



Diseño e implementación de un sistema de control de velocidad para el halado de material en un banco didáctico de trefilado

Yessica Carolina Delgado Riaño

Código: 11131624542

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C., Colombia

2021

Diseño e implementación de un sistema de control de velocidad para el halado de material en un banco didáctico de trefilado

Yessica Carolina Delgado Riaño

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniera Electromecánica

Director:

Ing. Hugo Ferney Alba Díaz

Codirector:

Ing. MSc. Javier Andrés Urbano Tole

Línea de Investigación:

Sistemas de control.

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C., Colombia

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Ciudad, Día Mes Año.

Dedicatoria

La finalización de esta etapa de mi vida es gracias al apoyo y amor incondicional de mi mamá Nubia, sin ella nada sería posible.

A mis hermanos Eliana y Juan Daniel, a mi cuñado Jeison, a mi familia, amigos y personas más cercanas por hacer parte de mi vida, por ayudarme a formar como persona y profesional.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a Dios y a la vida por permitirme culminar esta etapa de mi formación profesional.

A mi mamá, hermanos, familiares, amigos, compañeros de trabajo y universidad por el apoyo y el ánimo dado en el transcurso de mi carrera.

De la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito: Al Ingeniero Javier Urbano por permitirme ser parte de este proyecto, por el tiempo y dedicación que me ha dado para iniciar y culminar esta tesis. Al Ingeniero Enrique Estupiñán por la guía dada.

De la Universidad Antonio Nariño: A mi Director de Tesis el Ingeniero Hugo Alba y aquellos Profesores que hicieron parte de mi aprendizaje, por las enseñanzas, anécdotas y apoyo dados en el transcurso de mi vida universitaria.

A todas las personas que de alguna forma han hecho parte de este proyecto.

Contenido

Pág.

Lista de Figuras.....	1
Lista de Tablas	3
Lista de Símbolos y Abreviaturas	4
Resumen.....	6
Abstract.....	7
Introducción	8
1. Planificación del proyecto	9
1.1 Planteamiento del problema.....	9
1.2 Justificación.....	9
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo general	10
1.3.2 Objetivos específicos	10
2. Marco teórico.....	11
2.1 Trefilado.....	11
2.1.1 Banco de trefilado.....	11
2.1.2 Fuerza de trefilado	11
2.1.3 Lubricación.....	12
2.2 Sistemas de control.....	13
2.3 Sistema de control a lazo abierto.....	13
2.4 Sistema de control en lazo cerrado.....	14
2.4.1 Controladores automáticos industriales.....	14
2.4.2 Controlador PID	15
2.5 Motor de inducción trifásico	16
2.5.1 Principio de operación	17
2.6 Variador de velocidad	18
2.7 Adquisición de datos	19
2.8 Sensores.....	20
2.8.1 Características de los sensores.....	20

3.	Generalidades del proyecto	21
3.1	Ubicación del proyecto.....	21
3.2	Análisis de las variables del proyecto	22
3.2.1	<i>Velocidad de salida del alambre</i>	23
3.2.2	<i>Fuerza de trefilado</i>	24
3.2.3	<i>Potencia eléctrica consumida</i>	24
3.3	Elementos y equipos por utilizar	25
3.3.1	<i>Tablero de control y parte eléctrica</i>	25
3.3.2	<i>Tarjeta para adquisición de datos</i>	30
4.	Diseño del sistema de control.....	32
4.1	Estrategia de control.....	33
4.1.1	<i>Adquisición de datos del motor con motorreductor</i>	33
4.1.2	<i>Función de transferencia</i>	37
4.1.3	<i>Controlador</i>	38
4.2	Implementación del sistema de control.....	42
4.2.1	<i>Lazo abierto control de velocidad</i>	42
4.2.2	<i>Lazo cerrado control de velocidad</i>	43
4.3	Parametrización y pruebas	45
4.3.1	<i>Parametrización del variador de velocidad ATV61HU55M3Z</i>	45
4.3.2	<i>Programación del PLC LOGO!</i>	48
4.3.3	<i>Programación de tarjeta de desarrollo ESP32</i>	50
4.3.4	<i>Montaje en Protoboard para pruebas</i>	52
4.3.5	<i>Pruebas implementación lazo abierto</i>	52
4.3.6	<i>Pruebas implementación lazo cerrado</i>	54
4.4	Propuesta para mejorar la implementación en lazo cerrado.....	56
4.5	Validación del diseño	58
5.	Diseño electrónico y eléctrico	59
5.1	Diseño de la tarjeta electrónica	59
5.2	Diseño del tablero eléctrico para el control del motor	64
5.2.1	<i>Carga de los conductores</i>	64
5.2.2	<i>Protección contra sobrecarga</i>	66
5.2.3	<i>Protección del circuito ramal contra cortocircuito y contra falla a tierra</i>	66
	Conclusiones y recomendaciones	70
	Conclusiones	70
	Recomendaciones.....	71
	Referencias Bibliográficas	72

Lista de Figuras

	<u>Pág.</u>
Figura 1. Banco de trefilado con los principales componentes.	11
Figura 2. Componentes básicos de un sistema de control.	13
Figura 3. Elementos básicos de un sistema de control a lazo abierto.	13
Figura 4. Componentes básicos de un sistema de control a lazo abierto.	14
Figura 5. Diagrama de bloques de un sistema de control industrial.	15
Figura 6. El controlador PID calcula la acción de control en base de los errores de control pasados, presentes y futuros.	15
Figura 7. Componentes de un motor trifásico.	17
Figura 8. Disposición de los devanados de un motor de inducción trifásico bipolar.	18
Figura 9. Componentes básicos de los VSD eléctricos.	19
Figura 10. Sistema DAQ.	19
Figura 11. Edificio I.	21
Figura 12. Esquema con desglose funcional del del proyecto de Modelación numérica y física del proceso de trefilado industrial.	22
Figura 13. Desglose funcional para la variable de velocidad de salida del alambre.	24
Figura 14. Desglose funcional para la variable de fuerza de trefilado.	24
Figura 15. Motor de inducción trifásico con motorreductor.	25
Figura 16. Variador de velocidad ATV61HUM55M3Z.	26
Figura 17. Datos técnicos del variador de velocidad.	27
Figura 18. PLC LOGO! Siemens.	28
Figura 19. Datos técnicos del PLC LOGO.	28
Figura 20. Módulo AM2 AQ.	29
Figura 21. Módulo DC-DC LM2596.	30
Figura 22. Tarjeta de desarrollo ESP32.	31
Figura 23. Conversor HX711.	32
Figura 24. Desglose funcional lazo abierto.	33
Figura 25. Desglose funcional lazo cerrado.	33
Figura 26. Tarjeta Arduino Uno con la placa complementaria para adquisición de datos de la planta.	34
Figura 27. Datos tomados del motor.	34
Figura 28. Script para filtrar datos tomados.	35
Figura 29. Señal filtrada.	35
Figura 30. Datos para recortar en la señal.	36
Figura 31. Señal recortada en los datos tomados del motor.	36
Figura 32. Script para hallar la constante de tiempo.	37
Figura 33. Lazo abierto sistema de velocidad.	38

Figura 34. Respuesta al escalón unitario.....	38
Figura 35. Diagrama de Nyquist para la planta a controlar.	39
Figura 36. Lazo cerrado sistema de velocidad.....	40
Figura 37. Bloque de parámetros del controlador.....	40
Figura 38. PID Tuner.	41
Figura 39. Respuesta en lazo cerrado.	42
Figura 40. Implementación lazo abierto.	42
Figura 41. Diagrama de conexiones lazo abierto.....	43
Figura 42. Implementación lazo cerrado.	44
Figura 43. Diagrama de conexiones lazo abierto.....	44
Figura 44. Parametrización de los datos del motor en el VSD.	45
Figura 45. Medición de m/min del motor.	46
Figura 46. Medición de velocidad con el VSD a 40 Hz.	46
Figura 47. Medición de velocidad con el VSD a 35 Hz.	47
Figura 48. Programa a implementar en LOGO!	48
Figura 49. Parametrización bloque Regulador PI.....	49
Figura 50. Disposición entradas y salidas en el cofre eléctrico.	50
Figura 51. Programación tarjeta ESP32.....	50
Figura 52. Visualización velocidad por medio del Monitor Serie.....	51
Figura 53. Programación para lectura de variables.....	51
Figura 54. Montaje para pruebas de la tarjeta de adquisición.....	52
Figura 55. Mediciones en el osciloscopio con 5, 15, 25 y 35 Hz parametrizados en el VSD.	54
Figura 56. Prueba de funcionamiento lazo cerrado.	55
Figura 57. Curva bloque PI LOGO!Soft.....	55
Figura 58. Visualización de los datos y curva de comportamiento de la velocidad.	56
Figura 59. Implementación lazo cerrado sin PLC.	57
Figura 60. Aplicación móvil para la trefiladora.....	57
Figura 61. Curva de simulación en MATLAB y curva del bloque PI en LOGO!Soft.	58
Figura 62. Prueba realizada a la tarjeta myDAQ.....	59
Figura 63. Diagrama de bloques del diseño de la tarjeta para adquisición de datos.....	60
Figura 64. Esquemático de conexiones LM2596.....	61
Figura 65. Esquemático funcional de la tarjeta ESP32.....	61
Figura 66. Esquemático con acondicionamiento de señal para sensores de temperatura PT100.....	62
Figura 67. Esquemático de conexiones convertor HX711.	62
Figura 68. Esquemático de conexiones encoder E30S45003T24.....	63
Figura 69. Vista final de la tarjeta para adquisición de datos de la trefiladora.....	63
Figura 70. Vista 3D de la tarjeta para adquisición de datos de la trefiladora.	64
Figura 71. Corriente a plena carga para el motor.....	65

Figura 72. Selección cable conductor.	66
Figura 73. Selección protección contra cortocircuito y falla a tierra.	67
Figura 74. Dimensionamiento caja eléctrica.	68

Lista de Tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 1. Variables propias en el proceso de trefilado.	23
Tabla 2. Equivalencia de la velocidad de Hz a RPM.	47
Tabla 3. Entradas y salidas en el LOGO! y tablero.	49
Tabla 4. Mediciones tomadas en el lazo abierto.	53

