de acero. Sin embargo, para fines prácticos de esta simulación, se considera que el desgaste del radio de los rodillos se da en un tiempo mucho menor al convencional. De esta manera, se puede simular por menos tiempo el proceso de laminación para obtener resultados que puedan validar la propuesta de control.

Como se explicó anteriormente en la sección 4.2.1, se suman ruidos de medición gaussianos en las variables involucradas en la estimación del espesor de las palanquillas para probar el desempeño del algoritmo ante ruidos. Las magnitudes de las varianzas de estos ruidos serán directamente proporcionales a las varianzas de las propias señales medidas.

Posteriormente, se prueban los filtros IIR pasa-bajos y promediadores con ventana exponencial y rectangular con el fin de filtrar dichos ruidos. Estos filtros serán ajustados empíricamente para poder obtener el mejor filtrado que estos puedan entregar con el fin del correcto funcionamiento del algoritmo de control.

Además, se requerirá que el sistema de ajuste solo podrá efectuar las correcciones de distancia entre los rodillos cuando no hay una palanquilla en la laminadora, ya que se desea que el actuador encargado de ajustar esta distancia no se vea interrumpido por una.

El controlador del actuador que se usa es del tipo PD, ya que si se llegara a implementar un controlador con parte integral, esta irá integrando el error de posición angular del actuador. Esto no resulta conveniente dado que por el requerimiento anteriormente explicado, el algoritmo espera a que no haya una palanquilla siendo laminada para dejar que el actuador ejecute el ajuste, lo cual supone una ligera demora en la ley de control y una integración de error con un valor posiblemente muy elevado, el cual dificultaría el correcto control del actuador. Por otro lado, se consideró una parte derivativa en el controlador con el objetivo de evitar que se produzcan sobreimpulsos.

#### **4.4 Diseño y fabricación de prototipo de laminadora para prueba de concepto**

En el presente apartado, se describe el proceso de diseño y fabricación del prototipo de laminadora a partir de sus requerimientos. Se desarrolla el diseño conceptual del prototipo y la fabricación del mismo. Asimismo, se describe el procedimiento para

validar el concepto el sistema de control del espesor de palanquillas, mediante pruebas experimentales en laboratorio.

#### **4.4.1 Diseño conceptual**

La primera etapa del diseño y la fabricación del prototipo es el diseño conceptual, el cual implica distintos pasos a partir de los requerimientos del sistema. Estos van desde la abstracción de las ideas para segmentar las funciones del dispositivo, hasta la construcción de una matriz morfológica para seleccionar los componentes con los que se realiza la fabricación del prototipo.

##### **a) Requerimientos de diseño**

Para iniciar el proceso de diseño del prototipo del sistema desarrollado, primero se requiere definir qué conceptos o procesos van a ser validados. En general, como se plantea en los objetivos del proyecto, el prototipo debe incorporar el concepto del algoritmo de control del espesor propuesto. Para tal propósito, se consideró lo descrito en los alcances y limitaciones del proyecto, así como el marco teórico. En tal sentido, el prototipo debe realizar el proceso de laminación de una palanquilla e incorporar sensores y actuadores que permitan realizar la medición del espesor de una palanquilla y el ajuste de la distancia entre los rodillos para la corrección del espesor.

En primer lugar, se requiere que la estructura sea lo suficientemente rígida para soportar el movimiento de los rodillos y la fuerza de compresión ejercida al momento de laminar un bloque prismático en forma de palanquilla. Sin embargo, el peso no puede ser excesivo, ya que el prototipo debe poder trasladarse fácilmente por dos personas.

Considerando lo mencionado, se requiere definir el material del objeto a ser laminado. Dado que se trata de un prototipo de laboratorio, este no es diseñado para

soportar las cargas de laminación para palanquillas de acero ni temperaturas elevadas. Es por ello que se proponen materiales alternativos con los que se puede elaborar una palanquilla para realizar las pruebas del algoritmo adaptado en el prototipo. A continuación se analizan las ventajas y desventajas de las propiedades de cuatro materiales propuestos para ser laminados con bajas fuerzas de compresión.

TABLA 4.1: Comparación de materiales propuestos para ser laminados en prototipo.

Material	Ventajas	Desventajas
Cartón	Baja resistencia a la compresión. Fácil de manipular y dar forma de palanquilla.	Disponible en planchas delgadas de máximo 1.5cm de espesor. Luego de comprimirse, tiende a regresar en parte a su forma original, lo que dificultaría la medición del espesor final entregado por el prototipo.
Madera balsa	Ligera. Es fácil darle forma de palanquilla rectangular. No regresa a su forma original después de la deformación.	A pesar de su peso ligero, tiene alta resistencia a la compresión. También, es más costosa en comparación a los otros materiales.
Tecnopor (Espuma de poliestireno expandido)	Ligero y fácil de manejar. Disponible en variedad de densidades y grosores.	Posee poca flexibilidad y una moderada resistencia a la compresión lo que lo hace difícil de laminar. Luego de comprimirse, tiende a regresar en parte a su forma original
Espuma floral (Espuma rígida de poliuretano)	Ligera. Es fácil de darle forma de palanquilla. Posee una baja resistencia a la compresión, lo cual facilita su laminación. Una vez comprimida no regresa a su forma original, lo que es adecuado para realizar la medición del espesor final.	Se deforma muy fácilmente, por lo cual su manipulación requiere cuidado para mantener su superficie uniforme.

Por lo analizado en la tabla 4.1, para realizar la laminación con el prototipo utilizando bajas fuerzas de compresión, la espuma floral es la opción más adecuada debido a su baja resistencia a la compresión, facilidad de manipulación y ligereza.

Por otro lado, los rodillos de laminación deben girar accionados por motores independientes, esto con el fin de facilitar el prototipado al no incorporar un sistema de transmisión entre ambos rodillos. Además, deben girar a una velocidad de entre 30 y 50 RPM. De igual manera, el ajuste de la distancia entre los rodillos debe ser accionado por motores acoplados a cada husillo.

Finalmente, los sensores del espesor deben ser capaces de soportar las vibraciones. En la tabla 4.2 se resumen los requerimientos mencionados, los cuales deben ser cumplidos en gran medida para satisfacer el objetivo del prototipo diseñado.

TABLA 4.2: Requerimientos del prototipo de laminadora.

Característica	Valor requerido
Función principal	Laminar espuma floral de poliuretano rígido
Peso	< 12 Kg
Velocidad angular de rodillos	Entre 30 y 50 RPM
Dimensiones máximas	70 mm × 70mm × 40mm

#### b) **Abstracción de ideas y definición de funciones**

En esta etapa se realiza la abstracción de las ideas para el concepto de solución. Para esto se emplea la técnica de descomposición en funciones, con la cual se va a representar el prototipo en términos de sus entradas y salidas, considerando los subprocesos involucrados.

Como se describe en la sección 3.1.1, el proceso de laminación a nivel industrial consta de varias etapas, siendo la etapa de tren de desbaste donde se realiza la reducción del espesor de las piezas de acero. Las partes que generalmente posee un laminador en el tren de desbaste son [25]:

- Rodillos de laminación.

- Rodillos de respaldo y soporte.
- Motores de accionamiento de los rodillos.
- Control de velocidad de los motores.
- Sistema de transmisión de potencia a los rodillos.
- Husillos para regular de la distancia entre rodillos.
- Volante de ajuste y sistema de transmisión a los husillos.
- Dispositivos de protección de los rodillos frente a las cargas soportadas.
- Sistema de refrigeración y lubricación de los rodillos.

A partir de los sistemas y componentes del laminador industrial, se extraen las funciones principales que son necesarias para el diseño del prototipo de laminadora. Estas funciones se seleccionan en base a los requerimientos de diseño antes descritos para lograr validar el concepto del algoritmo de control del espesor diseñado considerando los alcances y limitaciones de la investigación. De esta manera el prototipo puede descomponerse en las siguientes entradas, salidas y funciones:

**Entradas:**

- Energía: Es la fuente que se emplea para ejecutar el accionamiento y movimiento del sistema de laminación. En este caso, una fuente de energía eléctrica.
- Señales: Se refiere a los datos o información que es transmitida al sistema.

**Salidas:**

- Movimiento: Ejecución del movimiento de los rodillos de laminación o de los husillos que ajustan la distancia entre los rodillos.
- Energía disipada: Se trata de la energía residual del sistema, disipada hacia al exterior en forma de calor o ruido.

- Señales: Información que se dirige hacia un sistema externo para ser analizada, ya sea de los sensores u otros componentes del sistema.

**Funciones:**

- Laminar: La función principal del prototipo. Permite reducir el espesor de las palanquillas mediante compresión y fricción.
- Convertir energía eléctrica en torque: Esta acción permite convertir la energía de la fuente en el torque requerido para el movimiento de los rodillos de laminación y de los husillos.
- Ajustar distancia: Se refiere a ajustar la distancia entre los rodillos, realizado por los actuadores por medio de los husillos.
- Controlar el sistema: Control del sistema que permite procesar las señales de entrada y salida.
- Sensor: Esta función se refiere a la recopilación de información sobre la velocidad de los rodillos y los sensores de distancia para la medición del espesor de las palanquillas.

En base a lo mencionado, se elaboró la Figura 4.11, que esquematiza la relación entre entradas, salidas y funciones requeridas para el prototipo del sistema de laminación propuesto.

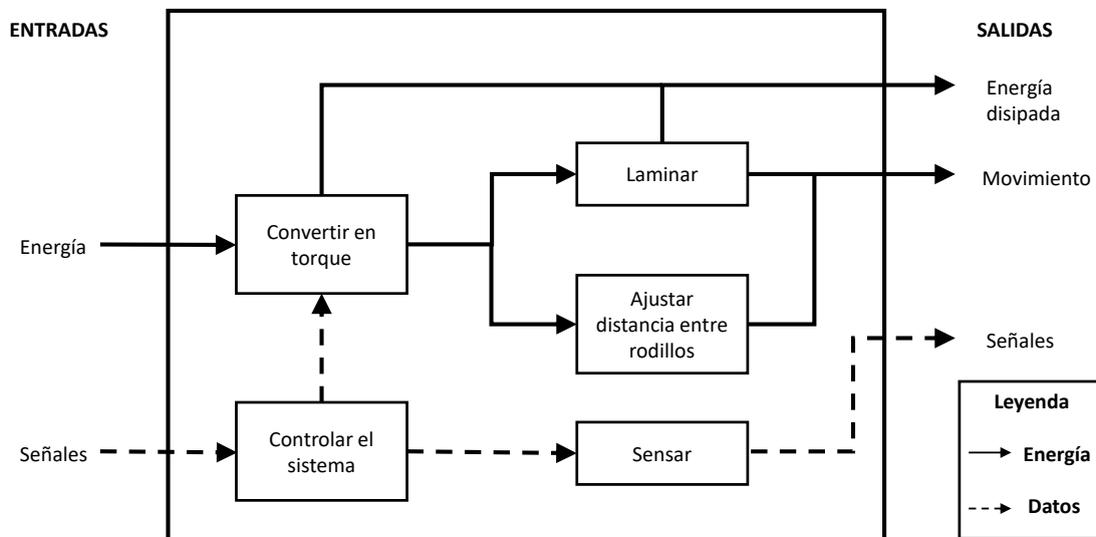


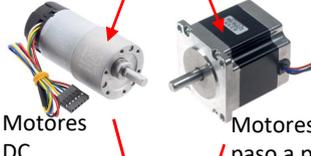
FIGURA 4.11: Descomposición del prototipo en sus funciones.

### c) Matriz morfológica y definición del concepto de solución

A partir de las funciones definidas previamente, se construye una matriz morfológica para la selección de componentes del sistema. Se presentan distintas opciones de tecnologías en la Figura 4.12 que permiten llevar a cabo cada función propuesta, las cuales serán evaluadas de acuerdo con los requerimientos. La combinación más adecuada de las tecnologías para cada función va a definir el concepto de solución óptimo para el diseño del prototipo.

#### 4.4.2 Fabricación

Una vez definidos los componentes del sistema, se procede a la fabricación del prototipo. Las principales técnicas de fabricación utilizadas son el diseño 3D, maquinado en torno y ensamblaje manual; debido a su accesibilidad para realizar un prototipado rápido. Para realizar el diseño se analizó la estructura y componentes de laminadoras utilizadas en distintas aplicaciones, como laminación de aceros, joyerías o panificación.

FUNCIÓN	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2
LAMINAR	 Laminadora de masa de pan	 Tubos de aluminio
CONVERTIR ENERGÍA ELÉCTRICA EN TORQUE	 Servomotor	 Motores DC      Motores paso a paso
AJUSTAR DISTANCIA DE RODILLOS	 Husillos de laminadora de masa de pan	 Husillos de bola
SENSAR	 Sensor ultrasónico	 Sensor infrarrojo      Encoder
CONTROLAR (LECTURA Y ESCRITURA DE SENSORES Y ACTUADORES)	 Arduino Uno	 Arduino Mega

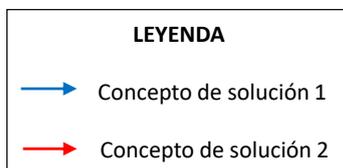


FIGURA 4.12: Matriz morfológica del prototipo de laminadora.

A partir de sus componentes en común se simplificó el diseño de la laminadora en tres grupos: husillos, rodillos de laminación motorizados y estructura de la laminadora.

En primer lugar, se seleccionó los husillos, los cuales ya poseen un diseño y dimensiones definidos (Figura 4.13). Su principal característica es que poseen un recorrido

de 50 cm. Asimismo, para los ejes de los rodillos de laminación se reutilizaron ejes de rodillos de impresora, los cuales tienen una longitud aproximada de 30 cm y un diámetro de 1.3 cm. Las dimensiones de las demás partes de la laminadora y de su estructura en general fueron aproximadas partiendo de las dimensiones de los husillos y de los ejes seleccionados.



FIGURA 4.13: Husillo de bola de 50 cm de recorrido.

Luego se diseñó los rodillos de laminación, los cuales deben tener un área de contacto considerable con la palanquilla. Para lograr esto se les asignó un diámetro de 3 pulgadas y una longitud de 15 centímetros. Los rodillos y sus respectivos ejes van a ser soportados por rodamientos. En el caso del rodillo inferior, estos rodamientos van sujetos a la base de la estructura del prototipo; mientras que los rodamientos del rodillo superior se sujetan a las tuercas de los husillos, los cuales van a permitir que el rodillo superior se desplace verticalmente y se pueda ajustar la distancia entre rodillos de laminación.

Finalmente, para los soportes de los rodillos y motores se emplean piezas de madera. Esto debido a su bajo costo y su facilidad para el ensamblaje. Bajo los mismos criterios, para la estructura externa del prototipo se utilizan tableros de MDF de 1.5 cm de espesor. Adicionalmente, se añaden bandejas en los laterales del rodillo inferior para que la palanquilla no se incline o se desplace hacia los costados mientras se lamina. De esta

manera, la palanquilla solo se moverá en la dirección de salida de la laminadora y se podrá realizar adecuadamente la medición de su espesor. Posteriormente, se integran al prototipo todos los componentes seleccionados para el control del espesor. Las dimensiones y el modelo 3D del prototipo diseñado se muestran en el anexo 5.4.7.

#### 4.4.3 Pruebas experimentales del prototipo en laboratorio

En esta etapa se realizan las validaciones en el prototipo a los subprocesos que contiene el algoritmo de control del espesor. De esta manera, se procede a validar la medición del espesor de las palanquillas y el control de la posición de los husillos para el ajuste de la distancia de los rodillos.

Como se mencionó en los alcances y limitaciones del proyecto, el prototipo implementa el algoritmo de control desarrollado a través de comunicación serial entre las plataformas de Arduino y Simulink. En este sentido, se realiza la configuración en ambas plataformas para la recepción y transmisión de datos. Se requiere recibir en Simulink los datos de los sensores de distancia para la medición del espesor. Asimismo, Simulink va a transmitir hacia Arduino los datos de control del actuador y, consecuentemente, el control de la distancia entre rodillos. En la Figura 4.14 se presenta el esquema de transmisión y recepción de datos del algoritmo de control desarrollado en Simulink.

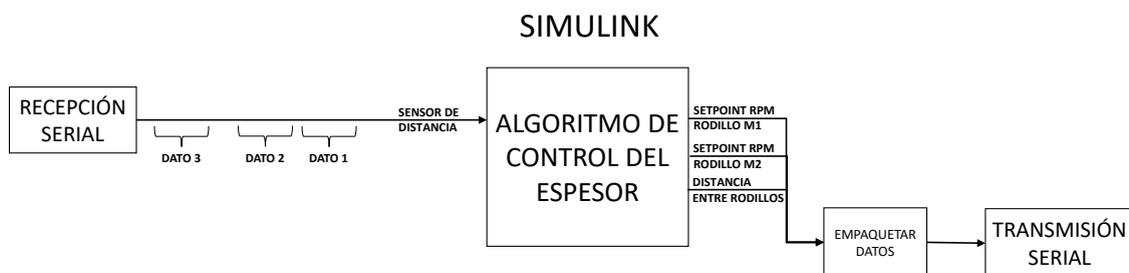


FIGURA 4.14: Transmisión y recepción de datos del algoritmo en Simulink.

### a) **Medición del espesor**

Lograda la comunicación, el siguiente paso es validar la correcta medición del espesor de la palanquilla laminada. Para medir el espesor, se requiere ubicar el sensor de distancia a la salida de los rodillos de laminación, posicionándolo en la parte superior del prototipo. De esta manera, se mide la distancia desde el sensor hasta la cara superior de la palanquilla en el controlador de Arduino, mientras que la altura de la cara inferior de la palanquilla permanece constante gracias a la bandeja fijada en la estructura del prototipo. Luego, se envía esta medición por comunicación serial a Simulink para calcular el espesor de la palanquilla.

Al igual que en la simulación, en Simulink se filtra la señal para eliminar el ruido de la medición. En la Figura 4.15 se muestra el diagrama de bloques del proceso descrito para la medición del espesor.



FIGURA 4.15: Medición y filtrado del espesor.

### b) **Control de posición angular de husillos**

Para realizar el ajuste de la posición de los rodillos, se toma el valor del espesor medido y se aplica el algoritmo mostrado en la Figura 4.7 para establecer el setpoint de la posición angular de los husillos. Este setpoint ingresa a un lazo de control de la posición angular de los husillos, el cual observa en diagrama de la Figura 4.16. Como se observa, se considera también el bloque “Habilitador de corrección”, el cual activa la corrección solo en el caso de que no haya presencia de palanquillas. Finalmente, la ley de control es transmitida hacia los actuadores por medio de la tarjeta Arduino para accionar el ajuste de la posición angular de los husillos.

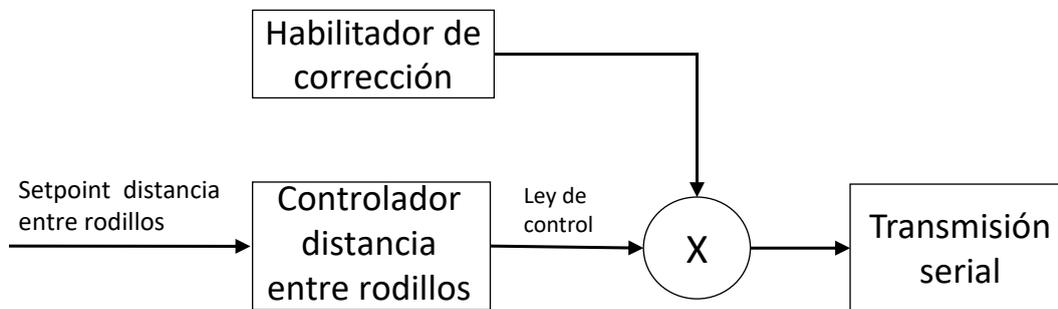


FIGURA 4.16: Control de posición de los husillos del prototipo.

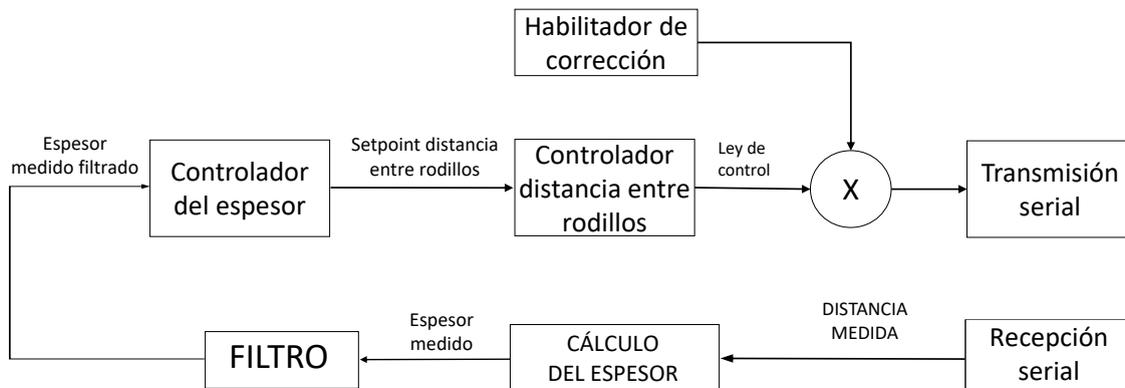


FIGURA 4.17: Algoritmo de control del espesor del prototipo.

#### 4.4.4 Integración del prototipo de laminadora

Finalmente, realizadas las validaciones de cada subproceso, todos los componentes son integrados en el prototipo de laminadora. Del mismo modo, las partes del algoritmo son integradas para realizar la validación del control del espesor. En la Figura 4.17 se muestra el algoritmo de control desarrollado para su implementación en el prototipo fabricado.

# CAPÍTULO V

## RESULTADOS

### 5.1 Resultados de la simulación de la laminadora

Los resultados que se muestran a continuación son obtenidos siguiendo el algoritmo de control propuesto en la Figura 4.3 con un tiempo de simulación de 250 segundos y un tiempo de muestreo  $T_s = 0.01$  segundos.

#### 5.1.1 Suministro al laminador y desgaste de rodillos

Como se puede obtener de (4.2), el tren de pulsos  $h_i(t)$  tendrá un periodo  $T_p$  y su valor oscilará entre 0 y  $h_0$ . Se escogieron los valores de  $T_p = 30$  segundos y  $h_0 = 0.1$  m basado en la observación de procesos de laminado de palanquillas típicos. Con estos valores, se obtiene el tren de pulsos de (5.1):

$$h_i(t) = 0.05 + 0.05 \operatorname{sgn} \left( \sin \left( \frac{\pi}{15} t \right) \right) \quad (5.1)$$

cuyo valor a lo largo del tiempo se muestra en la Figura 5.1.

El radio de los rodillos  $R(t)$  decrece en función al suministro  $h_i(t)$ . Se escogió un radio inicial  $R_0 = 0.2$  m y una tasa de desgaste  $k_{\text{desgaste}} = 0.001$ , lo que entrega (5.2):

$$R(t) = 0.2 - 0.00005 \int_0^t 1 + \operatorname{sgn} \left( \sin \left( \frac{\pi}{15} t_2 \right) \right) dt_2 \quad (5.2)$$

cuyo valor a lo largo del tiempo se muestra en la Figura 5.2.

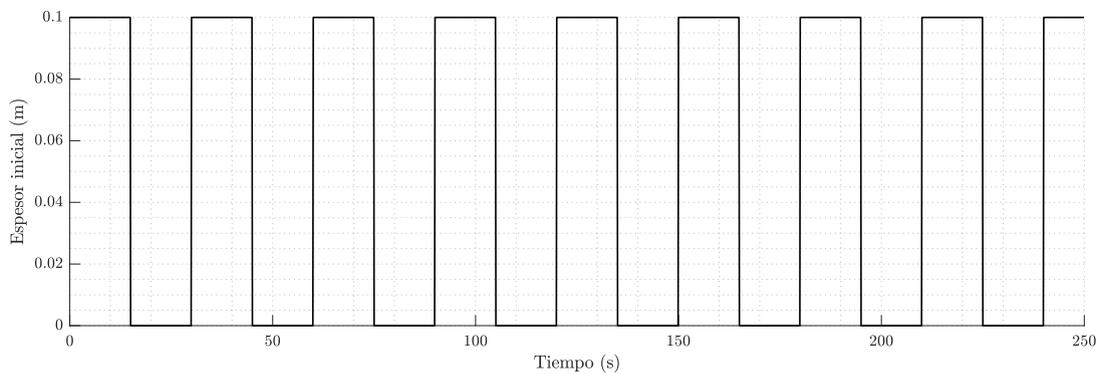


FIGURA 5.1: Simulación del suministro de palanquillas al laminador.

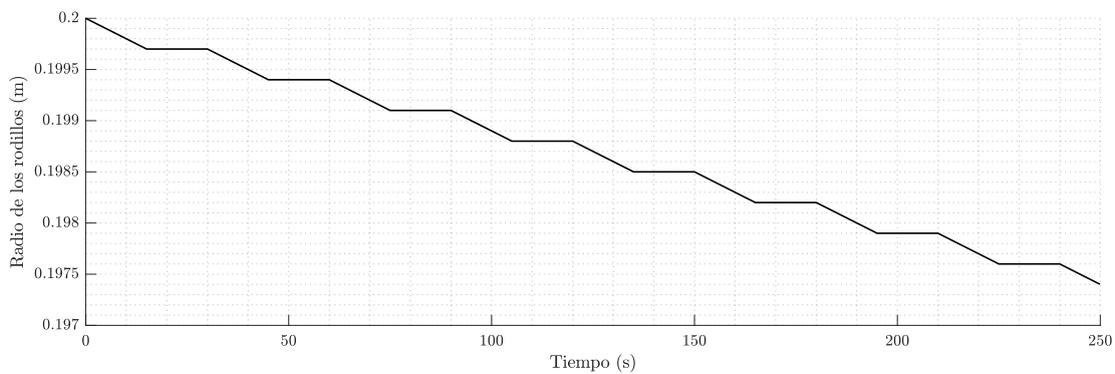


FIGURA 5.2: Simulación de desgaste de rodillos del laminador.

El desgaste que sufren los rodillos ha sido exagerado asumiendo un desgaste lineal de  $3 \times 10^{-4}$  metros cada 30 segundos de uso con el propósito de poder visualizarlo más fácilmente en simulación. En un escenario real, el desgaste ocurre mucho más lentamente.

### 5.1.2 Espesor final de palanquilla obtenido

Una vez se simula el desgaste de los rodillos, se puede obtener el valor del espesor final de las palanquillas a lo largo del tiempo con las ecuaciones (4.2) y (4.4). Se simula el proceso de laminación con una distancia entre rodillos inicial  $d_0 = 0.49$  m y un factor de desgaste  $k_r = 0.01$ . Con lo que el valor del espesor final  $h_f$  se puede calcular con (5.3), el cual es equivalente a 0.09 m cuando no hay desgaste en los rodillos. Este último es el valor de referencia que se desea para el espesor de las palanquillas.

$$h_f = \begin{cases} 0.09 - 0.00003175 \frac{\alpha}{2\pi} + 0.0001 \int_0^t 1 + \operatorname{sgn} \left( \sin \left( \frac{\pi}{15} t_2 \right) \right) dt_2, & \text{si } h_i = 0.1 \\ 0, & \text{si } h_i = 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

La gráfica que muestra el espesor final a largo del tiempo se muestra en la Figura 5.3. Dicha gráfica se obtiene con una posición angular del actuador  $\alpha = 0$ . Sin embargo, como se explicó anteriormente, este ángulo se modificará para corregir el espesor final cada vez que este sobrepase un umbral predeterminado.

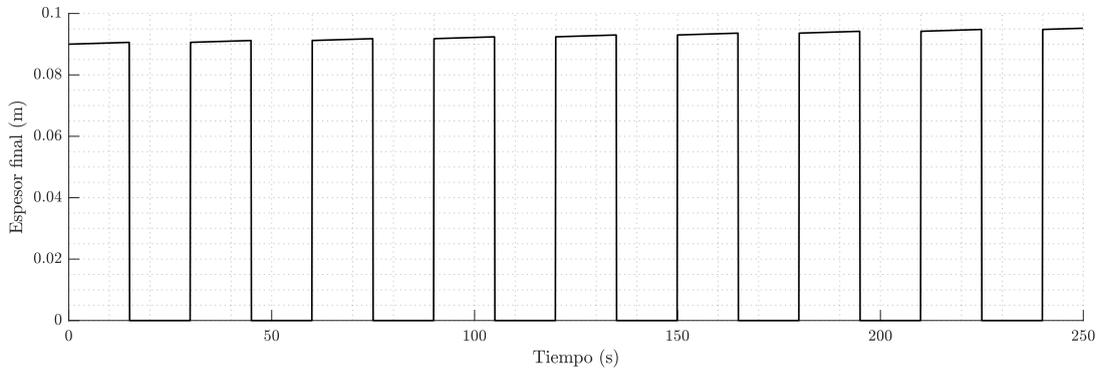


FIGURA 5.3: Espesor final de palanquilla vs tiempo.

### 5.1.3 Potencia consumida y velocidad de laminado

La velocidad de laminado puede ser obtenida con las ecuaciones (4.5), (4.6) y (4.7). Se escogió un ancho de palanquilla  $w = 0.1$  m, un factor  $Q_i = 1.15$ , un coeficiente de fricción  $\mu = 0.1$  y un radio interno de cojinetes  $r_c = 0.15$  m.

$$N = \begin{cases} \frac{30000P}{0.115\pi \left( R \arccos \left( 1 - \frac{0.1 - h_f}{2R} \right) \right)^2 \sigma_{\text{prom}} + \pi T_r}, & \text{si } h_i = 0.1 \\ \frac{30000P}{\pi T_r}, & \text{si } h_i = 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

$$T_r = \begin{cases} 0.003795R \arccos \left( 1 - \frac{0.1-h_f}{2R} \right) \sigma_{\text{prom}}, & \text{si } h_i = 0.1 \\ 1471.5 \text{ N-m}, & \text{si } h_i = 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

El valor del esfuerzo real promedio necesario  $\sigma_{\text{prom}}$  puede ser obtenido en función al espesor final con (5.11) y con una curva de esfuerzo-deformación real del acero que se desee laminar. De esta manera, con el esfuerzo real del material sin deformación y el esfuerzo real del material deformado computado con los espesores inicial y final, se determina el esfuerzo real promedio como lo indica (3.2).

Por otro lado, la potencia consumida y la velocidad angular de los rodillos interactúan entre sí en un lazo de control, el cual es mostrado en la Figura 4.2. Para implementar dicho lazo, se escogió un setpoint de velocidad angular de 30 RPM y se usó un controlador PI con prefiltro y un saturador el cual se muestra en la Figura 5.4. Las ganancias y prefiltro del controlador fueron ajustados empíricamente de tal manera que el comportamiento del laminador simulado fuera similar a como aceleran y desaceleran los rodillos de laminadores industriales reales.

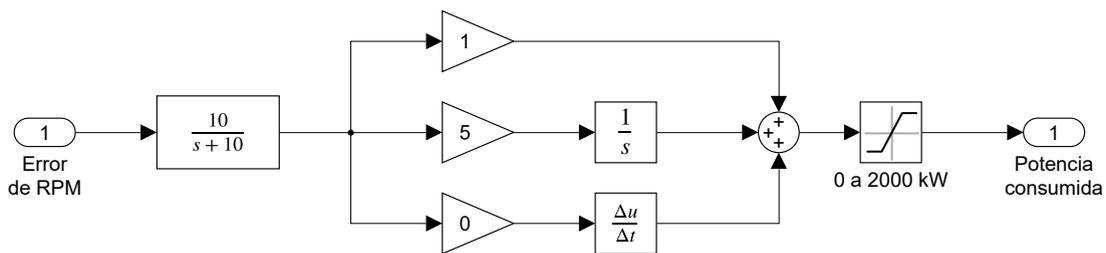


FIGURA 5.4: Controlador de velocidad angular de los rodillos del laminador.

Dicho controlador tiene como ganancias proporcional e integral de 1 y 5 respectivamente, el saturador limita la potencia de 0 a 2000 kW y la eficiencia asumida para el sistema de laminación fue del 57.5%. El comportamiento temporal de la potencia consumida y de la velocidad angular de los rodillos se muestra en las Figuras 5.5 y 5.6 respectivamente.

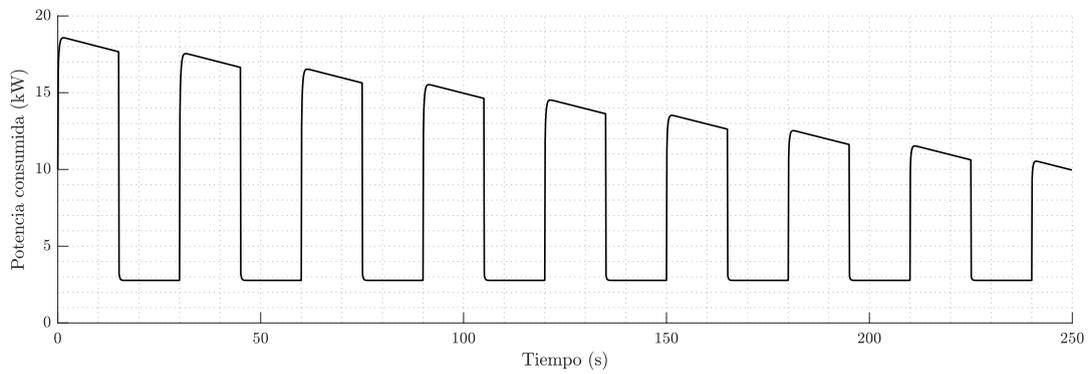


FIGURA 5.5: Potencia consumida vs tiempo.