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Símbolo	Término
α	Ángulo del dado
μ	Fricción
°C	Unidad para medición de temperatura (Grados Celsius)
A	Unidad de intensidad de corriente eléctrica (Amperios)
AC	Corriente eléctrica alterna
A_o	Sección transversal del alambre antes del proceso de trefilado [mm ²]
A_f	Sección transversal del alambre después del proceso de trefilado [mm ²]
DAQ	Adquisición de datos, “data acquisition”
DC	Corriente eléctrica directa
F	Fuerza del trefilado [N]
Fem	Fuerza electromotriz
HP	Potencia dada en caballos de fuerza
HMI	Interfaz Hombre – Máquina, “human-machine interface”
Hz	Unidad de medida para la frecuencia
IDE	Entorno de desarrollo integrado, “Integrated Development Environment”
K	Ganancia proporcional en sistemas de control
kW	Potencia eléctrica dada en vatios
m/min ó m/s	Unidad de medición de velocidad lineal
N	Unidad de medida de la fuerza
NA	Normalmente abierto, cierra el circuito eléctrico al accionarse
NC	Normalmente cerrado, abre el circuito eléctrico al accionarse
NTC 2050	Norma Técnica Colombiana sobre el Código Eléctrico Colombiano

PCB	Tarjeta de circuito impreso, “Printed Circuit Board”
PI	Controlador Proporcional, Integral
PID	Controlador Proporcional, Integral, Derivativo
PLC	Controlador Lógico Programable, “Programmable Logic Controller”
PT100	Sensor de temperatura
RPM	Revolución por minuto, indica la velocidad angular
V	Unidad para la tensión eléctrica (Voltios)
VSD	Variador de velocidad, “variable speed drive”
Y_{prom}	Esfuerzo real promedio del material [N/mm ²]

Resumen

El trefilado es un proceso en el cual se reduce la sección transversal de una barra de metálica principalmente acero o bronce. En la industria el trefilado es usado para la realización de productos utilizados en las diferentes ramas de la ingeniería. En este trabajo se propone el diseño e implementación de un sistema de control para la velocidad de halado de material en un banco de trefilado orientado al ámbito educativo.

Con el diseño e implementación del sistema de control de velocidad en el banco de trefilado didáctico se busca la optimización del proceso, teniendo en cuenta como las variables del trefilado pueden afectar el proceso, por lo que se deben analizar y monitorear en tiempo real para observar su comportamiento.

Palabras clave: Trefilado, control, velocidad, fuerza, temperatura.

Abstract

Wire drawing is a process in which the cross-section of a metal bar, mainly steel or bronze, is reduced. In the industry, wire drawing is used for the realization of products used in different branches of engineering. In this work we propose the design and implementation of a control system for the material speed in a wire drawing assembly oriented to the educational field.

With the design and implementation of the speed control system in the didactic wire drawing assembly, will be searched for the optimization of the process, taking into account how the wire drawing variables can affect the process, so it must be analyzed and monitored in real-time to observe their behavior.

Keywords: Wire drawing, control, speed, strength, temperature.

Introducción

En la industria con el proceso de trefilado consiste en reducir la sección transversal de una barra de material metálico haciéndolo pasar por un cabezal. En algunos casos, el trefilado también se utiliza para mejorar el acabado superficial o mejorar las propiedades mecánicas del material.

El trefilado se hace principalmente como una operación de trabajo en frío es usado con más frecuencia para producir secciones redondas. El estirado del material es un proceso industrial importante que provee productos comerciales como cables y alambres eléctricos; entre otros artículos de ferretería.

Las principales variables del proceso de trefilado son la reducción en el área de la sección transversal por pasada, el ángulo del dado, la velocidad, la temperatura y la condición de lubricación afectan la fuerza del trefilado.

Si la velocidad del material en el proceso de trefilado al no estar controlada puede generar roturas o cedencias en el material, las cuales terminan como pérdidas en el banco de trefilado ya sean en cuestiones económicas como operacionales.

Este proyecto propone el diseño de un sistema de control de velocidad en el banco de trefilado didáctico, por medio de un controlador basado en las necesidades y requerimientos propios del proceso. La implementación del diseño del sistema hará parte de la validación, determinar la funcionalidad con el objetivo optimizar y mejorar la variable de velocidad en el trefilado.

El diseño y programación de la tarjeta de adquisición de datos tiene como objetivo la medición y visualización de las variables del trefilado como lo son: velocidad, fuerza y temperatura con la finalidad de observar el comportamiento y como afectan al proceso cuando varían o no están en los rangos ideales de trabajo.

En el presente documento se muestra una metodología para hallar y calcular la planta del sistema a partir del motor; por medio de un controlador realizar la estrategia e implementación del sistema de control de velocidad para observar desde la parte experimental como es el comportamiento basado en la teoría de los sistemas de control.

1. Planificación del proyecto

1.1 Planteamiento del problema

El trefilado es un proceso en el cual se reduce la sección transversal de una barra de metálica principalmente acero o bronce, denominado alambre. En la industria el proceso de trefilado tiene una gran importancia para la realización de varios productos y acabados en los materiales que son usados en diferentes campos de la ingeniería. El proceso conlleva variables relevantes que, sin un adecuado control, pueden generar roturas, esfuerzos superficiales, cedencia del material que acaba en pérdidas significativas cuando no se encuentran parametrizadas apropiadamente.

El diseño e implementación del sistema de control planteado para el banco de trefilado tiene como objetivo poder controlar la velocidad de halado del material a través del dado. Las velocidades dependen del material y de la reducción del área de la sección transversal. Debido a que el material no tiene el tiempo suficiente para disipar el calor generado en el trefilado, las altas velocidades generan elevadas temperaturas, lo que produce efectos perjudiciales en la calidad del material como el acabado superficial y las deformaciones térmicas que puedan ocasionar. El adecuado control de la velocidad en este proceso hace que estos efectos puedan ser controlables disminuyendo las pérdidas de material.

Desde el entorno educativo se tiene como objetivo que los estudiantes de ingeniería en un futuro se desempeñen como ingenieros en donde pueden liderar procesos de fabricación en la industria, adquiriendo los conocimientos fundamentales para el mejoramiento de ciertas metodologías en el entorno industrial e igualmente para la investigación de las características de los diferentes materiales usados industrialmente en el trefilado. El programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito tiene como proyecto la realización de un banco de trefilado orientado a la educación con el fin de mejorar el proceso de aprendizaje de los estudiantes y formar parte para el estudio e investigación en el área de materiales.

1.2 Justificación

El ámbito educativo se mejora cuando se sitúa en perspectiva con la realidad, este banco de trefilado está diseñado con el fin de pertenecer al ambiente de laboratorios para la investigación de materiales además del aprendizaje del proceso.

El presente Trabajo Integral de Grado, “Diseño e implementación de un sistema de control de velocidad para el halado de material en un banco didáctico de trefilado” hace parte del proyecto “Modelación numérica y física del proceso de trefilado industrial” del

programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, quien tiene como finalidad el diseño mecánico y construcción del banco de trefilado.

Con la implementación de este sistema de control y la adquisición de datos, se proyecta que desde contexto académico se pueda realizar un mejoramiento de este proceso a nivel industrial con la finalidad de optimizar operaciones, costos, eficiencia en cuanto a las pérdidas económicas que implican los factores que pueden afectar el trefilado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de control de velocidad del halado del material para un banco didáctico de trefilado.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar los requerimientos y limitaciones necesarios para el proceso de trefilado del banco didáctico de la Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Analizar los requisitos asociados al sistema de control de velocidad para el halado del material.
- Seleccionar los elementos y equipos para el control del proceso como lo son: motor, variador de velocidad, sensor de fuerza, sensores de temperatura, sensor de velocidad, interfaz gráfica (HMI o LabVIEW), tarjeta de adquisición de datos (myDAQ o Arduino), equipos de cómputo, PLC.
- Escoger el controlador (PID) que se ajuste a las necesidades y requerimientos del proyecto del banco de trefilado.
- Realizar la medición y visualización de los datos de velocidad, fuerza, temperatura y consumo energético por medio de una interfaz gráfica

2. Marco teórico

2.1 Trefilado

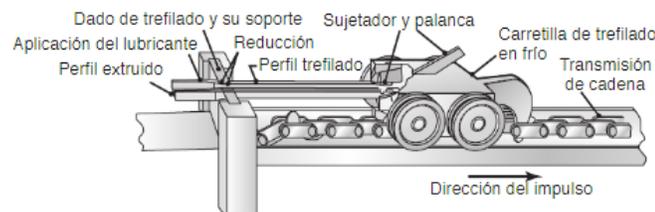
El trefilado es un proceso en el cual se reduce la sección transversal de una barra de material sea metálica, bronce o acero generalmente haciéndola pasar por un cabezal, el cual se denomina dado de trefilado. Mientras que en la extrusión el material es empujado a través del dado, en el trefilado el material es jalado a través del dado (Kalpakjian, 2014).

Las principales variables del proceso de trefilado son la reducción en el área de la sección transversal por pasada, el ángulo del dado, la velocidad, la temperatura y la lubricación, las que pueden verse afectados por la fuerza de trefilado (Kalpakjian, 2014).

2.1.1 Banco de trefilado

El banco de trefilado se diseña con sus principales componentes como lo son el dado de trefilado, zona de lubricación, carretilla de trefilado en frío, entre otros como se puede observar en la Figura 1. La fuerza de tensión es suministrada por un cilindro hidráulico o una transmisión de cadena la cual da la dirección de impulso. Estos bancos son utilizados para el trefilado de longitud única de barras y tubos rectos, con diámetros superiores de 20 mm e inferiores a 30 m. Las capacidades de los bancos de trefilado en fuerza de tensión alcanzan 1.3 MN con un rango de velocidad entre 6 y 60 m/min (Kalpakjian, 2014).

Figura 1. Banco de trefilado con los principales componentes.



Fuente: *Manufactura, ingeniería y tecnología, Kalpakjian*

2.1.2 Fuerza de trefilado

Para hallar la fuerza de trefilado, F , en condiciones ideales y sin fricción se puede observar en la Ecuación 2-1, el esfuerzo real promedio del material en la región de trabajo del dado. Al ser necesario un mayor trabajo para superar la fricción, la fuerza aumenta de acuerdo con la fricción (Kalpakjian, 2014).

$$F = Y_{prom} A_f \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right) \quad (2 - 1)$$

Donde,

F: Fuerza del trefilado [N].

Y_{prom} : el esfuerzo real promedio del material [N/mm²].

A_o : la sección transversal del alambre antes del proceso de trefilado [mm²].

A_f : la sección transversal del alambre después del proceso de trefilado [mm²].