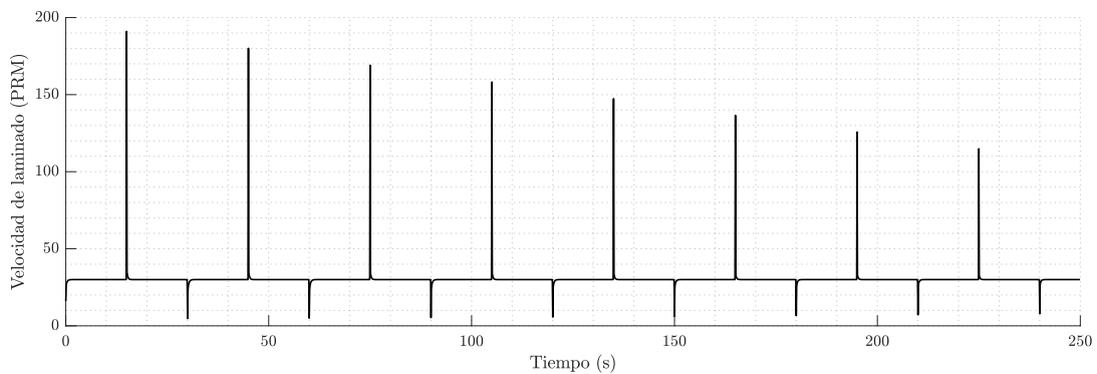


FIGURA 5.6: Velocidad angular de los rodillos vs tiempo

Se puede apreciar en la Figura 5.5 que la potencia consumida por la laminadora sube cuando está laminando una palanquilla y decrece hasta un mínimo cuando no hay palanquilla siendo laminada. De igual manera, debido a que la potencia necesaria para girar los rodillos a cierta velocidad cuando no hay palanquilla es muy inferior a la necesaria para hacerlos girar cuando si hay palanquilla, se producen incrementos y decrementos repentinos de velocidad angular en las transiciones de ambos estados de funcionamiento, tal como se muestra en la Figura 5.6. Estas variaciones son corregidas por el control de velocidad angular de los rodillos del laminador. Dicho comportamiento es similar a lo que se puede apreciar en sistemas de laminación reales.

## 5.2 Resultados de la simulación del algoritmo de control

A continuación, se detallan los resultados obtenidos de la simulación de las diferentes etapas del algoritmo de control.

### 5.2.1 Adición de ruido de medición

Como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 4.3, se le añade ruido de medición gaussiano a las señales de potencia consumida, velocidad de laminado y espesores inicial y final. A continuación, se muestran estas señales con un ruido de medición del tipo blanco gaussiano, sin sesgo y varianzas equivalentes al 5 % de la varianza de cada magnitud medida.

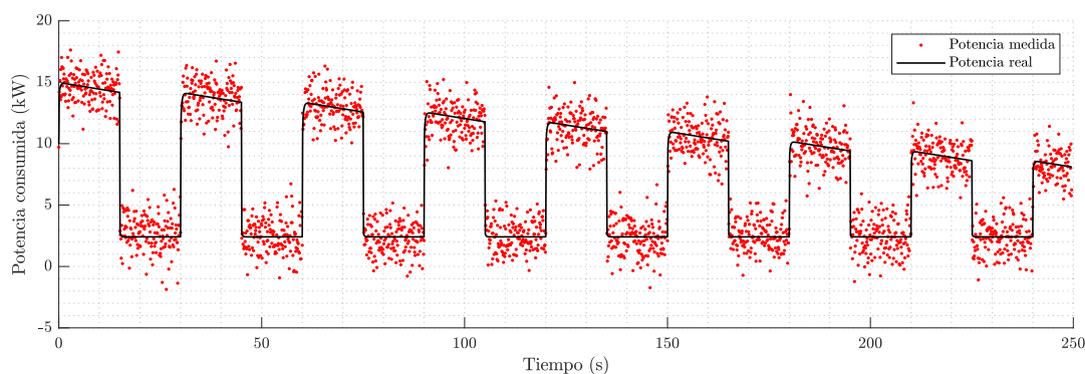


FIGURA 5.7: Medición de la potencia consumida.

### 5.2.2 Filtrado de ruido de medición

Una vez se tienen las señales medidas, se procede a filtrar el ruido de medición que estas presentan con diferentes tipos de filtros. El desempeño de dichos filtros para las diferentes señales medidas se muestra a continuación.

#### a) Desempeño de filtros en medición de potencia consumida

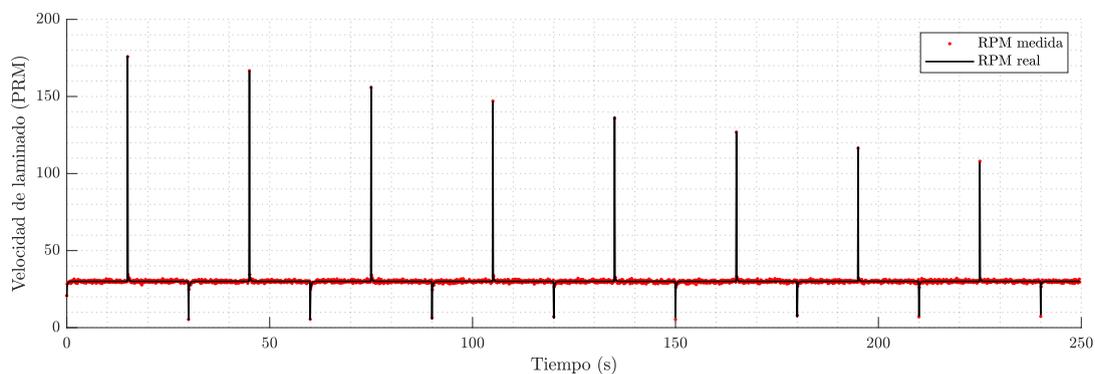


FIGURA 5.8: Medición de la velocidad angular de los rodillos.

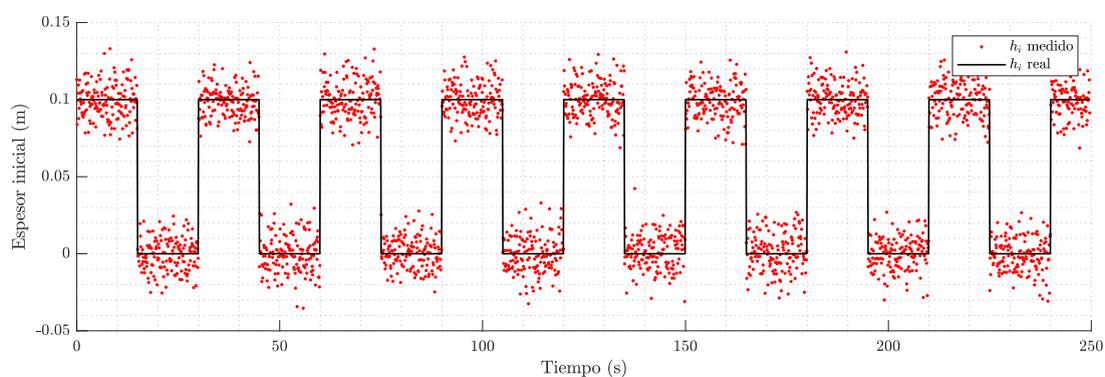


FIGURA 5.9: Medición del espesor inicial de las palanquillas.

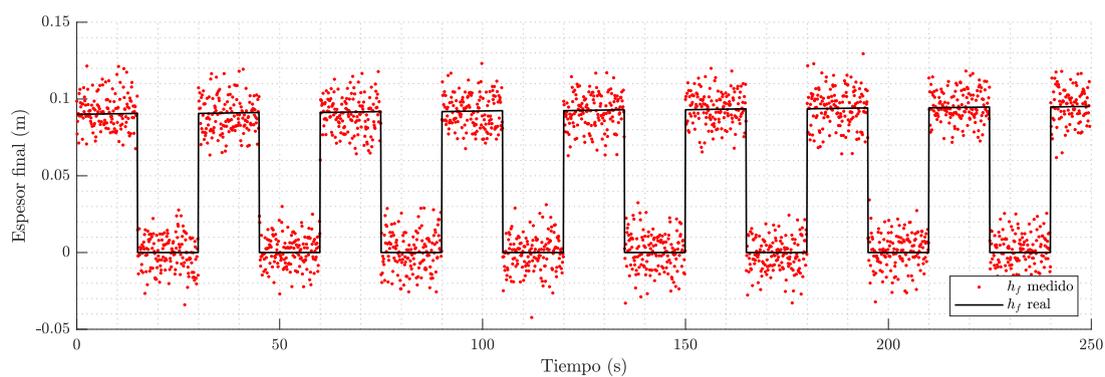


FIGURA 5.10: Medición del espesor final de las palanquillas.

Los parámetros de los diferentes filtros que son probados para filtrar la medición de la potencia consumida se muestran en la tabla 5.1 y los resultados de dicho filtrado se muestran en la Figura 5.11. Estos parámetros, al igual que con

las señales que se mostrarán posteriormente, fueron ajustados empíricamente para obtener los filtrados más limpios posibles.

TABLA 5.1: Parámetros de filtros probados en señal de potencia consumida.

Método de filtrado	Parámetros
Filtro IIR pasa-bajos	Frecuencia de corte = 10 Hz
	Atenuación = -180 dB
	Frecuencia de atenuación = 1 Hz
Promediador con ponderado exponencial	Factor de memoria = 0.95
Promediador con ventana rectangular	Tamaño de ventana = 100 muestras

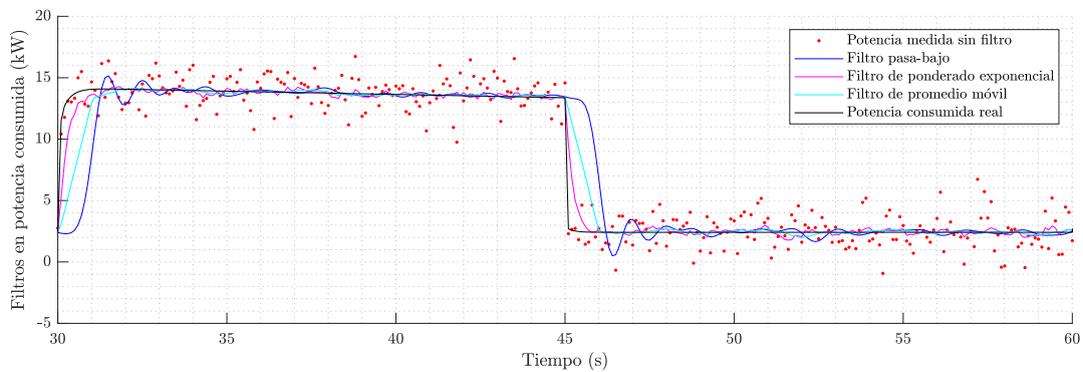


FIGURA 5.11: Desempeño de filtros en medición de potencia consumida.

Por otro lado, en la Figura 5.12 se pueden observar los errores que presentan los filtros empleados en la fase estacionaria cuando se está laminando la palanquilla. Dicha fase es determinada por la señal  $p_1$  para este error de medición y todos los que se mostrarán posteriormente.

Los errores cuadráticos medios (ECM) en la fase estacionaria de estas señales filtradas son mostrados en la tabla 5.2.

TABLA 5.2: Errores cuadráticos medios de señales filtradas en medición de potencia consumida.

Método de filtrado	Error cuadrático medio (kW <sup>2</sup> )
Filtro IIR pasa-bajos	$0.3883 \times 10^{-5}$
Promediador con ponderado exponencial	$0.4127 \times 10^{-5}$
Promediador con ventana rectangular	$0.1651 \times 10^{-5}$

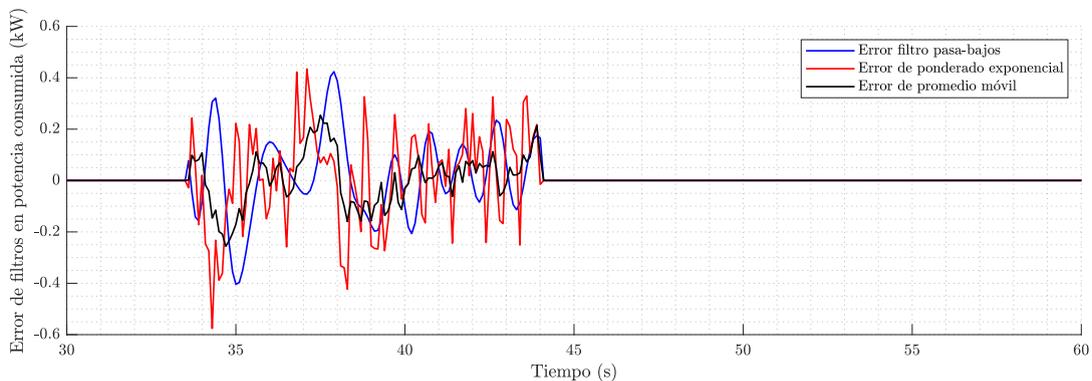


FIGURA 5.12: Error de filtros en medición de potencia consumida.

Se decide usar el filtro promediador con ventana rectangular para esta medición debido a que es el que presenta un ECM menor.

**b) Desempeño de filtros en medición de velocidad angular de rodillos**

Los parámetros de los diferentes filtros que son probados para filtrar la medición de la velocidad angular de los rodillos se muestran en la tabla 5.3 y los resultados de dicho filtrado se muestran en la Figura 5.13.

TABLA 5.3: Parámetros de filtros probados en señal de velocidad angular.

Método de filtrado	Parámetros
Filtro IIR pasa-bajos	Frecuencia de corte = 10 Hz Atenuación = -180 dB Frecuencia de atenuación = 1 Hz
Promediador con ponderado exponencial	Factor de memoria = 0.95
Promediador con ventana rectangular	Tamaño de ventana = 100 muestras

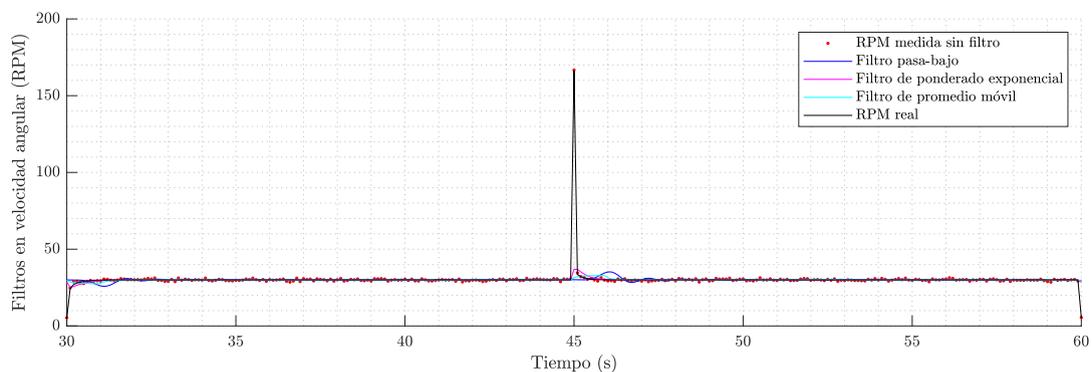


FIGURA 5.13: Desempeño de filtros en medición de velocidad angular.

Por otra parte, en la Figura 5.14 se pueden observar los errores que presentan los filtros empleados en la fase estacionaria determinada por la señal  $p_1$ .

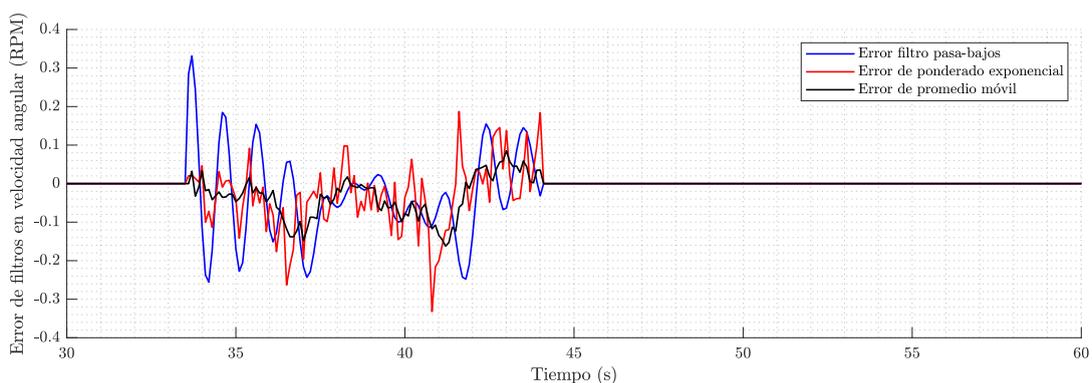


FIGURA 5.14: Error de filtros en medición de velocidad angular.