En condiciones no ideales del proceso, al ser la deformación del material no uniforme dentro de la región del dado, se requiere energía adicional, por lo cual se genera un trabajo redundante de deformación. La Ecuación 2-2 muestra la fórmula en donde para hallar la fuerza de trefilado se tiene en cuenta la fricción (μ) y el trabajo redundante (α) que es el ángulo del dado en radianes (Kalpakjian, 2014).

$$F = Y_{prom} A_f \left[\left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right) + \frac{2}{3} \alpha \right] \quad (2 - 2)$$

En la Ecuaciones 2-1 y 2-2 se puede observar que la fuerza de trefilado aumenta cuando la reducción del área transversal disminuye. La fuerza debe tener un límite debido a que cuando el esfuerzo de tensión alcance el esfuerzo de cedencia del material trefilado, este cederá hasta el punto de rotura. Idealmente y sin fricción, la reducción máxima en el área de la sección trasversal por pasada es de 6.3% (Kalpakjian, 2014).

2.1.3 Lubricación

La lubricación en el proceso del trefilado es de gran importancia ya que mejora la duración del dado y el acabado en la superficie del material, también para reducir las fuerzas de trefilado y aumento de la temperatura (Kalpakjian, 2014).

Los métodos básicos de lubricación utilizados en el trefilado son:

- **Trefilado húmedo:** los dados y la barra de material son sumergidos en el lubricante.
- **Trefilado en seco:** la superficie de la barra de material se recubre con un lubricante, esta se pasa a través de una caja llena de lubricante.
- **Recubrimiento metálico:** la barra de material es recubierta con un material blando que actúa como lubricante sólido.

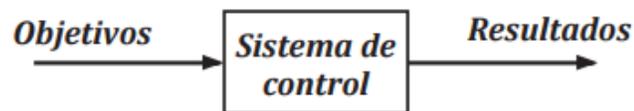
- **Vibración ultrasónica:** en los dados y mandriles las vibraciones mejoran el acabado superficial; también reduce la fuerza de trefilado.

2.2 Sistemas de control

Un sistema de control se puede definir como un conjunto de elementos que funcionan de manera unida para proporcionar una respuesta deseada. Los componentes básicos de un sistema de control son: Objetivos de control, Componentes del sistema de control y Resultados o salidas (Carrillo, 2011).

Los objetivos de control se pueden identificar como entradas o señales actuantes, los resultados son llamadas salidas o variables controladas, esta relación se muestra en la Figura 2. El objetivo del sistema de control es controlar la salida de acuerdo con los elementos que conforman el sistema y cómo actúan con la señal de entrada (Kuo, 1996).

Figura 2. Componentes básicos de un sistema de control.



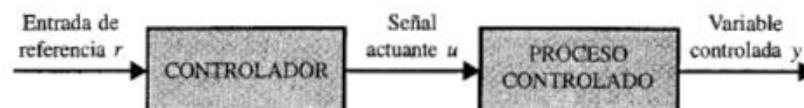
Fuente: *Sistemas automáticos de control*, Carrillo.

2.3 Sistema de control a lazo abierto

En este tipo de sistema de control la señal de salida no tiene efecto sobre la acción de control. La salida no se compara con la entrada de referencia. Con cada entrada de referencia va a tener una condición de operación fija, la precisión del sistema depende ya de la calibración dada al sistema (Ogata, 2013).

Los elementos básicos de un sistema de control a lazo abierto son el controlador y el proceso controlado como se muestra en la Figura 3. Una señal de entrada se aplica al controlador, cuya salida actúa como señal actuante, la cual controla el proceso de tal forma que la variable controlada se comporte de acuerdo a los estándares preestablecidos (Kuo, 1996).

Figura 3. Elementos básicos de un sistema de control a lazo abierto.



Fuente: *Sistemas de control automático*, Kuo.

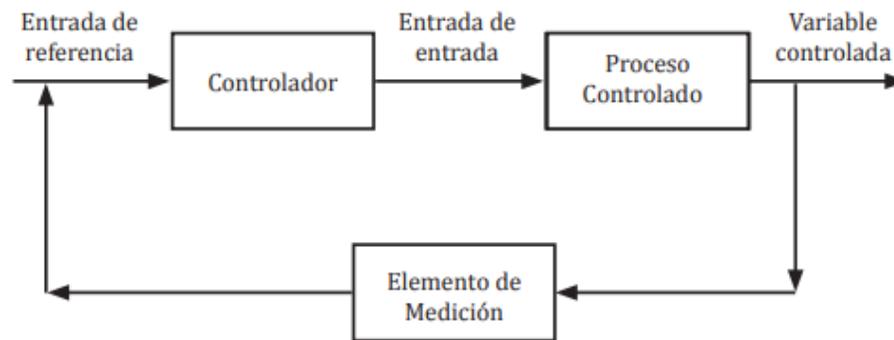
Cuando este tipo de sistemas presentan perturbaciones no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto es usado cuando se conoce la relación entre la entrada y la salida, y que no hayan perturbaciones internas ni externas (Ogata, 2013).

2.4 Sistema de control en lazo cerrado

En este tipo de sistema de control, la señal controlada es retroalimentada con la entrada de referencia, en donde se envía una señal actuante proporcional a la diferencia de la señal de entrada y salida en el sistema para corregir el error (Carrillo, 2011).

El termino lazo cerrado indica una acción de control realimentado para reducir el error del sistema (Figura 4). Una de las ventajas principales de este tipo de sistemas a lazo cerrado es que las perturbaciones internas y externas afectan menos el objetivo de control manteniendo una exactitud; la comparación hecha entre la señal retroalimentada y la señal de entrada da como resultado la señal de error, la cual se puede minimizar con la acción de control (Kuo, 1996).

Figura 4. Componentes básicos de un sistema de control a lazo abierto.



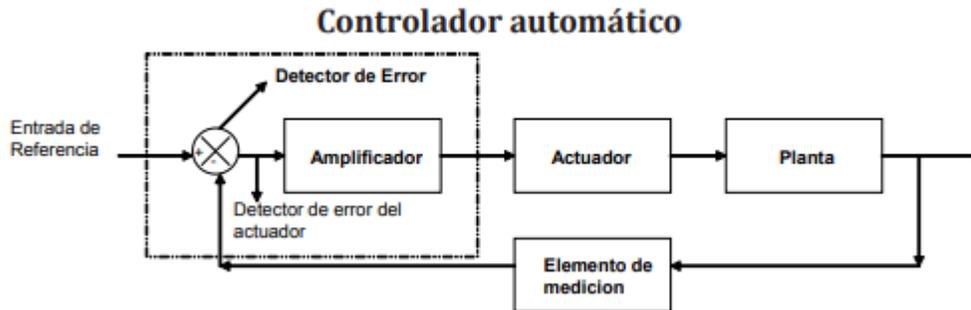
Fuente: *Sistemas automáticos de control*, Carrillo.

2.4.1 Controladores automáticos industriales

El controlador automático industrial tiene como función realizar la comparación del valor real de la salida de la planta con el valor que se desea obtener. El objetivo final de este controlador es minimizar los errores en los sistemas de control (Carrillo, 2011).

En la Figura 5 se puede observar un diagrama de bloques de un sistema de control industrial con sus respectivos componentes como lo son el controlador automático, un actuador, una planta y un elemento de medición (Carrillo, 2011).

Figura 5. Diagrama de bloques de un sistema de control industrial.



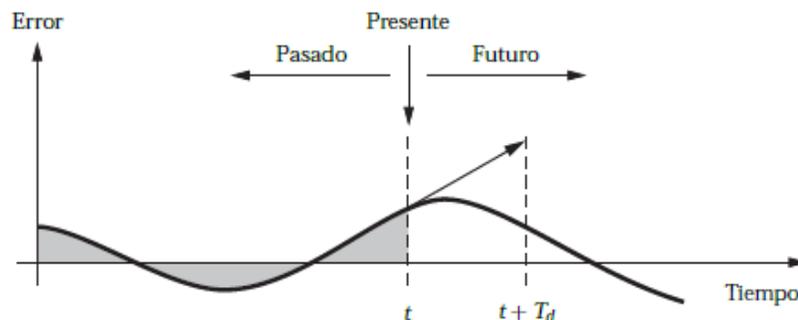
Fuente: *Sistemas automáticos de control, Carrillo.*

El controlador detecta la señal del error que se encuentra en el sistema. El actuador genera la señal a la entrada de la planta de acuerdo con la señal de control. El elemento de medición también denominado sensor convierte la variable de salida en otra variable que se pueda manejar con la finalidad de comparar la salida con la señal de entrada de referencia.

2.4.2 Controlador PID

El controlador PID está conformado por tres elementos, los cuales son: el elemento P que es control proporcional. El elemento integral I es una acción de control proporcional a la integral del error. El elemento derivativo D es proporcional a la derivada del error de control. Por medio de este controlador se le puede dar al sistema una capacidad anticipativa en donde utiliza una predicción de la salida en base de una extrapolación lineal como se muestra en la Figura 6 (Åström & Hägglund, 2007).

Figura 6. El controlador PID calcula la acción de control en base de los errores de control pasados, presentes y futuros.



Fuente: *Control PID avanzado, Åström.*

Un controlador PID se puede expresar matemáticamente como:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2 - 3)$$

En donde, esta acción de control es la suma de los tres términos: el pasado por la acción integral del error (I), el presente (P) y el futuro por extrapolación lineal del error (D). El término $e + T_d \frac{de}{dt}$ es una predicción lineal del error T_d . Los demás parámetros del controlador se denominan: ganancia proporcional K , el tiempo integral T_i , y tiempo derivativo T_d (Åström & Hägglund, 2007).

2.5 Motor de inducción trifásico

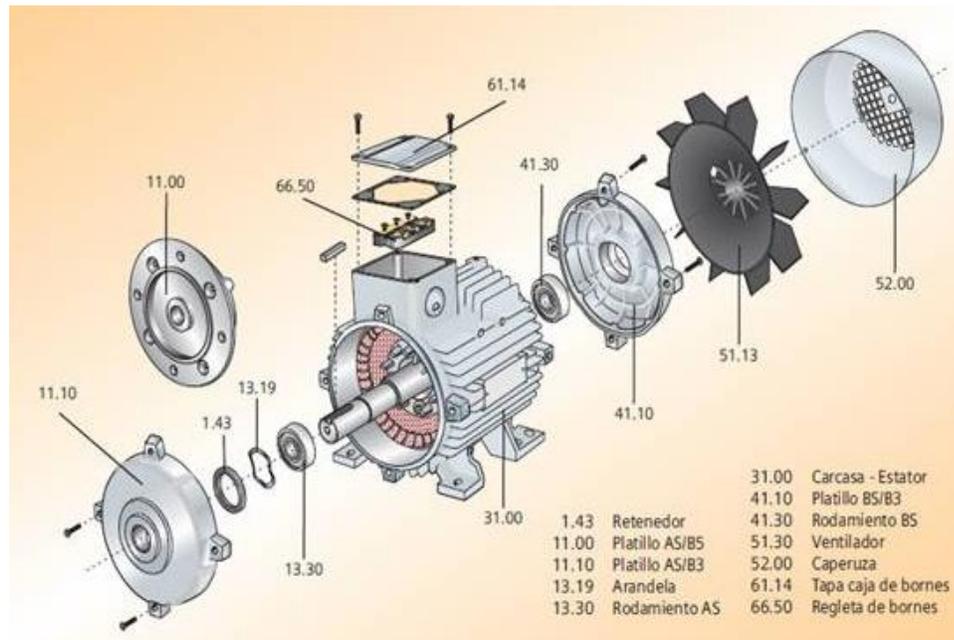
Este tipo de motores reciben la energía eléctrica en el rotor por medio de la inducción. Cuando un devanado recibe energía exclusivamente por inducción se le conoce como un transformador. Por esta razón, un motor de inducción es un transformador con un devanado secundario giratorio (Guru, 2003).