Los ECM en la fase estacionaria de estas señales filtradas son mostrados en la tabla 5.4.

TABLA 5.4: Error cuadrático medio de señales filtradas en medición de velocidad angular.

Método de filtrado	Error cuadrático medio (RPM <sup>2</sup> )
Filtro IIR pasa-bajos	$0.1237 \times 10^{-5}$
Promediador con ponderado exponencial	$0.0907 \times 10^{-5}$
Promediador con ventana rectangular	$0.0348 \times 10^{-5}$

Se decide usar el filtro promediador con ventana rectangular para esta medición debido a que es el que presenta un ECM menor.

### c) Desempeño de filtros en medición de espesor inicial

Los parámetros de los diferentes filtros que fueron son para filtrar la medición del espesor inicial se muestran en la tabla 5.5 y los resultados de dicho filtrado se muestran en la Figura 5.15.

TABLA 5.5: Parámetros de filtros probados en señal de espesor inicial.

Método de filtrado	Parámetros
Filtro IIR pasa-bajos	Frecuencia de corte = 10 Hz
	Atenuación = -180 dB
	Frecuencia de atenuación = 1 Hz
Promediador con ponderado exponencial	Factor de memoria = 0.99
Promediador con ventana rectangular	Tamaño de ventana = 200 muestras

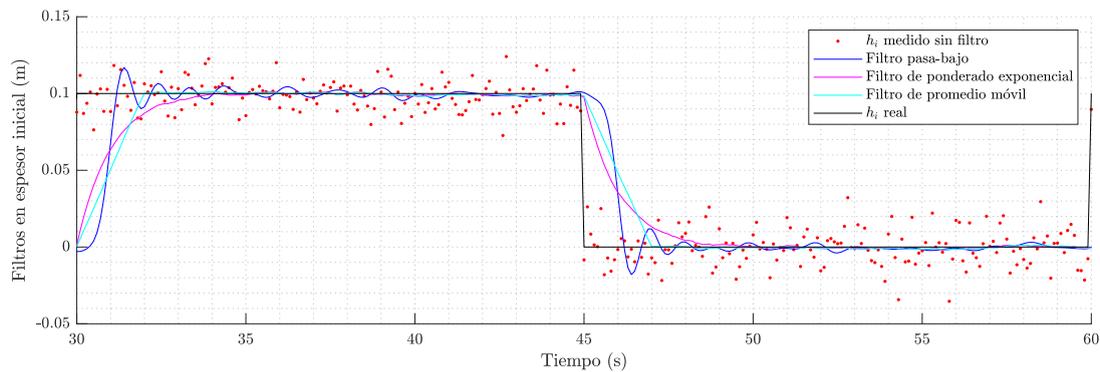


FIGURA 5.15: Desempeño de filtros en medición de espesor inicial.

Además, en la Figura 5.16 se pueden observar los errores que presentan los filtros empleados en la fase estacionaria.

Los ECM en la fase estacionaria de estas señales filtradas son mostrados en la tabla 5.6.

TABLA 5.6: Error cuadrático medio de señales filtradas en medición de espesor inicial.

Método de filtrado	Error cuadrático medio (mm <sup>2</sup> )
Filtro IIR pasa-bajos	$0.2771 \times 10^{-3}$
Promediador con ponderado exponencial	$0.0949 \times 10^{-3}$
Promediador con ventana rectangular	$0.0596 \times 10^{-3}$

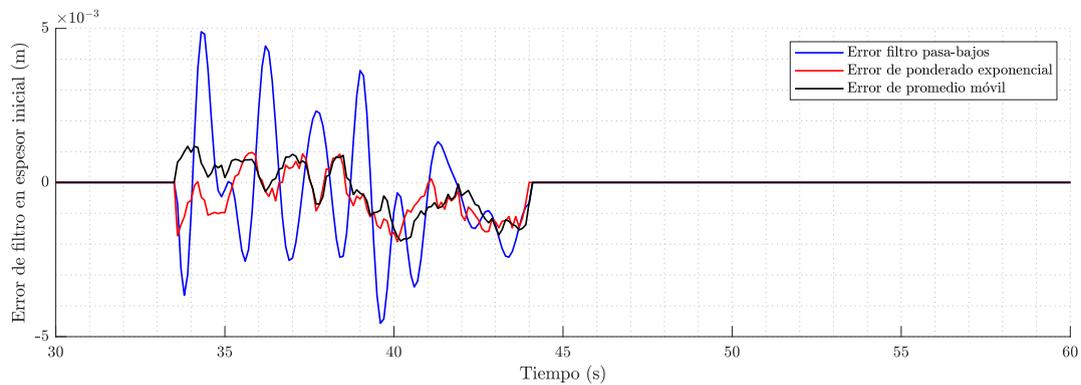


FIGURA 5.16: Error de filtros en medición de espesor inicial.

Se decide usar el filtro promediador con ventana rectangular para el filtrado de esta medición dado que es el que brinda un ECM menor.

#### d) Desempeño de filtros en medición de espesor final

Los parámetros de los diferentes filtros que son probados para filtrar la medición del espesor final se muestran en la tabla 5.7 y los resultados de dicho filtrado se muestran en la Figura 5.17.

TABLA 5.7: Parámetros de filtros probados en la medición del espesor final.

Método de filtrado	Parámetros
Filtro IIR pasa-bajos	Frecuencia de corte = 10 Hz Atenuación = -180 dB Frecuencia de atenuación = 1 Hz
Promediador con ponderado exponencial	Factor de memoria = 0.99
Promediador con ventana rectangular	Tamaño de ventana = 200 muestras

Asimismo, en la Figura 5.18 se pueden observar los errores que presentan los filtros empleados en la fase estacionaria.

Los ECM en la fase estacionaria de estas señales filtradas son mostrados en la tabla 5.8.

Se decide usar el filtro de promediador con ventana rectangular para filtrar esta medición debido a que es el que presenta un ECM menor.

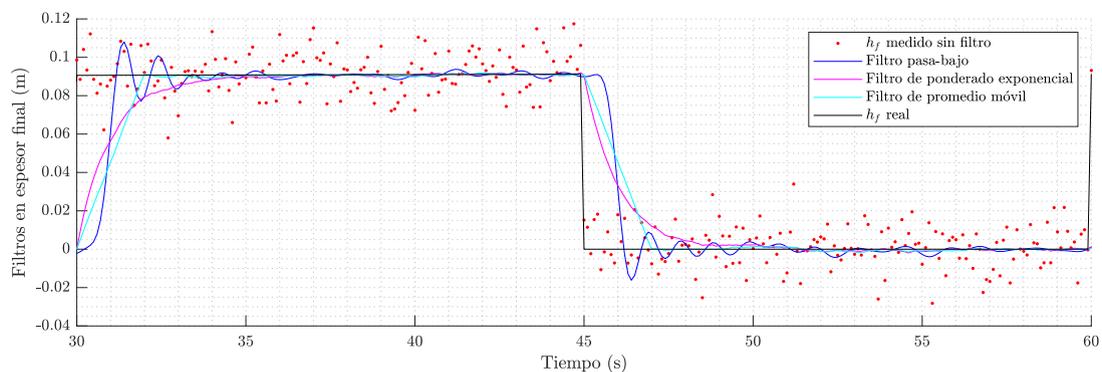


FIGURA 5.17: Desempeño de filtros en medición de espesor final.

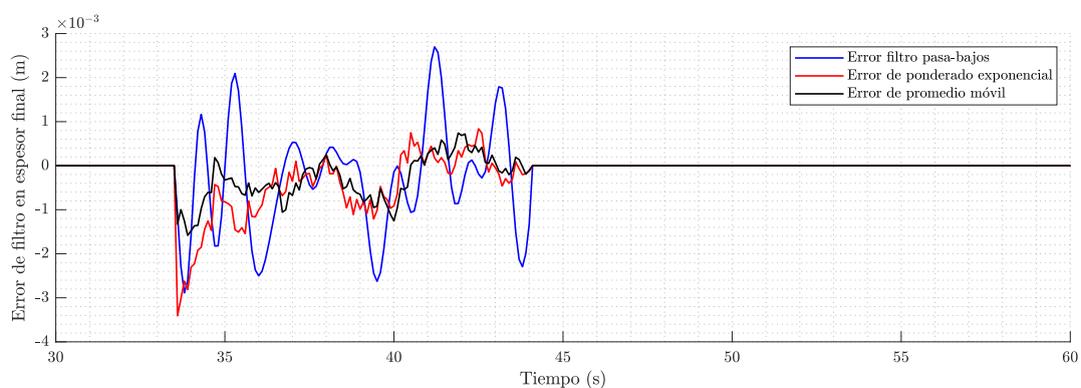


FIGURA 5.18: Error de filtros en medición de espesor final.

TABLA 5.8: Error cuadrático medio de señales filtradas en medición de espesor final.

Método de filtrado	Error cuadrático medio (mm <sup>2</sup> )
Filtro IIR pasa-bajos	$0.2618 \times 10^{-3}$
Promediador con ponderado exponencial	$0.0888 \times 10^{-3}$
Promediador con ventana rectangular	$0.0523 \times 10^{-3}$

Se puede explicar el mejor desempeño del filtro promediador de ventana rectangular por sobre el filtro de ponderado exponencial dado que se está trabajando solamente con el periodo de tiempo determinado por la señal  $p_1$ , la cual hace que solo se tomen en cuenta las mediciones ocurridas en la fase estacionaria de la laminación de cada palanquilla, esto con el fin de no considerar el lapso de tiempo que demoran los filtrados para acercarse a la señal sin ruido. Como se puede observar en las Figuras 5.12, 5.14, 5.16 y 5.18, este periodo está comprendido desde el segundo 33.5 hasta el segundo 44 aproximadamente. Por

lo tanto, las señales sin ruido consideradas presentan una variación muy lenta a lo largo del tiempo. El hecho de que se tome una gran cantidad de muestras y de que todas tengan el mismo peso para calcular el promedio filtra mejor el ruido de medición comparado a si se le da más peso a la ultima muestra que a las anteriores.

Sin embargo, si se hubiese considerado todas las muestras entregadas por los filtros, es decir, si la señal  $p_1$  no hubiese hecho una selección de las muestras en la fase estacionaria de las mediciones, los desempeños de los filtros hubieran sido diferentes. Como se puede observar en las Figuras 5.11, 5.15 y 5.17, el filtrado realizado por el filtro de ponderado exponencial logra acercarse a la señal sin ruido más rápidamente que el filtrado entregado por el promediador de ventana rectangular en los segundos 30 y 45 de la simulación. Esto se debe a que, al asignar un peso mayor a la última muestra en comparación a las anteriores, el filtro de ponderado exponencial responde más rápidamente a cambios bruscos en la señal original.

### 5.2.3 Estimación teórica del espesor final con señales filtradas

La estimación teórica del espesor final es obtenida con las ecuaciones (4.8), (4.9) y (4.10). La gráfica de esta estimación es mostrada en la Figura 5.19.

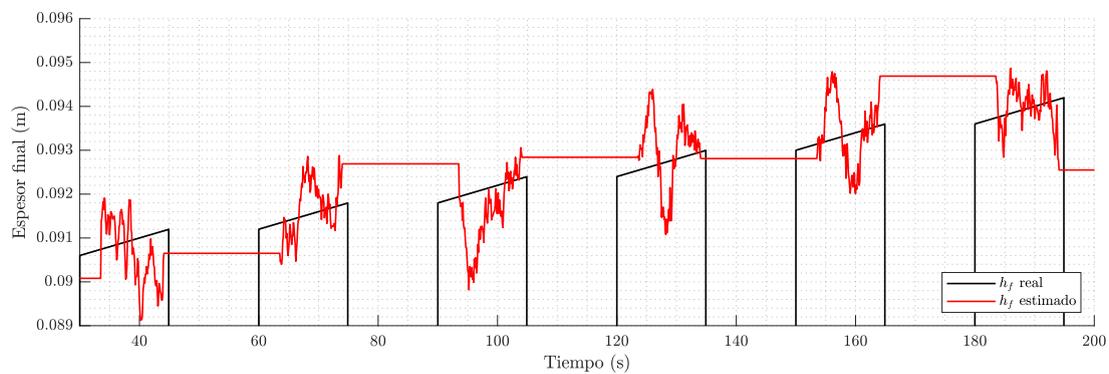


FIGURA 5.19: Estimación teórica del espesor final.

Al igual que el filtrado de las señales medidas, este cálculo es habilitado por la señal  $p_1$ . A pesar de que esta operación se realizó con señales filtradas, la estimación teórica aún presenta ruido, por lo que se procedió a implementar un filtro adicional para esta nueva señal.

Los parámetros de los diferentes filtros que son probados para filtrar la estimación teórica del espesor final se muestran en la tabla 5.9 y los resultados de dicho filtrado se muestran en la Figura 5.20.

TABLA 5.9: Parámetros de filtros probados en la estimación del espesor final.

Método de filtrado	Parámetros
Filtro IIR pasa-bajos	Frecuencia de corte = 2 Hz Atenuación = -180 dB Frecuencia de atenuación = 0.2 Hz
Promediador con ponderado exponencial	Factor de memoria = 0.995
Promediador con ventana rectangular	Tamaño de ventana = 400 muestras

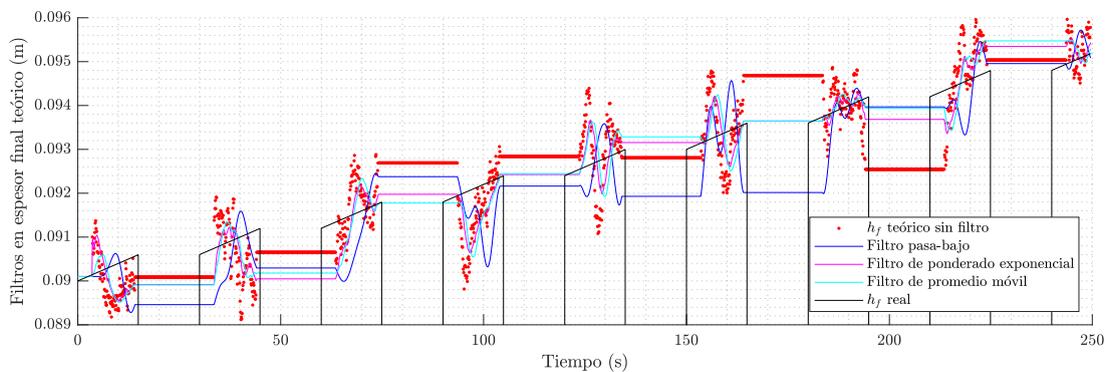


FIGURA 5.20: Desempeño de filtros en estimación de espesor final.

Por otro lado, en la Figura 5.21 se pueden observar los errores que presentan los filtros empleados en la fase estacionaria.

Los ECM en la fase estacionaria de estas señales filtradas son mostrados en la tabla 5.10.

Se decide usar el filtro de ponderado exponencial dado que este es el que, en este caso, brinda un ECM menor, por lo que es menos probable que un pico de error de esta

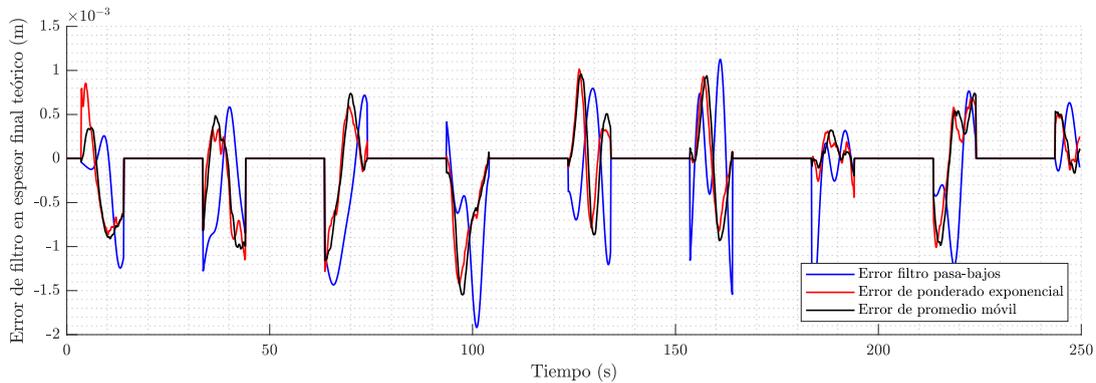


FIGURA 5.21: Error de filtros en estimación de espesor final.

TABLA 5.10: Error cuadrático medio de señales filtradas en estimación teórica de espesor final.

Método de filtrado	Error cuadrático medio (mm <sup>2</sup> )
Filtro IIR pasa-bajos	$0.1383 \times 10^{-3}$
Promediador con ponderado exponencial	$0.0445 \times 10^{-3}$
Promediador con ventana rectangular	$0.0544 \times 10^{-3}$

señal sobrepase un predeterminado umbral de corrección, lo que evitará que se ejecute un ajuste en la distancia entre los rodillos cuando no sea necesario.