Las características de este tipo de motor son:

1. Un motor por inducción funciona con una sola alimentación. Por lo cual no requieren de un conmutador, anillos rozantes y escobillas. Al no tener este tipo de piezas móviles lo hace libre de mantenimientos.
2. Al no tener escobillas se eliminan las pérdidas eléctricas y pérdidas mecánicas por rozamiento entre ellas. Por lo anterior los motores de inducción tienen mayor eficiencia.
3. Tanto en el estator como en el rotor cuentan con corriente alterna en los devanados.

El motor de inducción trifásico se divide en tres partes fundamentales: el estator, el rotor y la carcasa. Otras partes son: retenedores, platillos, ventilador, entre otros, como se observa en la Figura 7.

Figura 7. Componentes de un motor trifásico



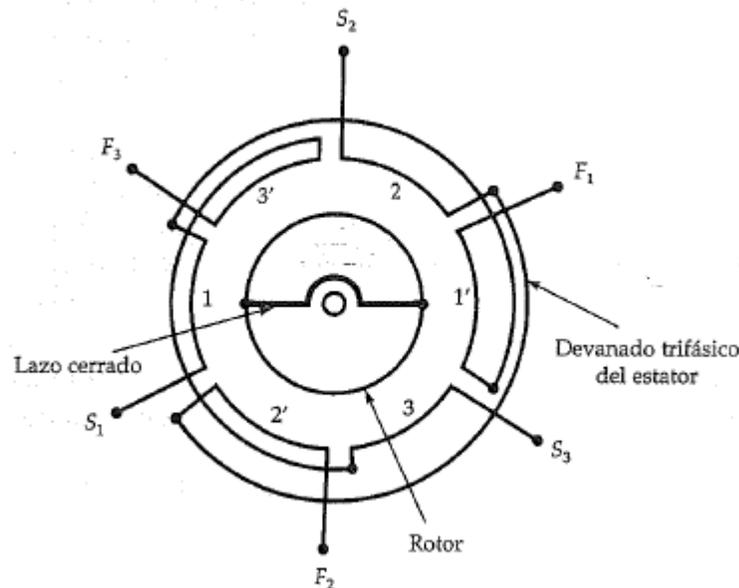
Fuente: Siemens.

2.5.1 Principio de operación

El devanado del estator al conectarse a una fuente trifásica produce un campo magnético que es de magnitud constante y gira alrededor de la parte externa del rotor a una velocidad síncrona. El campo rotatorio induce fuerza electromotriz (fem) en el devanado del rotor. En este caso el devanado del rotor forma un lazo cerrado, la fem en cada una de las bobinas genera una corriente inducida. Cuando la bobina conductora de corriente está en un campo magnético, experimenta un par que hace que empiece a girar. El rotor recibe la potencia por inducción cuando existe un movimiento relativo entre la velocidad y el campo rotatorio (Guru, 2003).

El estator está devanado con bobinas idénticas interconectadas para formar las tres fases. En la Figura 8 se muestra el arreglo del devanado de fase de un motor trifásico. En este caso la corriente fluye del punto S de una bobina hacia el F durante medio ciclo positivo. Es decir, en la duración de medio ciclo positivo la corriente de una bobina de fase se da en dirección de las manecillas del reloj, que produce un flujo que apunta hacia dicha bobina en una perspectiva como si se observara desde el interior del estator (Guru, 2003).

Figura 8. Disposición de los devanados de un motor de inducción trifásico bipolar.



Fuente: *Máquinas eléctricas y transformadores, Guru.*

2.6 Variador de velocidad

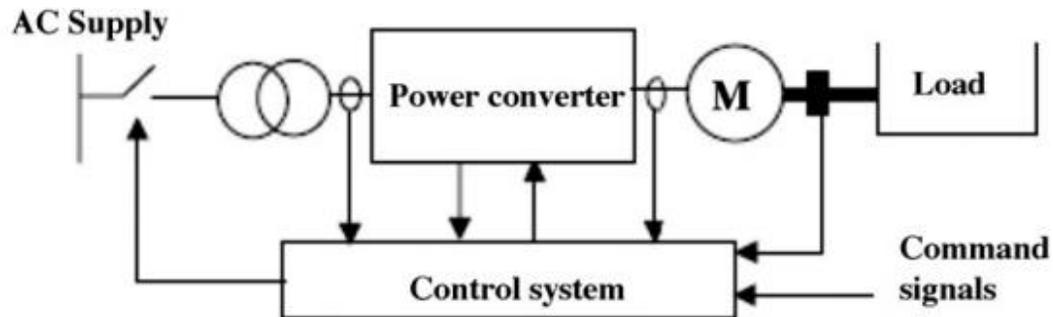
El variador de velocidad, VSD por el término en inglés “variable speed drive” es un dispositivo que regula la velocidad y la fuerza de rotación o el par de salida de elementos mecánicos como motores. Los VSD se usan para el ahorro de energía de bombas, compresores, entre otros equipos reduciendo el consumo de electricidad del motor entre un 30% y 60%. Permiten aumentar la eficiencia al hacer posible que los motores funcionen en una velocidad ideal para cada condición de carga. (Saidur et al., 2012).

Los sistemas eléctricos con variadores de velocidad típicos constan de tres componentes básicos: un motor eléctrico, un convertidor de potencia y sistema control (Figura 9). El motor eléctrico está conectado directa o indirectamente a la carga. El convertidor de potencia controla el flujo desde una fuente de corriente alterna al motor mediante el control apropiado de los semiconductores de potencia (parte del convertidor de potencia) (Saidur et al., 2012).

Los componentes de los VSD eléctricos son: rectificador, regulador e inversor. El rectificador convierte la corriente alterna en corriente directa. La rectificación por medio de diodos es la más usada, consiste en seis diodos de potencia en una configuración de puente trifásico. Esto significa que el voltaje de corriente directa depende completamente del voltaje de suministro de corriente alterna. Los rectificadores de diodos son cargas no lineales los cuales toman una corriente no sinusoidal de la línea de alimentación. El

regulador controla el VSD, recopila e informa las fallas, también cumple función de protección. Los inversores generan una corriente alterna conmutando secuencialmente una corriente directa en direcciones alternas a través de la carga (Saidur et al., 2012).

Figura 9. Componentes básicos de los VSD eléctricos.

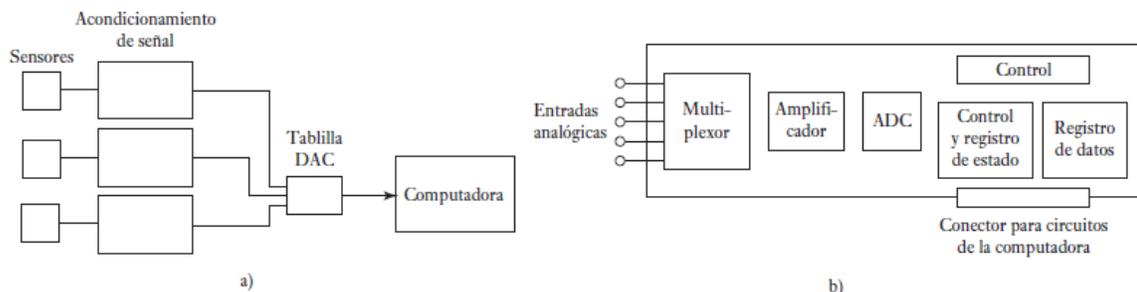


Fuente: *Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings*, Saidur.

2.7 Adquisición de datos

La adquisición de datos o DAQ, consiste en tomar datos de elementos como son sensores por medio de una computadora para su procesamiento. Después de un acondicionamiento de señal, los sensores están conectados a una tarjeta de adquisición de datos conectado finalmente a un computador (Figura 10a), la tarjeta cuenta con circuitos electrónicos para la multiplexión, amplificación, conversión análoga a digital, registro y control (Figura 10b), con la finalidad de alimentar las señales digitales muestreadas al sistema de computación (Bolton, 2013).

Figura 10. Sistema DAQ.



Fuente: *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*, Bolton.

En la adquisición de datos se debe tener en cuenta lo siguiente: (1) adquirir datos brutos del proceso que se está midiendo y (2) convertir datos en unidades utilizables. En la

industria, muchos de los datos en los diferentes procesos son análogos, como la presión, la temperatura y el caudal. Los valores adquiridos son representaciones muestreadas de datos de proceso que tienen una escala y un rango (Kutz, 2006).

La mayoría de la adquisición de datos actualmente se realiza a través de sistemas digitales que pueden tener un nivel analógico menor. Lo más utilizado es un convertidor de digital a analógico (D/A) y de analógico a digital (A/D) el cual realiza el procesamiento requerido para traer información analógica desde o hacia el proceso. Cuando una señal es digital, tiene como resultado una representación de un número continuo con características como el intervalo de muestreo, la escala y la linealización adecuada, que facilita el uso de los datos una vez recopilados (Kutz, 2006).

Los sistemas de visualización y adquisición de datos han cambiado drásticamente. Hace veinte años, los términos que se refieren a sistemas especializados como SCADA (control de supervisión y adquisición de datos) y registradores de datos eran términos comunes. Anteriormente se requerían varios instrumentos y sistemas especializados para la adquisición de datos; ahora son parte de las herramientas que se tienen disponibles en un computador (Kutz, 2006).

2.8 Sensores

El sensor es un elemento que produce una señal relacionada que corresponde a los que se está midiendo. Los sensores eléctricos son elementos de un sistema que se encuentran conectados a un entorno físico, tienen como función obtener señales eléctricas a magnitudes de entradas no eléctricas (Pallás, 2005).

Según la forma de salida de la señal, los sensores pueden ser análogos o digitales. Los sensores cuando son análogos producen una señal en tiempo continuo basada en la lectura de entrada. Mientras que los digitales producen una señal digital donde es muy común que procese los datos en bits, como respuesta a lo que miden a la entrada (Pallás, 2005).