#### 5.2.4 Fusión de data con filtro de Kalman

Con las varianzas de los errores de los filtros seleccionados para la estimación teórica y la medición del espesor final, es posible obtener una estimación óptima en caliente con (4.11), cuyo error cuadrático medio es de  $0.2980 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$ . La gráfica de esta estimación se puede observar en la Figura 5.22 y el error que esta presenta se puede observar en la Figura 5.23.

Finalmente, con la estimación óptima en caliente, se puede obtener una estimación óptima en frío usando (5.6). Se consideró un coeficiente de dilatación térmica lineal para el acero  $\gamma = 11.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  y una diferencia de temperaturas  $|\Delta T| = 1220 \text{ }^\circ\text{C}$ .

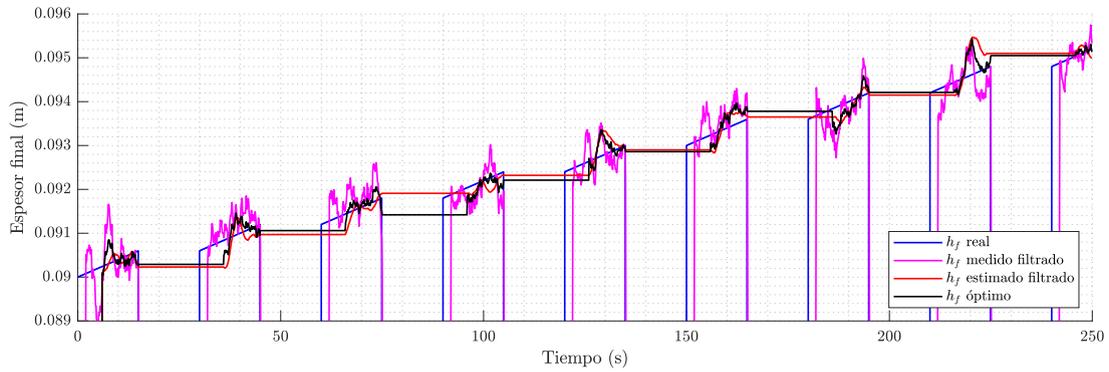


FIGURA 5.22: Fusión de data de espesor final con filtro de Kalman.

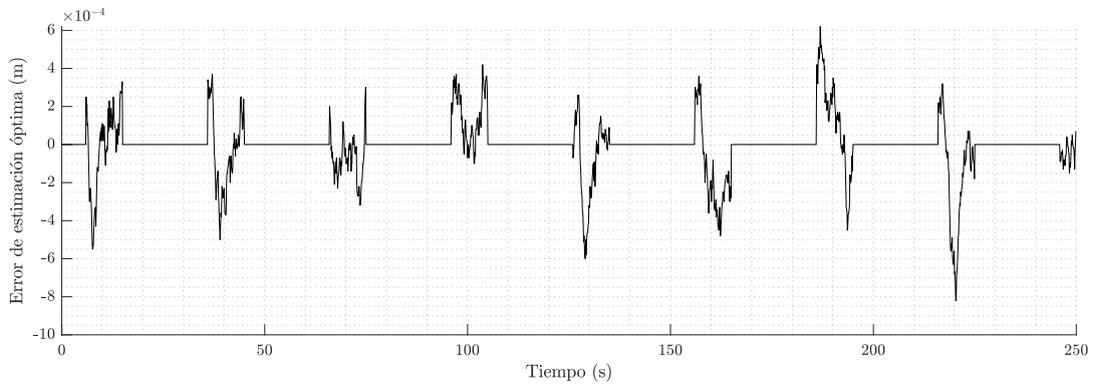


FIGURA 5.23: Error de la estimación óptima del espesor final.

$$h_{\text{frío}} = \frac{h_{\text{caliente}}}{1.014} \quad (5.6)$$

### 5.2.5 Corrección del espesor final

Una vez se tiene de una estimación óptima, es posible implementar el sistema de control del actuador que modifica la distancia entre los rodillos para corregir el espesor final.

Para los umbrales alto y bajo del relay mostrado en la Figura 4.7 se escogieron los valores de 0.092 m y 0.089 m respectivamente. Por otro lado, para la lógica de actualización del setpoint del actuador mostrada en la Figura 4.8, se asumió un valor inicial para

el setpoint de 0 rad y se escogió un incremento de 300 rad por corrección, asumiendo que ese es el valor adecuado para el actuador que trabajaría en conjunto con una caja de reducción para acercar los rodillos al accionar los husillos.

El controlador escogido para el actuador es del tipo PD con ganancias proporcional y derivativa de 1 y una saturación de  $\pm 24$  V. La función de transferencia del actuador simulado se muestra en (5.7).

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{23}{0.5s^2 + s} \quad (5.7)$$

En la Figura 5.24, se muestra como la estimación óptima en frío  $h_{f\text{río}}$  sobrepasa poco después del segundo 150 de simulación el umbral alto mencionado anteriormente y, por consiguiente, el setpoint del actuador es actualizado. Sin embargo, en la Figura 5.25 se puede observar que la corrección accionada por el actuador no ocurre hasta que la señal "Habilitar corrección" lo permite.

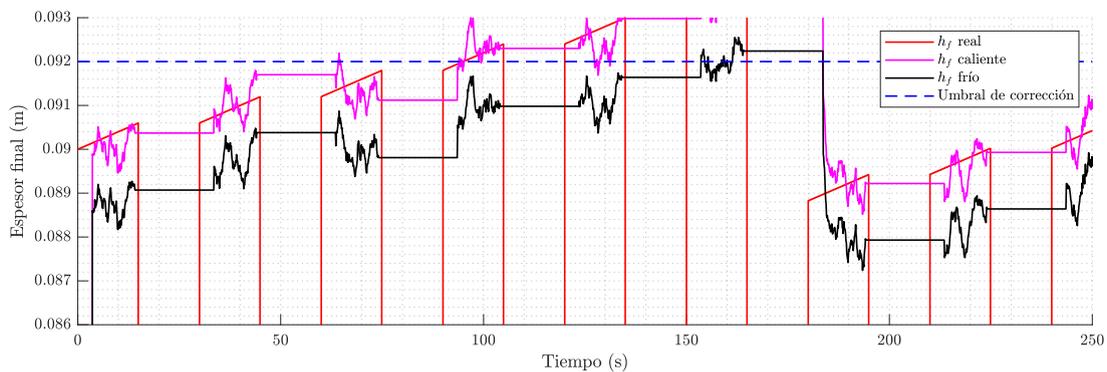


FIGURA 5.24: Estimación óptima del espesor final en frío y umbral de corrección.

### 5.3 Desempeño ante el ruido

En la tabla 5.11 se muestran los errores cuadráticos medios de las estimaciones óptimas del espesor final en relación a las varianzas que presentan los ruidos de medición.

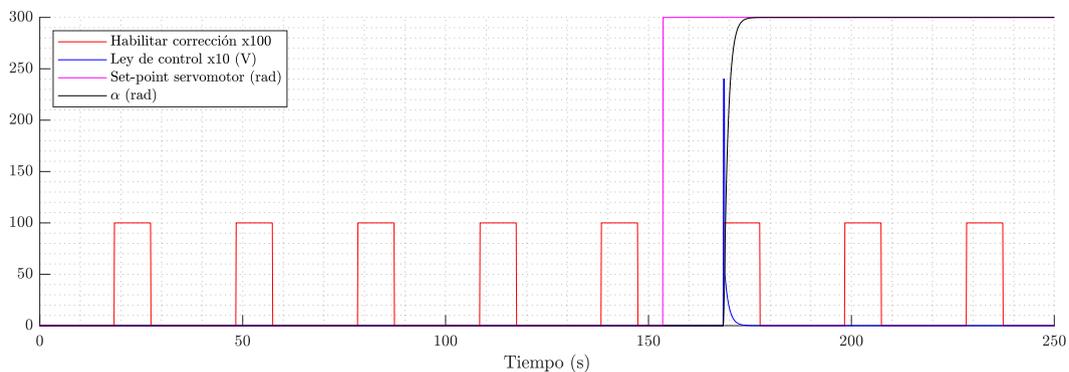


FIGURA 5.25: Actualización del setpoint del actuador.

Dichas varianzas se encuentran en proporción a las respectivas varianzas de las magnitudes simuladas antes de que se les añada ruido de medición.

TABLA 5.11: Errores cuadráticos medios en relación a las varianzas de los ruidos de medición.

Varianzas de los ruidos	Error cuadrático medio (mm <sup>2</sup> )
1 % de las varianzas de las señales sin ruido	$0.1383 \times 10^{-4}$
5 % de las varianzas de las señales sin ruido	$0.2980 \times 10^{-4}$
10 % de las varianzas de las señales sin ruido	$0.4292 \times 10^{-4}$
30 % de las varianzas de las señales sin ruido	$0.1046 \times 10^{-3}$

Adicionalmente, se realizaron pruebas para determinar cuán atrasadas o adelantadas son las correcciones de espesor. Se simula el funcionamiento del algoritmo de control por un tiempo de 30000 segundos (equivalente a la laminación de 1000 palanquillas) para cada magnitud de varianza de los ruidos. En la tabla 5.12 se muestra la cantidad de veces que se corrigió el espesor y cuántas de estas veces dichas correcciones estuvieron adelantadas o atrasadas en función a la varianza de los ruidos de medición.

TABLA 5.12: Cantidad de adelantos y retrasos en correcciones.

% de varianza	$N_c$	$A_2$	$A_1$	$A_0$	$A_{-1}$
1 %	128	0	21	102	5
5 %	127	5	87	34	1
10 %	127	47	63	17	0
30 %	126	103	19	4	0

Donde  $N_c$  equivale al número total de correcciones ejecutadas,  $A_1$  y  $A_2$  son la cantidad de veces en que dichas correcciones fueron adelantadas por 1 y 2 palanquillas respectivamente,  $A_0$  es la cantidad de veces en que dichas correcciones fueron ejecutadas a tiempo y  $A_{-1}$  es la cantidad de veces en que dichas correcciones se ejecutaron con 1 palanquilla de atraso.

#### **5.4 Fabricación y desempeño del prototipo de laminadora**

En este apartado se presenta la definición del concepto de solución óptimo para el diseño del prototipo funcional. Los componentes comprendidos en este concepto son integrados al prototipo. Seguidamente, se muestran los resultados de la fabricación del prototipo de laminadora y su desempeño.

Conforme lo expuesto en los alcances y limitaciones, no se realiza la estimación teórica para obtener el espesor. Además, no se aplica el filtro de Kalman para fusionar mediciones, ya que se utiliza un único sensor para la medición de espesor, ubicado en la parte superior del prototipo y que lee la distancia entre el propio sensor y la cara superior de la palanquilla. Esto fue posible debido a que el rodillo inferior no se desplaza, lo cual, a su vez, implica que la cara inferior de la palanquilla laminada se encuentra siempre a la misma altura. También se asume que los ruidos del sensor y del sistema en general tienen un comportamiento gaussiano con distribuciones conocidas. Luego, se muestra el comportamiento de la ventana de tiempo que indica el momento en el que puede corregirse la distancia entre los ejes de los rodillos. Finalmente, se grafica la posición angular de los husillos en el tiempo cuando se realiza esta corrección.

##### **5.4.1 Definición del concepto de solución óptima para la fabricación del prototipo**

Los conceptos de solución para el diseño y fabricación del prototipo presentados en la matriz morfológica de la Figura 4.12 son evaluados conforme a los requerimientos.

En tal sentido, el concepto 2 resulta ser más funcional al propósito del proyecto. Este permite construir el sistema de laminación desde el inicio, a diferencia del concepto de solución 1, el cual consiste en adaptar una laminadora de masa de pan para su automatización.

De esta manera, el concepto de solución 2 es el óptimo y se diseña el prototipo con las opciones de componentes que este comprende, las cuales se muestran en la tabla 5.13.

TABLA 5.13: Componentes del concepto de solución óptimo para el diseño del prototipo.

Función	Componente	Característica
Laminar	Tubos de Aluminio	Diámetro de 3 pulgadas
Convertir energía en torque (Rodillos)	Motores DC	Velocidad máxima de 100 RPM. Torque máximo de 34 kg.cm.
Convertir energía en torque (Husillos)	Motores paso a paso Nema 23	200 pasos por revolución. Par de retención de 0.55 kg.cm.
Sensar (espesor)	Sensor infrarrojo	Rango de detección entre 10 y 80 cm.
Sensar (velocidad)	Encoder de efecto Hall	Acoplado a los motores DC.
Controlar (Lectura y escritura de sensores y actuadores)	Arduino Mega	Transmisión de datos por comunicación serial hacia Simulink.

En tal sentido, la Figura 5.26 resume las principales características de los componentes seleccionados para realizar las funciones en las que se basa el diseño del prototipo.

#### 5.4.2 Fabricación del prototipo de laminadora

El proceso de fabricación es realizado tomando como referencia el modelo 3D del prototipo de laminadora de la Figura 5.26. Este empieza con la construcción de los rodillos y su acoplamiento con los husillos. Luego se procede a realizar la conexión entre

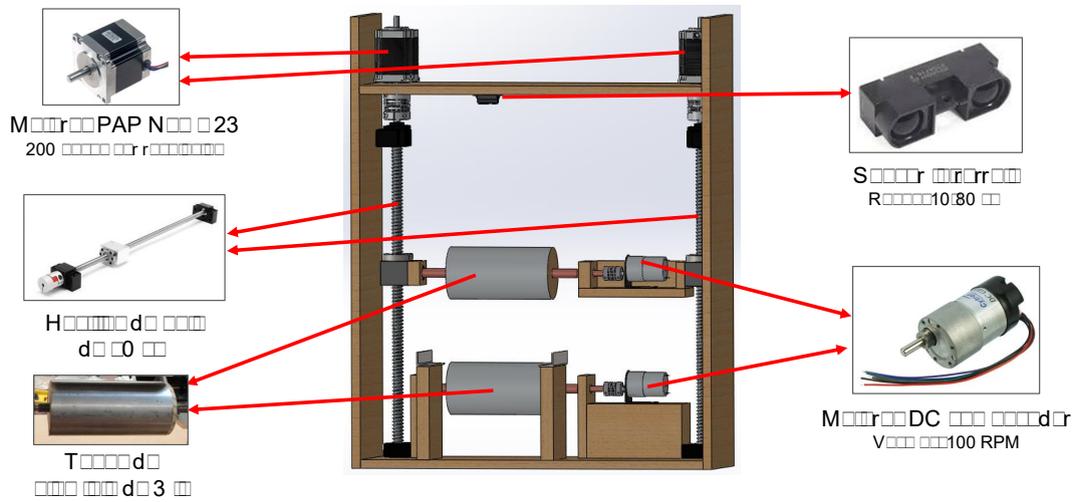


FIGURA 5.26: Modelo 3D del prototipo y componentes seleccionados.

los distintos componentes electrónicos a utilizar, según el diagrama de conexión de pines mostrado en la Figura 5.27.

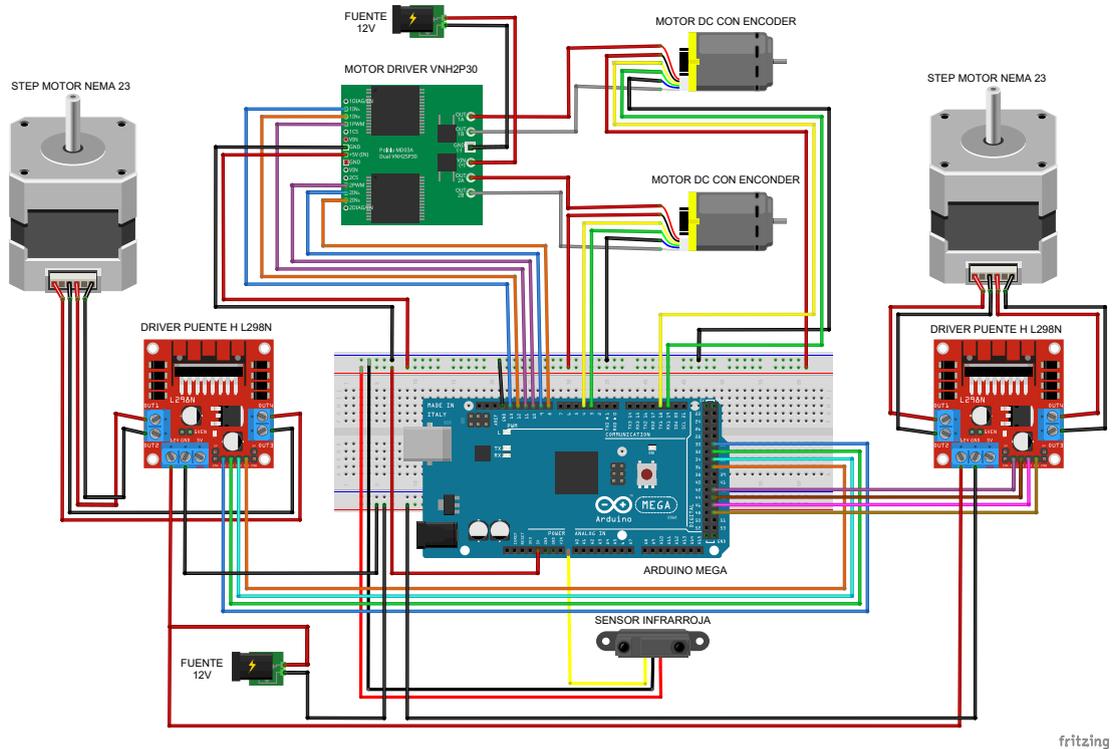


FIGURA 5.27: Disposición de pines de los componentes del prototipo.

Una vez integrados todos los componentes, el prototipo funcional a escala terminado se muestra en la Figura 5.28. Además, se muestra la pieza de espuma utilizada para las pruebas de laminación. Esta se encuentra sobre la bandeja de salida luego de pasar por los rodillos. También se puede observar detrás de la tapa superior a uno de los motores paso a paso que mueven de forma sincronizada los husillos para el ajuste del espesor.

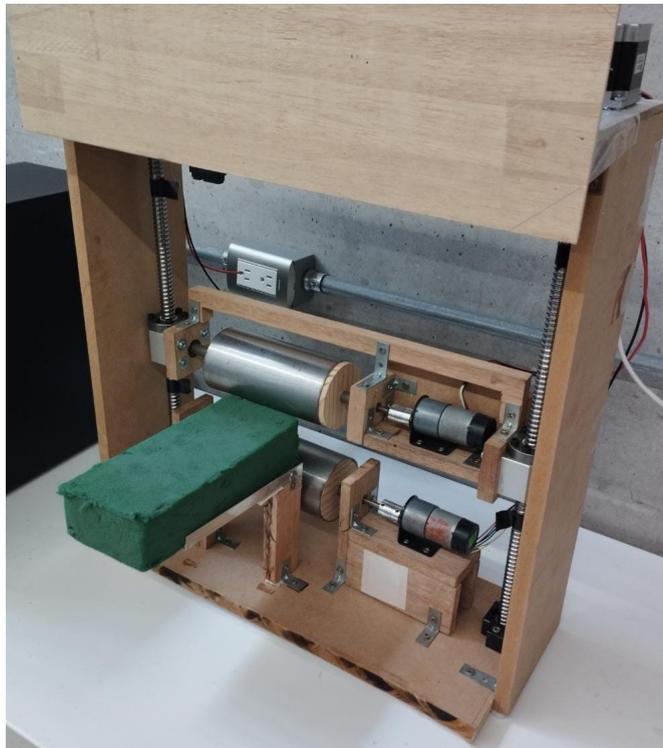


FIGURA 5.28: Prototipo funcional a escala de laminadora y palanquilla de espuma.

### 5.4.3 Medición de espesor de palanquillas

Culminada la etapa de fabricación, se procede a implementar el algoritmo de control del espesor y validar su desempeño en el prototipo funcional de laminadora.

En primer lugar, luego de haber calibrado el sensor infrarrojo, se obtienen las mediciones del espesor de las palanquillas de espuma a la salida del laminador con un tiempo de muestreo de 0.05 segundos durante 100 segundos. Dicha medición se puede

observar en la Figura 5.29. La medición manual de esta magnitud entregó un resultado de 55 mm.

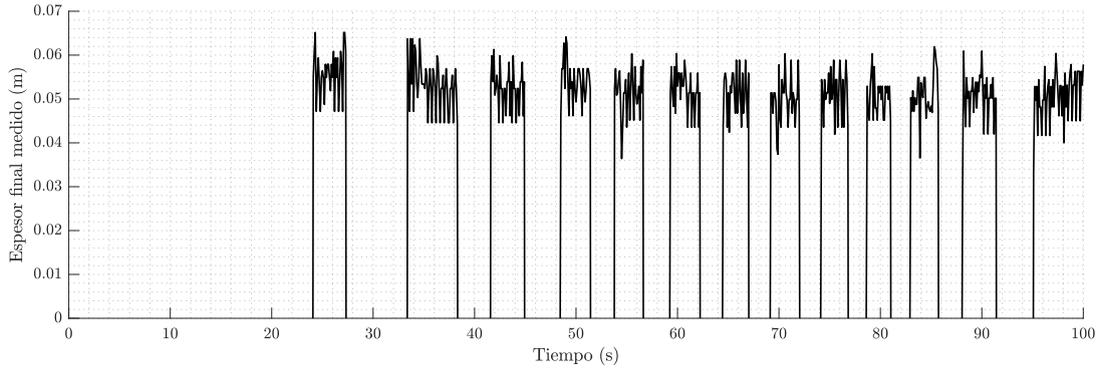


FIGURA 5.29: Medición del espesor final de la pieza de espuma.

Los valores cercanos a 0.055 m representan las mediciones de espesor de las palanquillas que fueron laminadas por el prototipo, los demás valores representan la ausencia de palanquilla en el laminador.

Adicionalmente, se realiza una lectura de 120 segundos para obtener una muestra del ruido de medición que entrega el sensor infrarrojo. Dicho ruido posee una varianza de  $8.0724 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ . La lectura se puede observar en la Figura 5.30.

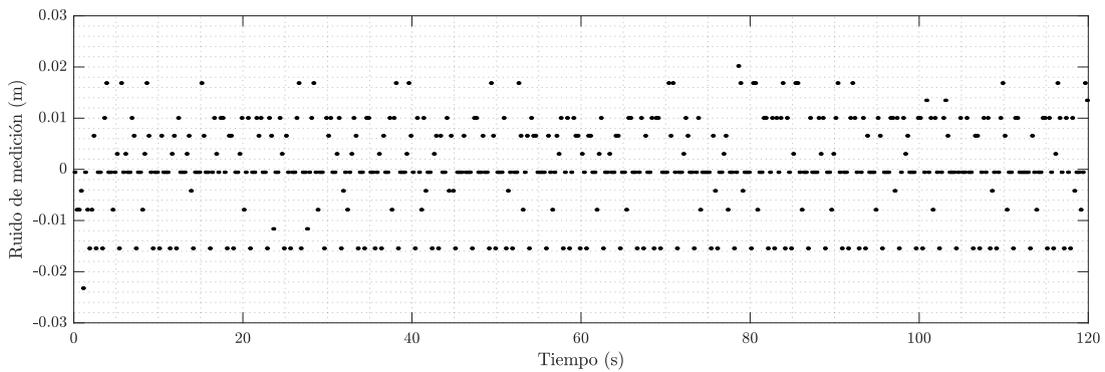


FIGURA 5.30: Ruido de medición entregado por el sensor infrarrojo.

En la Figura 5.31, se puede observar el histograma realizado sobre el ruido de medición. Dicho histograma muestra que el ruido de medición no se aproxima al ruido blanco gaussiano que se usó para simular el funcionamiento del algoritmo de control.

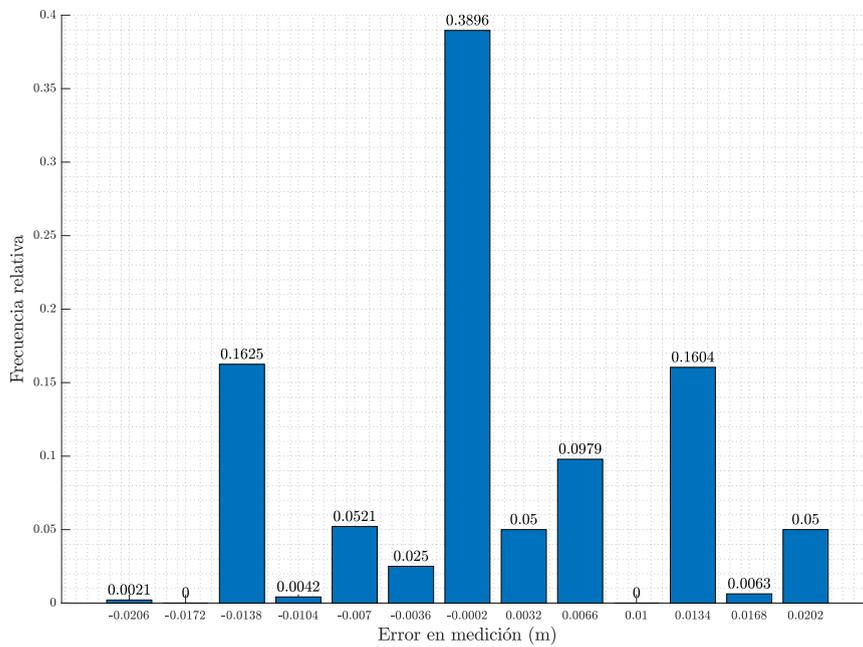


FIGURA 5.31: Histograma del ruido de medición entregado por el sensor infrarrojo.

#### 5.4.4 Filtrado de medición de espesor de palanquillas

Una vez medido el espesor de las piezas de espuma, se procede a filtrar dicha medición con los mismos 3 tipos de filtros considerados en el apartado de simulación. Los resultados de estos filtros se muestran en la Figura 5.32.

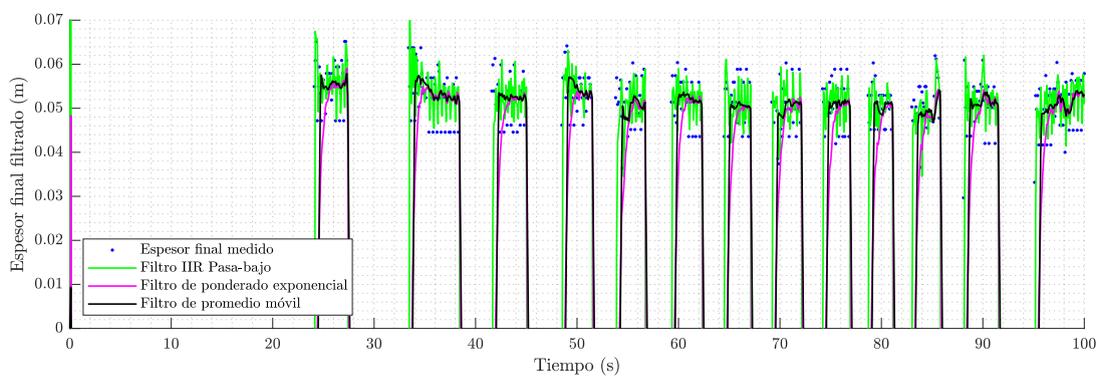


FIGURA 5.32: Medición filtrada del espesor final de la pieza de espuma.

En la tabla 5.14, se muestran los parámetros de los filtros que se usaron, los cuales fueron ajustados empíricamente de tal manera que se obtenga el filtrado menos ruidoso e inexacto posible.

TABLA 5.14: Parámetros de filtros probados en la medición real del espesor final.

Método de filtrado	Parámetros
Filtro IIR pasa-bajos	Frecuencia de corte = 4 Hz Atenuación = -180 dB Frecuencia de atenuación = 1 Hz
Promediador con ponderado exponencial	Factor de memoria = 0.99
Promediador con ventana rectangular	Tamaño de ventana = 200 muestras

De los 3 filtros probados, los promediadores son los que presentan un menor error. Adicionalmente, si se compara ambos filtros, se puede observar que el promediador con ventana rectangular es el que se acerca más rápidamente a lo que sería la magnitud real. Por tal motivo, se decide usar este último en el algoritmo de control.

#### 5.4.5 Generación y funcionamiento del pulso habilitador de estimación

Para recolectar únicamente la información del filtrado que corresponde al espesor de las palanquillas y descartar la información correspondiente a la ausencia de palanquillas en el prototipo, se utiliza la lógica descrita en el diagrama de flujo de la Figura 4.6, la cual hace uso del pulso  $p_1$ , cuyo comportamiento temporal es similar al descrito anteriormente en el segundo punto de la subsección 4.2.1. En la Figura 5.33 se puede observar dicho pulso generado durante el funcionamiento del prototipo.

Sabiendo el valor de  $p_1$ , se pueden obtener los valores del espesor final únicamente, cuya gráfica se observa en la Figura 5.34.

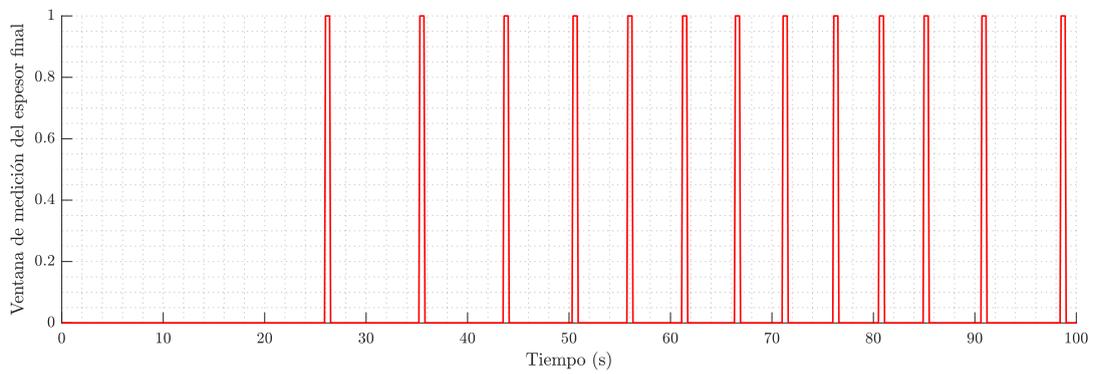


FIGURA 5.33: Pulso de habilitación de recolección de medición  $p_1$ .

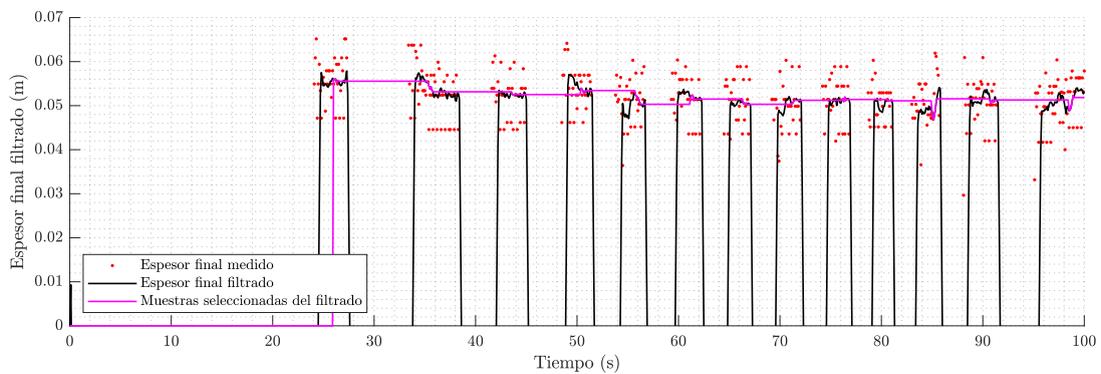


FIGURA 5.34: Muestras seleccionadas del filtrado del espesor final.

#### 5.4.6 Error del espesor de las palanquillas

Una vez se tiene la selección de muestras del espesor final, si se le resta el espesor de referencia deseado de 50 mm, se puede calcular el error de espesor que entrega el laminador. Este error se muestra en la Figura 5.35.

Se puede observar que el error de espesor supera un umbral predeterminado de 5 mm cerca del segundo 26 de funcionamiento.

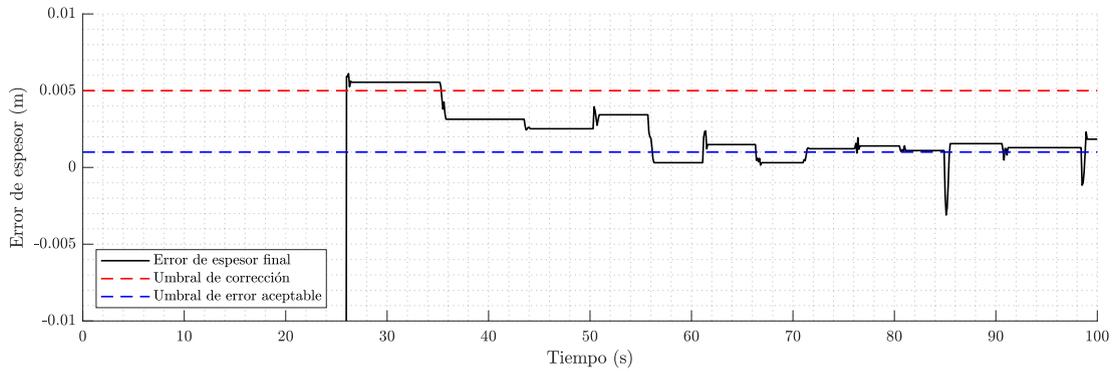


FIGURA 5.35: Error de espesor final.