2.8.1 Características de los sensores

Los sensores tienen como finalidad dar una salida eléctrica que corresponda de acuerdo con la magnitud que haya en la entrada. Se pueden diferenciar de acuerdo con el comportamiento del sensor a entradas de valor constante “características estáticas” y el comportamiento a entradas variables “características dinámicas” (Pallás, 2005).

Las características estáticas principales en un sensor son: exactitud, fidelidad y sensibilidad. Dependiendo del proceso las características como la linealidad, resolución, histéresis, entre otras, son secundarias. Para poder definirse estas características estáticas

principales en el sensor es necesario un proceso de calibración del sensor, en donde lo fundamental es que los valores de entrada correspondan a la salida. Con la curva de calibración del sensor se pueden obtener las características estáticas propias del sensor y la aplicación que se dará en el proceso a trabajar (Pallás, 2005).

La presencia de elementos que almacenan energía puede producir que en la respuesta del sensor cuando la entrada es variable cambie en comparación a una entrada constante. Las características dinámicas principales son el retardo y el error dinámico. El retardo describe el intervalo de tiempo transcurrido desde que se aplica la entrada hasta que la salida llega al valor estacionario; esta característica es importante para los sistemas de medida o control que requieren un lazo cerrado. El error dinámico se puede definir como la diferencia entre la respuesta del sensor frente a la magnitud de entrada cuando es variable al igual que si fuese constante (Pallás, 2005).

3. Generalidades del proyecto

3.1 Ubicación del proyecto

El proyecto por desarrollar estará ubicado en la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito en la ciudad de Bogotá. Esta Universidad cuenta con espacios de laboratorios para cada programa, en este caso estará en el Edificio I (Figura 11), en el laboratorio de Ensamble perteneciente al Programa de Ingeniería Mecánica.

Figura 11. Edificio I



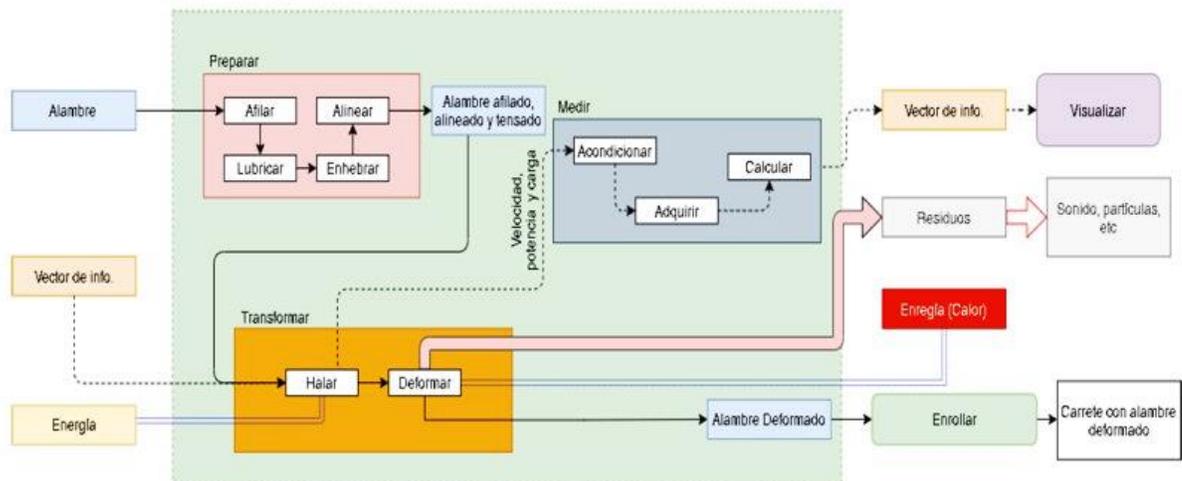
Fuente: Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

3.2 Análisis de las variables del proyecto

En esta Tesis Integral de Grado al ser parte del proyecto de investigación denominado “Modelación numérica y física del proceso de trefilado industrial” se tendrá en cuenta los requerimientos y los equipos disponibles dados por el Grupo de Investigación DSIM – Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

En el desglose funcional del proyecto de Modelación numérica y física del proceso de trefilado industrial (Figura 12), se puede observar que en el banco de trefilado se tienen diferentes etapas para completar el proceso de trefilado de un alambre, las cuales son: Preparar, Transformar y Medir. El enfoque principal de este proyecto será la etapa denominada “Medir”, en donde se hará el control de la variable de velocidad de salida de alambre la cual es posterior a la etapa “Transformar”, el acondicionamiento de la señal, adquisición y cálculo de los rangos de velocidad con pruebas experimentales trefilando un material en específico. Para las variables de potencia y carga solo se procederá a la adquisición de datos en tiempo real de acuerdo con el proceso.

Figura 12. Esquema con desglose funcional del del proyecto de Modelación numérica y física del proceso de trefilado industrial



Fuente: Grupo de Investigación DSIM – Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica

Los requerimientos y variables por medir de este proyecto son los que se pueden observar en la Tabla 1. El diseño del control de velocidad tendrá en cuenta el primer ítem denominado “Velocidad de Alambre Out”, el cual tiene un rango de velocidad entre 0 a 20 m/s. El alcance del proyecto y las mediciones estarán dadas por la priorización, en este caso las mediciones principales son la velocidad de alambre en la salida, fuerza de trefilado y potencia consumida en el trefilado.

Tabla 1. Variables propias en el proceso de trefilado.

Variables	Prioridad	Sensor	Unidades
Velocidad de Alambre Out	1	SI	0 – 20 m/s
Velocidad de Alambre In	3	SI	0 – 20 m/s
Temperatura de Hilera	2	SI	0 – 500 °C
Fuerza de trefilado	1	SI	0 – 10000 N
Temperatura entrada lubricante	2	SI	0 – 100 °C
Temperatura salida lubricante	2	SI	0 – 300 °C
Temperatura salida de alambre	2	NO	0 – 500 °C
Temperatura entrada de alambre	2	NO	0 – 500 °C
Potencia Consumida (I, V, t)	1	SI	(Amp, Volt, Watt, seg)
Velocidad de giro de Hilera	2	NO	Rad/seg
Temperatura bobinas de arrastre	3	SI	300 °C

Fuente: Grupo de Investigación DSIM – Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica.

3.2.1 *Velocidad de salida del alambre*

Para esta variable se requiere un sistema de control de velocidad en un rango que varíe de 0 a 20 m/s¹, con una precisión $\pm 5\%$ (tolerancia permitida en el tiempo de asentamiento). La respuesta del sistema al cambio de velocidad debe ser rápida (1 segundo²), al haber una respuesta lenta ocasionará que haya un desperdicio del material que puede llegar a ser considerable generando pérdidas significativas en el proceso del trefilado.

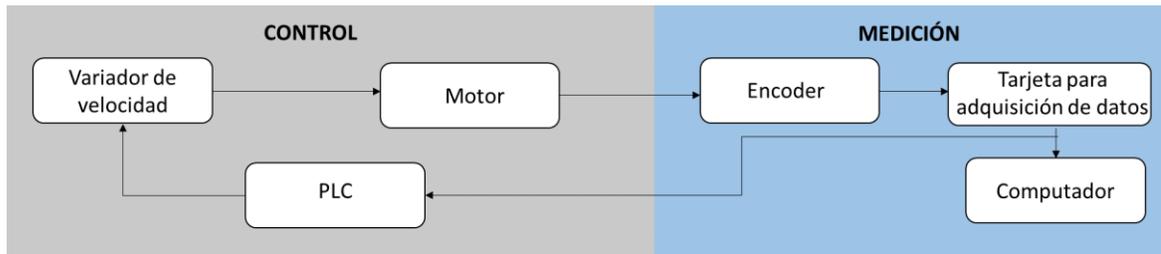
En un principio se estimaba trabajar con un motor de 5.6 kW (7.5 HP), por disponibilidad en el lugar del proyecto se escoge un motor de 1.5 kW (2 HP).

El desglose funcional para el sistema velocidad se muestra en la Figura 13. Para el análisis de esta variable se tienen dos etapas: control y medición. En la etapa de control se requiere un variador de velocidad para el motor y un PLC que hará de elemento de control. En la etapa de medición se utiliza un encoder el cual dará la información de velocidad por medio de una toma de datos en la tarjeta de adquisición de datos; la lectura se realiza en un computador.

¹ Dato suministrado por el Grupo de Investigación DSIM (Tabla 1).

² Requerimiento hecho por el Grupo de Investigación DSIM.

Figura 13. Desglose funcional para la variable de velocidad de salida del alambre.



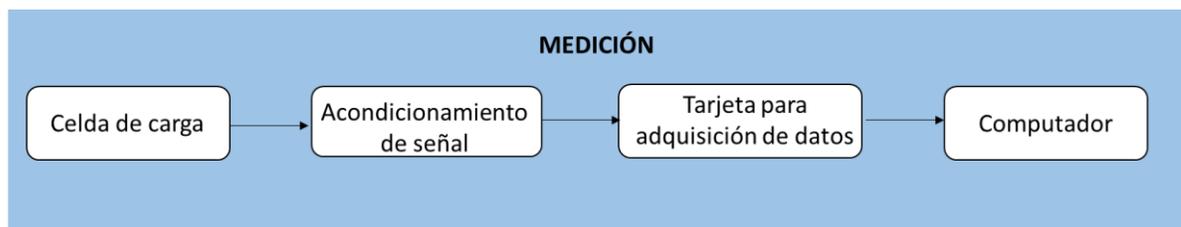
Fuente: Propia.

3.2.2 Fuerza de trefilado

La fuerza de trefilado varía principalmente por las condiciones de contacto superficial, derivadas de factores como: acabado superficial de alambre, acabado de hileras, lubricante, velocidad.

Esta variable depende de las condiciones mencionadas anteriormente, el objetivo es hacer la medición, la cual está en un rango de 0 a 10 kN³. En este caso por medio de un sensor denominado celda de carga y de acuerdo sus características se hace el acondicionamiento de la señal y adquisición de datos (Figura 14).

Figura 14. Desglose funcional para la variable de fuerza de trefilado.



Fuente: Propia.

3.2.3 Potencia eléctrica consumida

Para el motor se tiene proyectado trabajar con una potencia estimada de 1,5 kW (2 HP). La medición de la potencia consumida para el banco de trefilado tendrá en cuenta los elementos que conforman el proceso como lo que son el motor, variador de velocidad, PLC, sensores, tarjeta de adquisición de datos, entre otros.

³ Dato suministrado por el Grupo de Investigación DSIM (Tabla 1).