#### 5.4.7 Generación y funcionamiento de la ventana habilitadora de corrección

De manera similar al pulso  $p_1$ , se utiliza la ventana  $p_2$  explicada anteriormente en la subsección 4.2.2 para determinar el momento en el que se pueden accionar los motores paso a paso para corregir la distancia entre los ejes de los rodillos. El comportamiento de esta ventana a lo largo del tiempo se puede observar en la Figura 5.36.

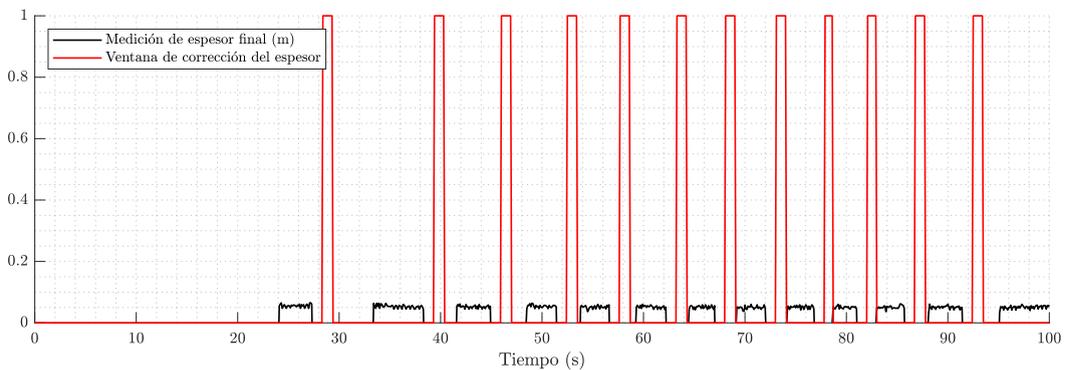


FIGURA 5.36: Ventana de corrección de espesor final  $p_2$ .

Dado que el error de espesor superó el umbral de los 5 mm, los motores paso a paso acoplados a los husillos empiezan a hacerlos girar hasta que estos alcanzan el setpoint de  $2\pi$  radianes de posición angular, así como se muestra en la Figura 5.37. Esta posición angular es equivalente a 5 mm de reducción en la distancia entre los rodillos. En la Figura

5.35 se puede observar que se alcanzó el umbral de error aceptable cuando la posición angular de los husillos alcanzó su setpoint.

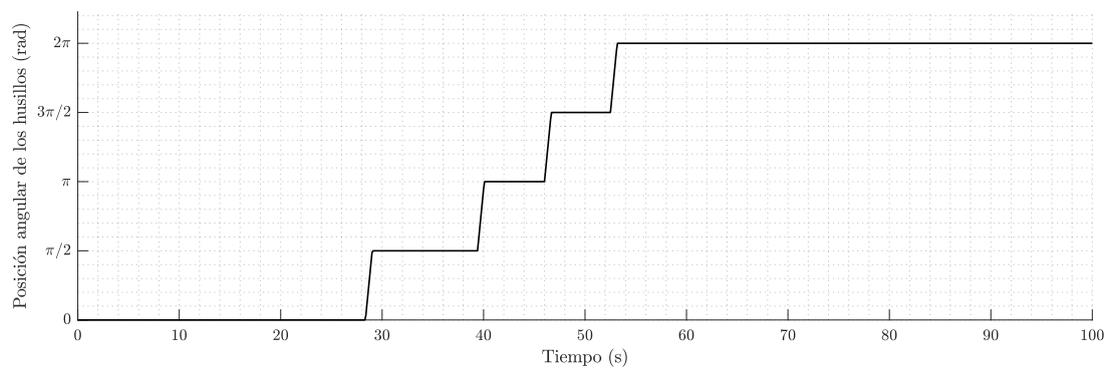


FIGURA 5.37: Posición angular de los husillos.

## CONCLUSIONES

En esta tesis se propone un sistema de ajuste automático del espesor de palanquillas laminadas en caliente. Para ello se desarrolla un algoritmo del control, el cual considera el desgaste gradual que presentan los rodillos de laminación y realiza la corrección de la distancia que los separa. Este es validado en una simulación desarrollada a partir del modelo matemático del proceso de laminación. Además, se construye un prototipo a escala reducida que permite validar el concepto del algoritmo propuesto.

El modelo matemático del proceso de laminación de palanquillas se propone a partir de las ecuaciones de potencia requerida para el laminado (4.8), (4.9) y (4.10). Este se diseña considerando la reducción del radio de los rodillos debido al desgaste y las propiedades del acero en las condiciones típicas de temperatura a las que se desarrolla el proceso. Usando este modelo matemático, se simula un sistema de control PI con prefiltro y saturador que permite controlar la velocidad del sistema de laminación, impidiendo que esta aumente progresivamente a causa del desgaste de los rodillos.

Además, se diseña el algoritmo de control retroalimentado que corrige el espesor de las palanquillas en el proceso de laminación. Este realiza la estimación óptima del espesor mediante la fusión por filtro de Kalman de la estimación teórica del espesor final filtrada y la medición del espesor final filtrada. El algoritmo es capaz de actualizar el setpoint del actuador cuando el error del espesor obtenido sobrepasa un umbral predefinido. Para realizar la corrección del espesor, se utiliza un lazo de control PD en el

actuador que ajusta la distancia entre los rodillos siguiendo el setpoint entregado por el algoritmo, basado en la estimación óptima antes mencionada. Además, la corrección no es ejecutada hasta que no haya presencia de palanquillas en el laminador.

Para simular su desgaste a lo largo del tiempo, se diseña un tren de pulsos que logra simular el suministro de las palanquillas y una función de reducción del radio de los rodillos. Luego, para analizar la robustez del control se añade ruido en las mediciones de las variables involucradas en la estimación teórica del espesor final. Posteriormente, se implementa diferentes tipos de filtros, entre ellos, pasa-bajos, promediadores de ventana rectangular móvil y ponderado exponencial. Al realizar el filtrado de la estimación teórica resultante, es el filtro promediador con ponderado exponencial el que ofrece un mejor filtrado, dado que su error cuadrático medio es el más reducido. Esto implica una menor probabilidad de picos de error que sobrepasen el umbral de corrección cuando no corresponda. El resultado en simulación de la estimación óptima del espesor final presenta un error cuadrático medio de  $0.2980 \times 10^{-10} \text{ m}^2$  cuando se añaden ruidos de medición con varianzas equivalentes al 5 % de las varianzas de las magnitudes medidas.

De igual manera, se diseña y fabrica un prototipo de laminadora con componentes accesibles y a escala reducida, para validar el concepto del algoritmo de control propuesto. En tal sentido, el algoritmo implementado en el prototipo es adaptado por las diferencias que existen con un sistema de laminado industrial, de modo que no es posible incluir la estimación teórica del espesor final de las palanquillas. Pese a ello, el prototipo permite conocer la naturaleza del ruido de las mediciones y corroborar el comportamiento de los filtros implementados en simulación. Asimismo, se logra implementar el control de espesor propuesto, el cual realiza la corrección cuando el error supera un umbral de 5 mm respecto al setpoint. Esta acción se realiza cuando no hay presencia de palanquillas en el laminador y hasta que se obtiene un espesor final que se encuentre dentro de un umbral de error predeterminado de 1 mm (2 % del valor del espesor de referencia), el cual cumple con los requerimientos de este prototipo.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar mejorando aspectos relacionados a la elaboración del modelo matemático de laminación y al resto del algoritmo de control. A continuación, se listan varios puntos a mejorar.

- a) Incluir el efecto de perturbaciones del tipo escalón y del ruido coloreado en las mediciones realizadas para estimar teóricamente el espesor final de las palanquillas, así como la implementación de un proceso en el algoritmo de control encargado del rechazo de dichas perturbaciones.
- b) Realizar una estimación teórica de las eficiencias de las cajas de reducción en el motor de laminación e incluir dicha eficiencia en el modelo matemático de la laminadora.
- c) Considerar el consumo de potencia extra ocasionado por el rozamiento que existe entre los laterales de la palanquilla con el rodillo de laminación.
- d) Se recomienda implementar un algoritmo de fusión de estimaciones óptimo para señales con otros ruidos aparte del gaussiano, dado que no siempre se cuenta con este tipo de ruido en mediciones realizadas por sensores industriales.
- e) Se recomienda escalar la propuesta del algoritmo de control al implementarlo sucesivamente en un tren de laminación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. R. S. Serope Kalpakjian, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, 5th ed. Pearson Education, 2008.
- [2] J. Ibarra, “Optimización de un modelo de desgaste de cilindros en el tren continuo de laminación en caliente de sidor c. a.” [Online]. Available: [http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde\\_arquivos/8/TDE-2006-04-18T11:31:46Z-23/Publico/Jose%20Ibarra.pdf](http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde_arquivos/8/TDE-2006-04-18T11:31:46Z-23/Publico/Jose%20Ibarra.pdf)
- [3] R. Karásek and P. Vitoslavský, *Measuring of rolled strip profile*, UVB TECHNIK s.r.o., Hlucin, República Checa. Brochure, 2006. [Online]. Available: <http://www.uvbtechnik.cz/data/files/brochure-2006-uvb-mpp-en-40-en.pdf>
- [4] J. Tarradellas, *Prevención de riesgos laborales en el sector del metal*, MC Mutual, Barcelona, España, 2008. [Online]. Available: [https://www.mc-mutual.com/documents/20143/47599/manual\\_metal\\_es.pdf/48a058b5-06cc-3540-0143-4d5d6bbc4812](https://www.mc-mutual.com/documents/20143/47599/manual_metal_es.pdf/48a058b5-06cc-3540-0143-4d5d6bbc4812)
- [5] P. Salas, “Propuesta de mejora en el área del tren de laminación de acero mediante la reducción del tiempo de cambio de formato a través del uso de herramientas de optimización matemática y herramientas de manufactura esbelta.” [Online]. Available: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/15590>
- [6] ”MadeinChina”. (2015) Medidor de espesor para Laminador reversible. [Online]. Available: [https://es.made-in-china.com/co\\_moranchina/product\\_Thickness-Gauge-for-Reversible-Rolling-Mill\\_rosoohyyg.html](https://es.made-in-china.com/co_moranchina/product_Thickness-Gauge-for-Reversible-Rolling-Mill_rosoohyyg.html)
- [7] W. Hong, “Hot strip width control method by using looper tension measuring system in finishing mill,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 111, pp. 74–78, Abril 2001.

- [8] H. Imanari, “Looper h-infinity control for hot strip mills,” *IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting*, vol. 3, no. 1, pp. 2133–2139, Abril 1995.
- [9] LAP, “Non-contact thickness measurement of flat products,” Brochure, 2018. [Online]. Available: [https://dwqqsnnxyt153.cloudfront.net/fileadmin/user\\_upload/en/industries/steel\\_industry/brochure\\_thickness\\_check.pdf](https://dwqqsnnxyt153.cloudfront.net/fileadmin/user_upload/en/industries/steel_industry/brochure_thickness_check.pdf)
- [10] R. Fox, “Rolling mill gauge control method and apparatus including speed correction,” U.S. Patent 3,851,509, Diciembre. 1974.
- [11] J. L. Enríquez, E. Tremps, S. de Elío, and D. Fernández, *Laminación*, Arquitectura Técnica, Madrid, Enero 2010. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/2074/>
- [12] J. G. TOH, “Literature review on newly developed hot rolling techniques of steel.” [Online]. Available: [https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:2f2b623/Jie\\_Guang\\_Toh\\_thesis.pdf](https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:2f2b623/Jie_Guang_Toh_thesis.pdf)
- [13] J. A. Schey, *Procesos de Manufactura*, 3rd ed. The McGraw-Hill Companies, Inc, 2000.
- [14] J. W. Robert L. Mott, Edward M. Vavrek, *Machine Elements in Mechanical Design*, 6th ed. Pearson Education, 2018.
- [15] U. P. de València. (2003) Efectos mecánicos de la dilatación térmica. [Online]. Available: [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm11/pfcm11\\_3\\_3.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm11/pfcm11_3_3.html)
- [16] E. Jara A., “Proposals for on-line computational modeling of highly nonlinear time series and systems data,” Ph.D. dissertation, University of Campinas, 2019.
- [17] P. Young, *Recursive Estimation and Time-Series Analysis: An Introduction for the Student and Practitioner*. Springer Berlin Heidelberg. [Online]. Available: <https://books.google.com.pe/books?id=X-h1i61ApDEC>

- [18] MathWorks. (2016) Moving Average. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/dsp/ref/movingaverage.html>
- [19] Yan Pei, Swarnendu Biswas, Donald S. Fussell, Keshav Pingali, “An elementary introduction to kalman filtering,” *Communications of the ACM, Volume 62, Issue 11*, 2019.
- [20] P. S. Maybeck, *Stochastic models, estimation, and control*, ser. Mathematics in Science and Engineering, 1979, vol. 141.
- [21] R. E. Kalman, “A new approach to linear filtering and prediction problems,” *Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. Series D, pp. 35–45, 1960.
- [22] G. Hwang, H.-S. Ahn, D.-H. Kim, T.-W. Yoon, S.-R. Oh, and K.-B. Kim, “Design of a robust thickness controller for a single-stand cold rolling mill,” in *Proceeding of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications IEEE International Conference on Control Applications held together with IEEE International Symposium on Intelligent Contro*, 1996, pp. 468–473.
- [23] K. Ulrich and S. Eppinger, “Product desing and development,” *5th Edition, New York: McGraw-Hill, 2012*.
- [24] R. Canale and D. Steven C. Chapra, *Métodos Numéricos para Ingenieros*. McGraw-Hill Education, 2014. [Online]. Available: <https://books.google.com.pe/books?id=avsMnQEACAAJ>
- [25] W. Roberts, *Hot Rolling of Steel*, ser. Manufacturing Engineering and Materials Processing. Taylor & Francis, 1983. [Online]. Available: [https://books.google.com.pe/books?id=pqt\\_DwrJcXIC](https://books.google.com.pe/books?id=pqt_DwrJcXIC)
- [26] Delta, “Dilas ft 1800,” Brochure, 2021. [Online]. Available: [https://www.deltasensor.eu/images/documents/FT1800/FT1800\\_e1460.0721.pdf](https://www.deltasensor.eu/images/documents/FT1800/FT1800_e1460.0721.pdf)

- [27] Micro-Epsilon, “Inspection systems for the metal industry,” Brochure. [Online]. Available: <https://www.industry-plaza.com/medias/5/4/9/011969945.pdf>
- [28] ”Material-mundial”. (2019) SAE AISI Acero 4140 Ficha Técnica, Propiedades, Dureza, Características, Tratamiento Térmico. [Online]. Available: <https://www.materialmundial.com/sae-aisi-acero-4140-ficha-tecnica-propiedades/>

# ANEXOS

## **ANEXO 1: Selección de sensores y actuadores para implementación en laminadora industrial**

Como parte del trabajo a futuro para la implementación en un sistema industrial del algoritmo de control propuesto, se realizó un análisis de los métodos de medición del espesor que podrían utilizarse; así como también, el dimensionamiento del actuador encargado de ajustar la distancia entre los rodillos de laminación. Esto debido a que es necesario tener en cuenta las condiciones y perturbaciones reales en las que se desarrolla este proceso a nivel industrial.

En tal sentido, analizar que tipos de sensores y técnicas de medición son más adecuadas permite simular el control del espesor de las palanquillas de manera precisa. Del mismo modo, dimensionar el torque del actuador que se plantea utilizar sirve para ajustar el control del algoritmo propuesto.

### ■ **Métodos de medición del espesor**

A continuación, se explican distintos métodos utilizados en la industria para medir el espesor, los cuales se consideran para la futura implementación del algoritmo de control.

#### a) **Medición usando sensores ópticos**

Como se puede apreciar en la Figura 5.38, esta propuesta consistiría de un par de sensores ópticos colocados fijamente arriba y abajo de la pieza de trabajo (uno a cada lado).

$$h_f = d_s - (d_1 + d_2) \quad (5.8)$$

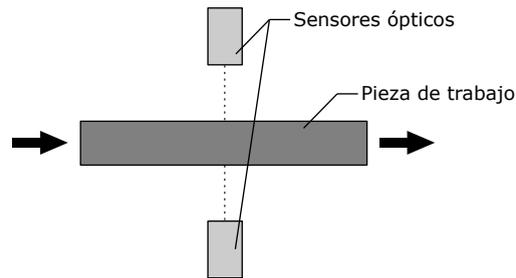


FIGURA 5.38: Esquema de implementación sensores ópticos.

Estos sensores tienen la capacidad de entregar resultados con una precisión de hasta 1 mm. Adicionalmente, si bien estos sensores no suelen operar a una temperatura de mayor de 50°C, es posible colocarlos a una distancia prudencial de la pieza de trabajo e, incluso, hay opciones que pueden ser complementadas con refrigeración líquida, lo que puede elevar su temperatura de trabajo hasta 120°C [26].