3.3 Elementos y equipos por utilizar

Para la selección de elementos y equipos se tiene en cuenta los requerimientos mencionados anteriormente y lo que se tenga disponible en la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

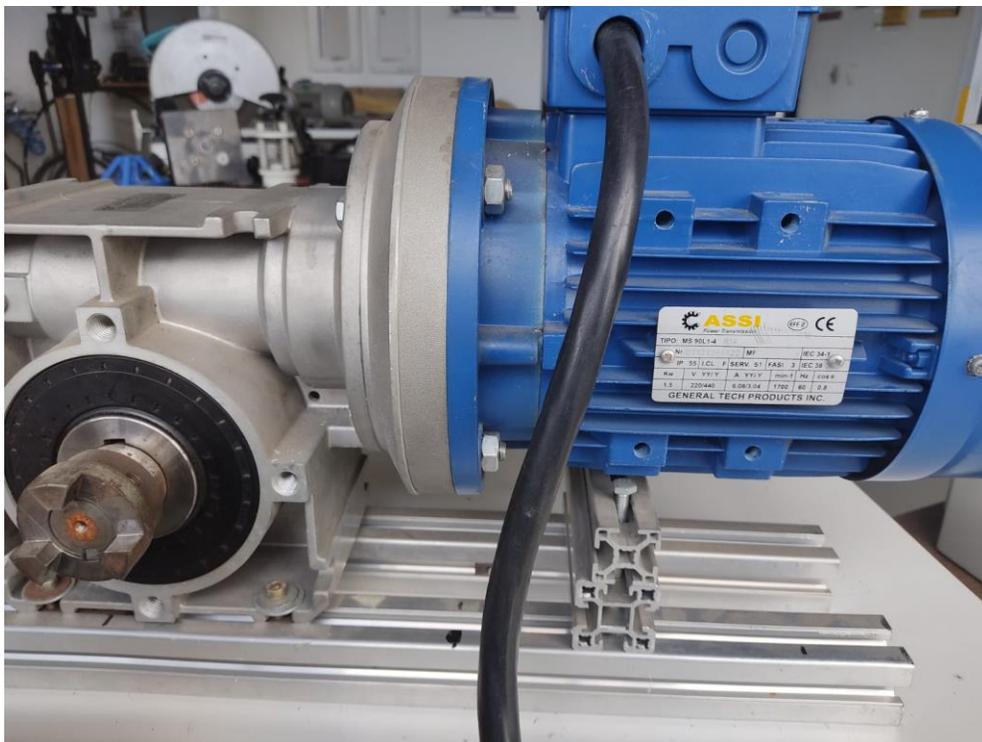
3.3.1 Tablero de control y parte eléctrica

En esta sección se presentan los equipos y elementos eléctricos más relevantes a usar en el montaje del tablero de control para la realización de pruebas experimentales.

3.3.1.1 Motor con motorreductor

Con la finalidad de hacer pruebas con los equipos disponibles, se usa el motor de inducción trifásico a usar es de marca ASSI, modelo MS 90L1-4 con motorreductor marca NORD, referencia SK 1SI75 (Figura 15).

Figura 15. Motor de inducción trifásico con motorreductor.



Fuente: Propia.

Los datos nominales relevantes del motor que serán necesarios para la configuración del variador de velocidad son:

- Potencia: 2 HP / 1,5 kW.

- Corriente a 220 V: 6,08 A.
- Factor de potencia: 0,8.
- Velocidad: 1700 rpm.

Los datos relevantes del motorreductor son:

- Diámetro: 35 mm.
- Reducción: 30:1.
- Torque nominal: 199 Nm.

Las especificaciones completas del motor y el reductor se encuentran en el anexo: Motor eléctrico Serie MS y Motorreductores NORD.

3.3.1.2 Variador de velocidad

El variador de velocidad a usar es de marca Schneider Electric, modelo ATV61HU55M3Z, el cual se encuentra disponible en las instalaciones del proyecto (Figura 16).

Figura 16. Variador de velocidad ATV61HUM55M3Z



Fuente: Propia.

A continuación, se pueden observar los datos técnicos nominales del variador de velocidad dados por el fabricante (Figura 17).

Figura 17. Datos técnicos del variador de velocidad.

Range of product	Altivar 61
Product or component type	Variable speed drive
Product specific application	Pumping and ventilation machine
Component name	ATV61
Motor power kW	4 kW, single phase at 200...240 V 5.5 kW, 3 phases at 200...240 V
Motor power hp	5 hp, single phase at 200...240 V 7.5 hp, 3 phases at 200...240 V
Power supply voltage	200...240 V - 15...10 %
Supply number of phases	Single phase 3 phases
Line current	29.9 A for 240 V single phase 4 kW / 5 hp 30.8 A for 240 V 3 phases 5.5 kW / 7.5 hp 34.9 A for 200 V single phase 4 kW / 5 hp 35 A for 200 V 3 phases 5.5 kW / 7.5 hp
EMC filter	Level 3 EMC filter
Variant	Without remote graphic terminal
Assembly style	With heat sink
Apparent power	7 kVA at 240 V single phase 4 kW / 5 hp 12.8 kVA at 240 V 3 phases 5.5 kW / 7.5 hp
Maximum prospective line I _{sc}	22 kA for 3 phases 5 kA for single phase
Maximum transient current	21 A for 60 s, single phase 33 A for 60 s, 3 phases
Nominal switching frequency	12 kHz
Switching frequency	1...16 kHz adjustable 12...16 kHz with derating factor
Asynchronous motor control	Flux vector control without sensor, standard Voltage/frequency ratio, 5 points Voltage/frequency ratio - Energy Saving, quadratic U/f Voltage/frequency ratio, 2 points
Synchronous motor control profile	Vector control without sensor, standard
Communication port protocol	Modbus CANopen
Type of polarization	No impedance for Modbus

Fuente: Schneider Electric.

Las especificaciones completas del variador se encuentran en el anexo: Guía de Instalación Altivar 61.

3.3.1.2 PLC

El PLC que se usa es de marca Siemens, modelo LOGO! de referencia 6ED1 052-1MD00-0BA7, con los módulos de fuente LOGO! Power y salidas análogas AM2 AQ que se encuentran disponible en las instalaciones del proyecto (Figura 18).

Figura 18. PLC LOGO! Siemens.



Fuente: Siemens.

A continuación, se pueden observar los datos técnicos nominales del PLC dados por el fabricante (Figura 19).

Figura 19. Datos técnicos del PLC LOGO.

Display	
with display	Yes
Installation type/mounting	
Mounting	on 35mm DIN rail, 6 spacing units wide
Supply voltage	
Rated value (DC)	Yes
• 12 V DC	Yes
• 24 V DC	Yes
permissible range, lower limit (DC)	10.8 V
permissible range, upper limit (DC)	28.8 V
Time of day	
Time switching clocks	
• Number	333
• Power reserve	480 h
Digital inputs	
Number of digital inputs	8; Of which 4 can be used in analog mode (0 to 10 V)
Digital outputs	
Number of digital outputs	4; Relays
Short-circuit protection	No; external fusing necessary
Relay outputs	
Switching capacity of contacts	
— with inductive load, max.	3 A
— with resistive load, max.	10 A

Fuente: Siemens.

Las especificaciones completas del PLC se encuentran en el anexo: Hoja de datos LOGO! 6ED10521MD000BA7.

Para la salida análoga del LOGO es necesario conectar el módulo AM2 AQ, de referencia 6ED1055-1MM00-0BA1 la cual cuenta con dos salidas analógicas y tiene un rango de tensión de 0 a 10 V (Figura 20).

Figura 20. Módulo AM2 AQ.



LOGO! AM2 AQ MODULO DE AMPL.,
AL: 24V DC, 2 SA, 0-10V, 0/4-20MA

Diseño/montaje	
Montaje	sobre perfil normalizado de 35 mm, 2 módulos de ancho
Tensión de alimentación	
12 V DC	No
24 V DC	Sí
Salidas analógicas	
Nº de salidas analógicas	2
Rangos de salida, tensión	
0 a 10 V	Sí

Fuente: Siemens.

Las especificaciones completas del módulo AM2 AQ se encuentran en el anexo: Hoja de datos módulo de expansión 6ED10551MM000BA1

3.3.2 Tarjeta para adquisición de datos

La tarjeta electrónica tiene como finalidad la adquisición de los datos más relevantes del banco de trefilado, en esta sección se presentan los elementos electrónicos principales que componen el diseño. En el Capítulo 5 se expone el diseño final de la PCB.

3.3.2.1 Convertidor DC-DC LM2596 reductor con voltímetro

Para la alimentación de la tarjeta de desarrollo ESP32 se propone la utilización de este módulo, el cual está basado en el Regulador DC-DC Step Down LM2596 (Figura 21). Reduce al mínimo el uso de componentes externos para simplificar el diseño de fuentes de alimentación (Mactronica, 2021b).

Figura 21. Módulo DC-DC LM2596.



Fuente: Mactronica.

Características:

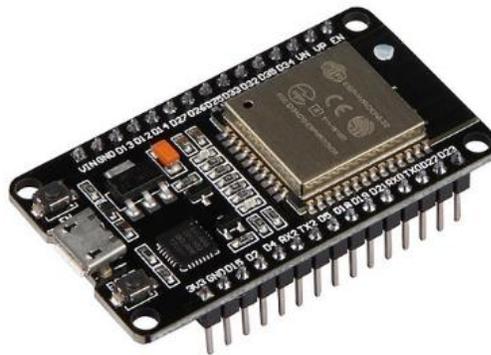
- Voltaje de entrada: 4.0 a 40V
- Voltaje de salida ajustable: 1.5 a 35V
- Corriente de salida máxima: 2A
- Frecuencia de switching: 150 KHz
- Rango del voltímetro: 0 a 40V, error $\pm 0.1V$
- Protección contra inversión de polaridad

Las especificaciones completas del convertidor DC-DC se encuentran en el anexo: Hoja de datos LM2596.

3.3.2.2 Tarjeta de desarrollo ESP32 WIFI BLUETOOTH

El ESP32 es un SoC (System on Chip) que integra el procesador de 32 bits LX6, de doble núcleo que trabaja en modo normal a 160MHz (Figura 22). Permite utilizar perfiles de transmisión de audio, de puerta (Gateway) Bluetooth - Wifi, o de implementación de dispositivos HID (interfaces hombre-máquina), con periféricos existentes o cualquier tipo de dispositivo de control (Mactronica, 2021c).

Figura 22. Tarjeta de desarrollo ESP32.



Fuente: Mactronica.

Especificaciones:

- Doble núcleo de 32 bits con velocidad de 160MHz
- Memoria ROM (lectura de información) de 448 kBytes.
- Memoria SRAM de 520kBytes

Dispone de 48 Pines

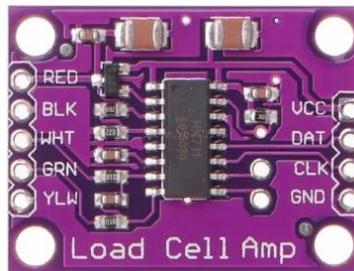
- 18 ADC de 12 bits
- 2 DAC de 8 bits
- 10 pines sensores de contacto
- 16 PWM
- 20 entradas/salidas digitales

Las especificaciones completas de la tarjeta ESP32 se encuentran en el anexo: Guía de usuario ESP32.

3.3.2.3 Conversor HX711 24 BITS A/D V2

La placa de amplificador de celda de carga IC HX711 (Figura 23), al conectarse a una tarjeta, en este caso la ESP32, al programarse lee los cambios en la resistencia de la celda de carga y con calibración en la medición se podrá obtener medidas de peso más precisas (Mactronica, 2021a).

Figura 23. Conversor HX711.



Fuente: Mactronica.

Especificaciones:

- Velocidad de datos de salida: 10Hz o 80Hz opcional
- Rechazo simultáneo de interferencias de potencia de 50Hz y 60Hz
- Corriente de funcionamiento típica: $<1.7\text{mA}$, corriente de apagado: $<1\mu\text{A}$
- Rango de voltaje de funcionamiento: 2.6 a 5.5 V

Las especificaciones completas del conversor HX711 se encuentran en el anexo: Hojas de datos HX711.

4. Diseño del sistema de control

El objetivo del sistema de control es variar la velocidad dentro de los parámetros expuestos en la sección 3.2.1 Velocidad de salida del alambre, el rango de velocidades requeridas es de 0 a 20 m/s. Por las limitaciones del proyecto y los equipos disponibles en el lugar del proyecto, el montaje del motor con motorreductor no da el rango por lo que se opta en hacer las pruebas de 0 a 20 m/min para implementar una metodología para el diseño del sistema de control.

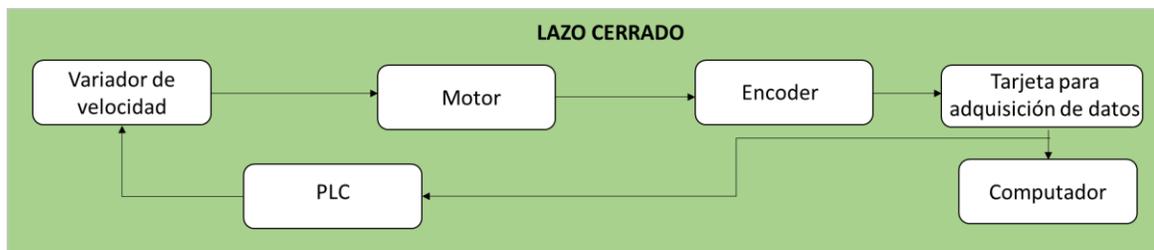
Se propone implementar un control de lazo abierto (Figura 24) y un lazo cerrado (Figura 25) con la finalidad de verificar comportamiento del motor, lectura del encoder y recolección de datos.

Figura 24. Desglose funcional lazo abierto



Fuente: Propia.

Figura 25. Desglose funcional lazo cerrado.



Fuente: Propia.

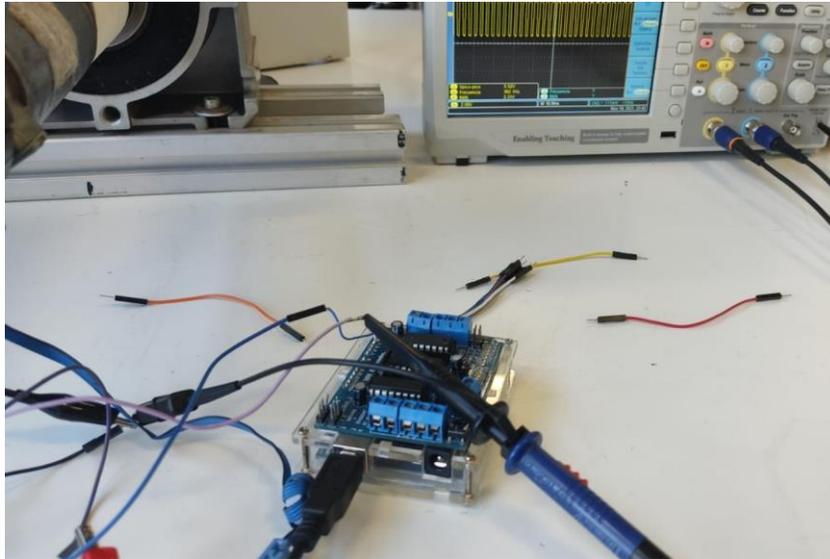
4.1 Estrategia de control

Con la finalidad de realizar pruebas funcionales del diseño propuesto se procede a hacer un montaje que consta de un armario eléctrico con los elementos mencionados en la sección 3.3.1 y se acopla al eje del motor trifásico un motor de corriente continua con el fin de hacer lecturas con el encoder que trae este.

4.1.1 Adquisición de datos del motor con motorreductor

Por medio de una tarjeta Arduino Uno con la placa complementaria: Driver L293D para motor (Figura 26), se realizan las conexiones para tomar la señal del encoder reemplazando la tarjeta ESP32 al no estar disponible en el momento de las pruebas. Se procede a realizar la adquisición de datos de los valores de velocidad del motor a utilizar en el sistema de control.

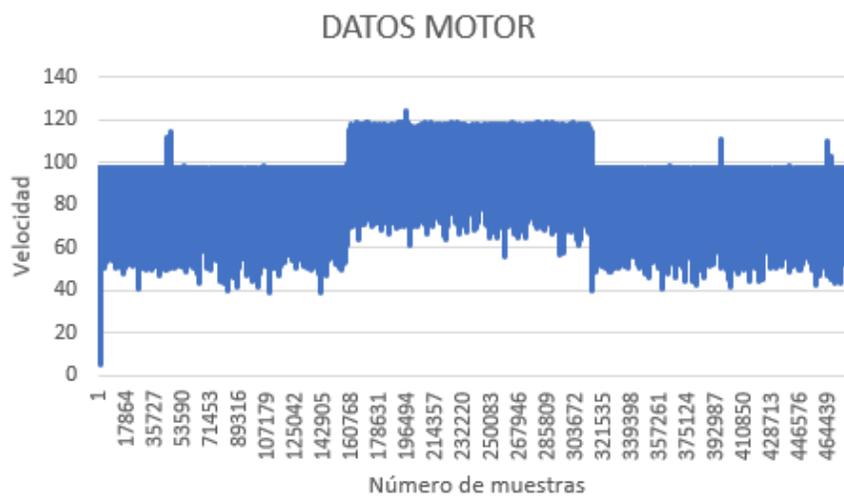
Figura 26. Tarjeta Arduino Uno con la placa complementaria para adquisición de datos de la planta.



Fuente: Propia.

Los datos recolectados son los que se observan en la Figura 27, se toman datos cuando el variador está a 15 Hz (89 RPM) durante unos cinco minutos aproximadamente; se hace un cambio a 18 Hz (100 RPM) por cinco minutos, por último se vuelve a colocar en 15 Hz por el tiempo mencionado anteriormente.

Figura 27. Datos tomados del motor.



Fuente: Propia.

En MATLAB se realiza el procesamiento de los datos tomados del motor, en este caso se toman cada 5 datos para disminuir la cantidad de muestras (Figura 28).

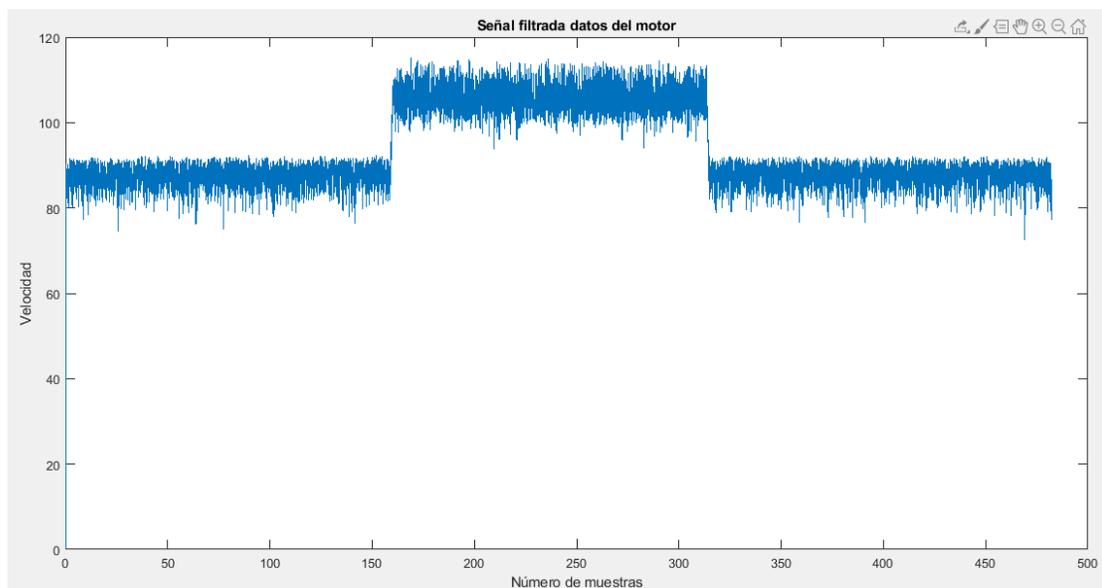
Figura 28. Script para filtrar datos tomados.

```
muestras=table2array(Prueba);  
ixd=1:5:length(muestras);  
muestras_5=muestras(ixd,:);  
b=(1/9)*ones(1,9);  
filtrado=filter(b,1,muestras_5);  
filtradol=filter(b,1,filtrado);  
filtrado2=filter(b,1,filtradol);
```

Fuente: MATLAB.

Por medio de la función ‘filter’ como se observa en la Figura 29, el filtro digital disminuye el ruido haciendo una atenuación de la señal obtenida.