#### b) Medición usando sensores ultrasónicos

Esta propuesta, como se puede observar en la Figura 5.39, trabaja de manera idéntica a la vista anteriormente con los sensores ópticos.

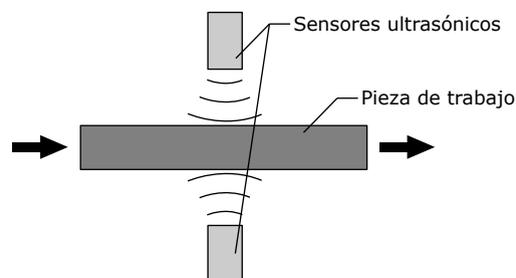


FIGURA 5.39: Esquema de implementación sensores ultrasónicos.

Sin embargo, a diferencia de la propuesta con sensores ópticos, estos sensores no tienen una precisión tan elevada, lo que implica que se obtendrían

señales mucho más ruidosas que no sean aptas para ser utilizadas directamente en un sistema de control, por lo que sería necesario usar una técnica de filtrado de ruido.

Al igual que los sensores ópticos, estos sensores no suelen ser capaces de operar a una temperatura superior a 70°C. Sin embargo, es posible colocarlos a una distancia prudencial de la pieza de trabajo. En este caso, dicha distancia sería considerablemente inferior comparada a la distancia a la que se pueden colocar los sensores ópticos para que se entregue una medición confiable. También hay opciones que pueden ser complementadas con refrigeración líquida, lo que puede elevar considerablemente su temperatura máxima de operación.

### c) **Medición usando sensores de rayos X**

Los sensores de rayos X son ampliamente usados en los sistemas de automatización del proceso de laminado en caliente. Al igual que los tipos de sensores mencionados anteriormente, se coloca un emisor y un receptor en la parte superior e inferior de la banda de laminación. La radiación se emite por el tubo de rayos X instalado en el sensor inferior y viaja a través de la pieza laminada hacia el sensor superior, el cual contiene un número de cámaras de ionización que recibe la radiación. Esta radiación residual depende del grosor del material, por lo cual se convierte en señales eléctricas que permiten determinar con gran precisión el espesor de la pieza de trabajo.

A diferencia de los sensores antes mencionados, estos pueden trabajar en ambientes con temperaturas elevadas y manejan una precisión menor a 1 mm. Sin embargo, también suelen ser los más costosos y el espesor máximo que pueden detectar es de 80 mm [27] .

d) **Estimación teórica por modelo de consumo eléctrico**

A diferencia de las demás propuestas, esta es la única que no mide directamente un espesor, sino que realiza una estimación indirecta en función a parámetros más accesibles como la potencia consumida y la velocidad angular de los rodillos de laminación utilizando (3.8). Sin embargo, el radio de los rodillos irá disminuyendo lentamente por desgaste con el paso del tiempo y, dado que estos se encuentran dentro del laminador, es una variable no observable, es decir, no se puede medir. Afortunadamente, esta variable se puede expresar en función del espesor entregado por el laminador y la separación de los rodillos según [1]:

$$R = \frac{d - h_f}{2} \quad (5.9)$$

donde  $d$  es la distancia que separa los rodillos, la cual es una magnitud conocida.

Al reemplazar el valor del radio en (3.8), se obtiene la siguiente expresión:

$$P = \left( \frac{d - h_f}{2} \arccos \left( 1 - \frac{h_i - h_f}{d - h_f} \right) \right)^2 Q_i w \omega \sigma_{\text{prom}} \quad (5.10)$$

Por último, se debe tener en cuenta que el esfuerzo necesario para realizar la reducción del espesor dependerá de la deformación real ( $\varepsilon$ ) que sufrirá la palanquilla. La relación entre estas dos magnitudes se puede ejemplificar con la Figura 5.40, la cual muestra una curva típica de esfuerzo-deformación reales, aunque las formas exactas de estas curvas varían dependiendo del material de la palanquilla.

La deformación real se puede calcular como lo indica (5.11).

$$\varepsilon = \ln \left( \frac{h_i}{h_f} \right) \quad (5.11)$$

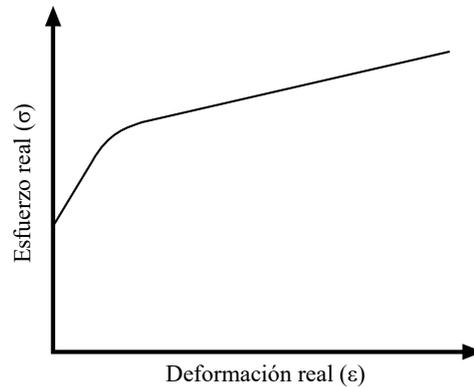


FIGURA 5.40: Curva esfuerzo-deformación real típica [1].

De esta manera, se puede expresar la potencia necesaria en función del espesor final, de la velocidad angular de los rodillos y de magnitudes conocidas como el espesor inicial, la distancia entre los ejes de los rodillos y la anchura de la pieza de trabajo.

$$P = \left( \frac{d - h_f}{2} \arccos \left( 1 - \frac{h_i - h_f}{d - h_f} \right) \right)^2 Q_i w \omega \sigma_{\text{prom}}(h_i, h_f) \quad (5.12)$$

En este caso, no es necesario un equipo de medición directa de espesor final de la palanquilla. Sin embargo, este método podría ser propenso a acumular un error a lo largo de las diferentes etapas en la laminación si no es validado por mediciones reales. Dado que es posible que el sistema de laminación varíe a lo largo del tiempo, no se puede tener total seguridad sobre todas las variables involucradas. Ejemplos de ello son las aproximaciones consideradas en los esfuerzos generados, las longitudes involucradas, las eficiencias asumidas de las diferentes partes del proceso, etc.

Finalmente, se presenta en la Tabla 5.15 un resumen con las ventajas y desventajas de cada método de medición. El análisis de los diferentes métodos se basa en el principio de medición que poseen y en las especificaciones técnicas de los instrumentos. En tal sentido, se determinó que los sensores ultrasónicos en conjunto

con la estimación teórica por consumo de corriente son los métodos más adecuados para el diseño del control del espesor, teniendo en cuenta que se busca diseñar un control que soporte los ruidos externos y propios de los instrumentos de medición.

TABLA 5.15: Comparación de métodos de medición considerados.

Método de medición	Ventajas	Desventajas
Sensores ópticos	Fácil implementación. Alta precisión (hasta 1 mm).	Temperatura de operación reducida (50°C por lo general), por lo que necesitan estar a una distancia considerable de la pieza de trabajo para poder operar a una temperatura adecuada, lo que afectaría la precisión de las mediciones.
Sensores ultrasónicos	Pueden tener una temperatura de operación ligeramente superior a la de los sensores ópticos (70°C).	Menor precisión. Mayor presencia de ruido en las mediciones.
Sensores de rayos X	Precisión muy alta (error menor a 1 mm). Pueden operar con materiales a temperaturas muy elevadas.	Su costo es más elevado que otro tipo de sistema de medición. No detecta espesores mayores a 80 mm.
Cálculo por consumo de corriente	No requiere la instalación de ningún equipo, ya que el espesor se estima indirectamente con un modelo matemático.	Dado que es una estimación teórica, puede presentar un error elevado si no se realiza una correcta medición de todos los parámetros que se usen en la estimación.

- Dimensionamiento del actuador para ajuste de distancia entre rodillos

Para dimensionar analíticamente el motor adecuado para implementar el sistema en una laminadora industrial, se calculó el par necesario para que los husillos o tornillos de potencia logren ajustar la distancia de los rodillos.

$$A_t = \frac{F}{\sigma_p} \quad (5.13)$$

A partir de (5.13) se obtuvo el área de esfuerzo de tensión. Para este análisis se asume una carga máxima total de  $F = 69660$  N. Esta carga varía en los sistemas de laminación dependiendo de sus componentes, sin embargo, debe incluir el peso del rodillo, el cual oscila entre 1000 a 2000 kg [11]; así como el peso del sistema de transmisión y la carga que se va a laminar.

Adicionalmente, se opta por tornillos diseñados con acero AISI 4140, debido a su gran aplicación en elementos de maquinaria como ejes reductores, engranajes y tornillería de alta resistencia. Este material tiene una resistencia última a la tensión de entre 650 y 1050 MPa según sean las condiciones de tratamiento térmico [28]. Para el presente análisis se consideró  $\sigma_p = 675$  MPa.

De esta forma, se obtuvo que el área requerida para el esfuerzo de tensión  $A_t$  en cada tornillo es de al menos  $1.032 \text{ cm}^2$  o  $0.16 \text{ in}^2$ . A partir del área calculada, seleccionamos una rosca de la tabla 5.16, la cual muestra los diámetros más comunes en tornillos ACME. El diámetro elegido fue  $5/8 \text{ in}$ , con paso  $L_a = 0.125 \text{ in}$  y diámetro de paso mínimo  $D_p = 0.5408 \text{ in}$ . Se asumió además que el coeficiente de fricción entre el husillo y su tuerca es  $f = 0.15$  y el ángulo de rosca es  $\phi = 14.5^\circ$ .

Remplazando estos valores en las ecuaciones (3.10) y (3.12), se logró hallar que el torque necesario para que los husillos puedan subir el rodillo es  $T_u = 110.583$  N-m, mientras que para bajarlo es necesario un torque  $T_d = 38.488$  N-m. De esta manera, el torque mínimo que debe soportar el motor seleccionado en conjunto con su sistema de reducción es  $110.583$  N-m.

## ANEXO 2: Roscas ACME

TABLA 5.16: Diámetros preferidos para roscas ACME [14].

Diámetro mayor nominal, $D$ (pulg)	Roscas por pulg, $n$	Paso, $L_a$ (pulg)	Diámetro menor mínimo, $D_r$ (pulg)	Diámetro mínimo de paso, $D_p$ (pulg)	Área al esfuerzo de tensión, $A_t$ (pulg <sup>2</sup> )
1/4	16	0.0625	0.1618	0.2043	0.02632
5/16	14	0.0714	0.2140	0.2614	0.04438
3/8	12	0.0833	0.2632	0.3161	0.06589
7/16	12	0.0833	0.3253	0.3783	0.09720
1/2	10	0.1000	0.3594	0.4306	0.1225
5/8	8	0.1250	0.4570	0.5408	0.1955
3/4	6	0.1667	0.5371	0.6424	0.2732
7/8	6	0.1667	0.6615	0.7663	0.4003
1	5	0.2000	0.7509	0.8726	0.5175

## ANEXO 3: Especificaciones del prototipo fabricado

### a) Modelo 3D del prototipo de laminadora

En la Figura 5.43 se muestra el modelo 3D preliminar de la laminadora a escala elaborado en el software SolidWorks.

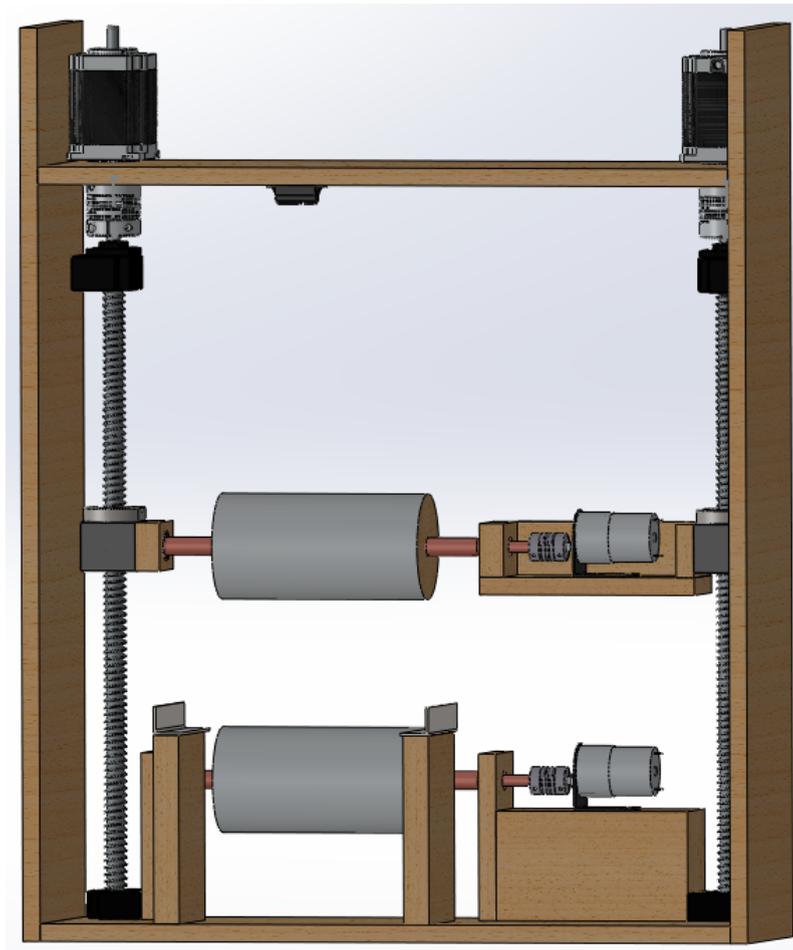


FIGURA 5.41: Modelo 3D del prototipo de laminadora.

## b) Principales planos de diseño del prototipo de laminadora

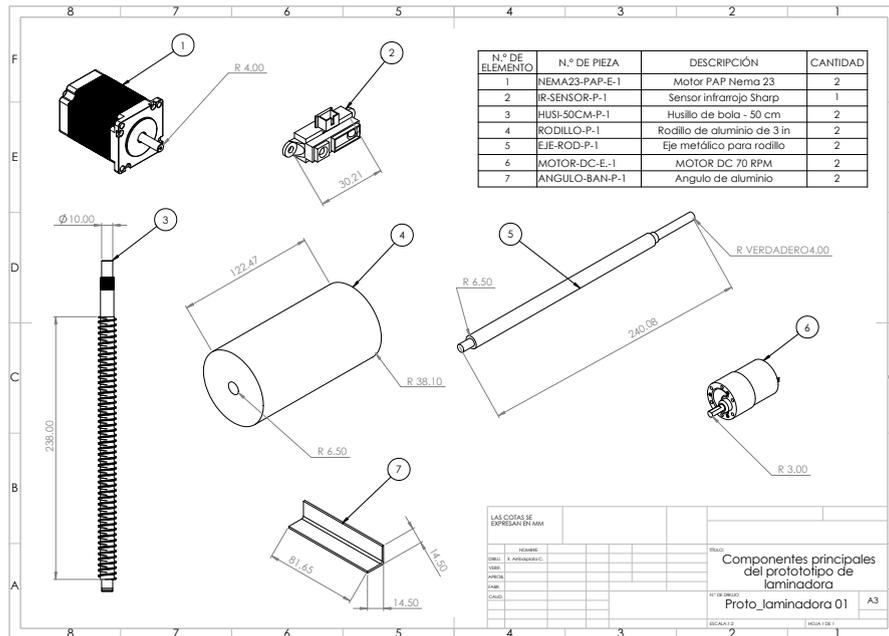


FIGURA 5.42: Listado de componentes del prototipo.

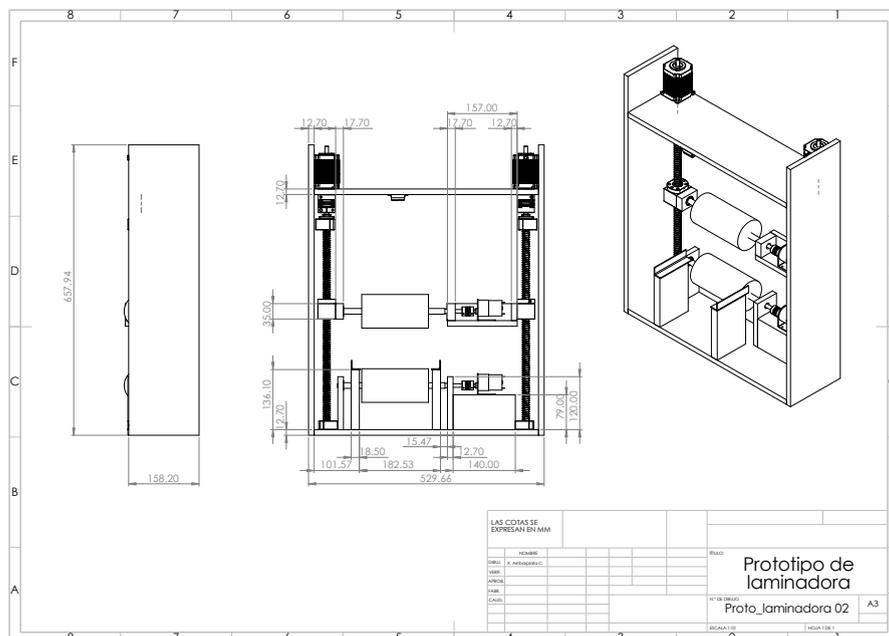


FIGURA 5.43: Dimensiones del prototipo de laminadora diseñado.