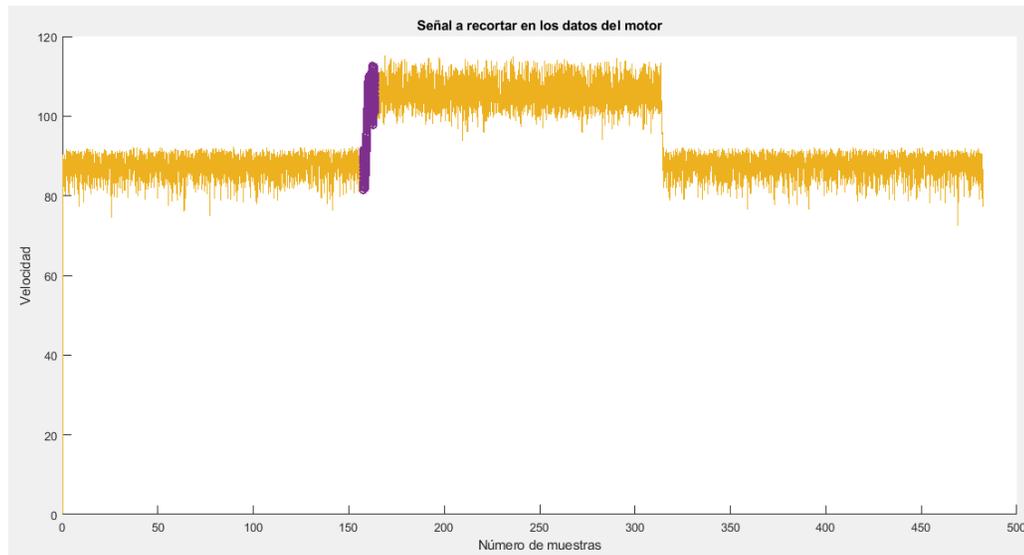
Figura 29. Señal filtrada.



Fuente: MATLAB.

Con la señal filtrada de los datos del motor como se muestra en la Figura 30, se procede a recortar los datos que se pueden observar de color morado.

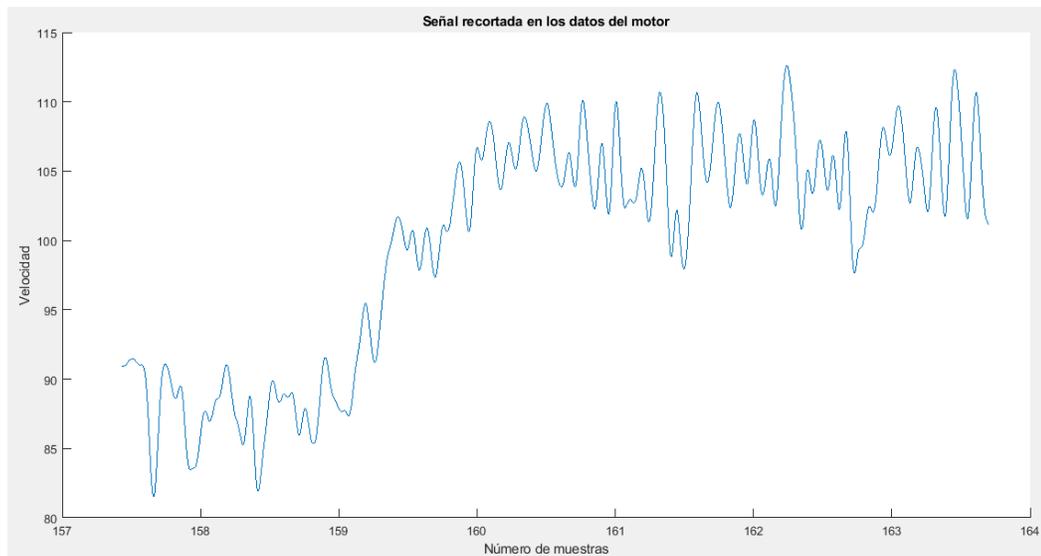
Figura 30. Datos para recortar en la señal.



Fuente: MATLAB.

Para la señal recortada se toman los datos en el número de muestras desde el 31500 hasta el 32752, donde se observa el cambio de velocidad del motor cuando la frecuencia en el VSD pasa de 15 a 18 Hz (Figura 31).

Figura 31. Señal recortada en los datos tomados del motor.



Fuente: MATLAB.

4.1.2 Función de transferencia

Con los datos tomados del motor se procede a hacer un modelo de una planta de primer orden para observar su comportamiento y validar el sistema.

En el control de procesos, un sistema de primer orden tiene una representación de la dinámica del proceso como:

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1}$$

Donde,

k = la ganancia del proceso.

τ s = constante de tiempo.

Para calcular la constante de tiempo “TaoPrimerorden” se toma el valor en “y” del dato máximo de la señal recortada, se multiplica por el valor de 62,8% que es cuando alcanza un cambio total en la respuesta (amplTao). Con este valor se buscan los valores menores a la amplitud del Tao. La variable “TaoPrimerorden” viene dado por it como se observa en la Figura 32.

Figura 32. Script para hallar la constante de tiempo.

```

%%Constante tiempo
min=88.75;                %%Valor mínimo en los datos de la señal recortada
maxval=106.4564;         %%Valor máximo en los datos de la señal recortada
i=filtrado(31500:32752,:); %%Se toma el intervalo de datos mencionado
plot(i(:,1),i(:,2));    %%Gráfica del intervalo de datos
idntl=[idnt(:,1) idnt(:,2)-min]; %%Valores de la señal filtrada
yfinal=16.4798;         %%Valor en y del dato máximo
amplTao=yfinal*0.628;   %%Valor cuando alcanza el 62.8% del cambio total en la respuesta
misa=find(idntl(:,2)<amplTao); %%Busca los valores menores a la amplitud del Tao
it=idntl(length(misa*0.001),1); %%Valor de número de muestras a tiempo
TaoPrimerorden=it;     %%Valor de la constante

```

Fuente: MATLAB.

La función de transferencia para esta planta es:

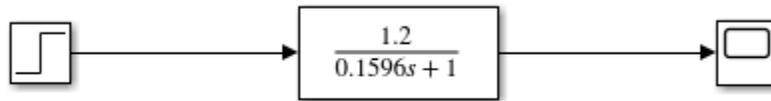
$$G(s) = \frac{1.2}{0.1596s + 1}$$

La ganancia está dada por el cambio de voltaje en el variador cuando de 15 Hz se cambia a 18 Hz.

4.1.3 Controlador

Para evaluar el tipo de controlador a usar se utiliza la herramienta Simulink de MATLAB para simular el lazo abierto (Figura 33) con la función de transferencia calculada anteriormente:

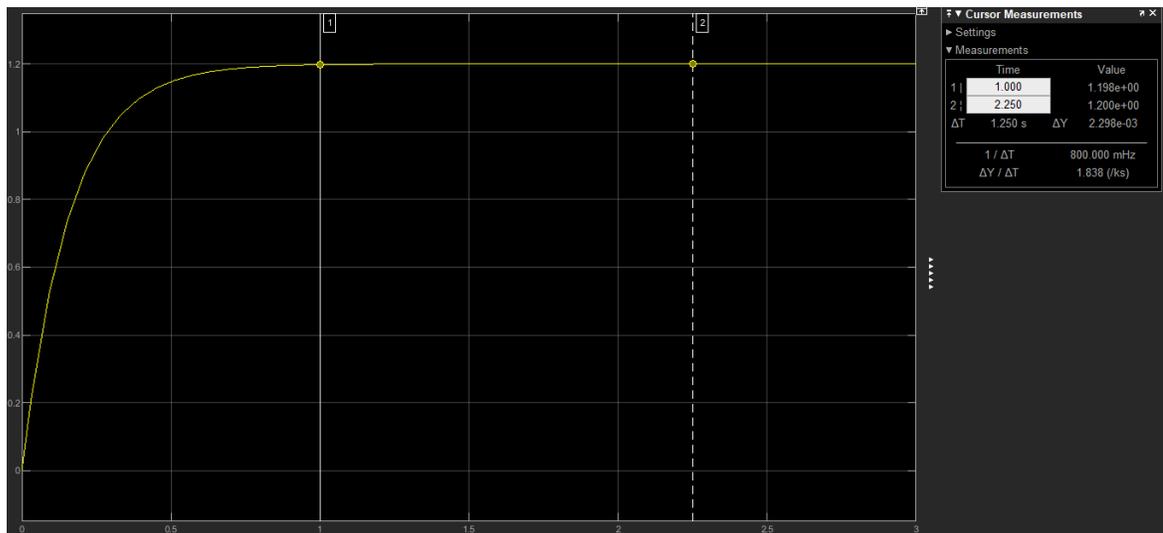
Figura 33. Lazo abierto sistema de velocidad.



Fuente: MATLAB.

La respuesta al escalón del lazo abierto del sistema de velocidad es la que se observa en la Figura 34. La señal obtenida es una curva de respuesta exponencial, en donde la respuesta máxima está dada en 1 segundo.

Figura 34. Respuesta al escalón unitario.



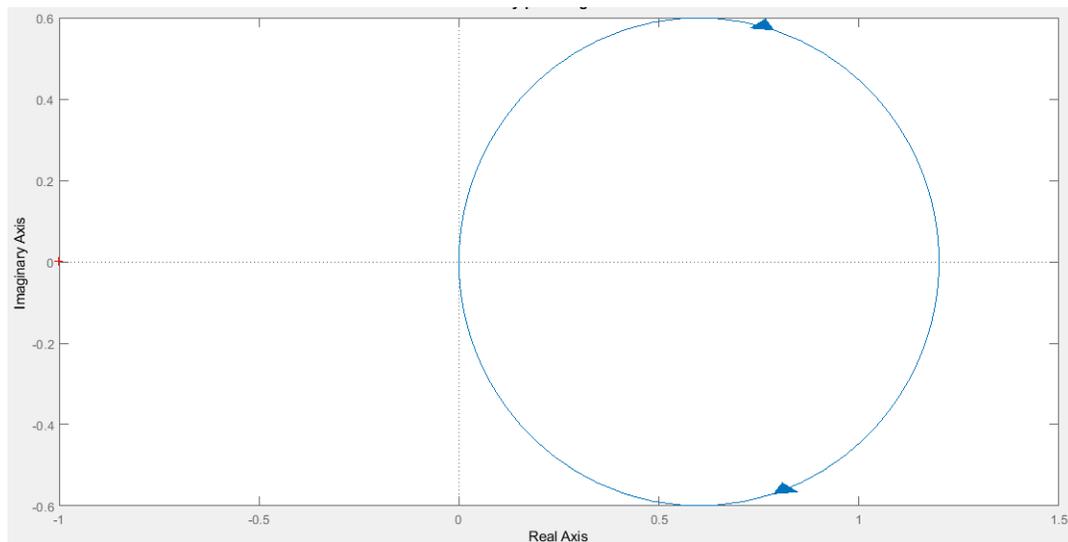
Fuente: Simulink.

El tipo de control a usar es de tipo PI, según los autores Åström & Hägglund: “los procesos estables se pueden controlar mediante un controlador I si los requisitos de comportamiento son modestos. La acción proporcional da una mejora adicional de comportamiento. Sin tomar en cuenta las saturaciones, a un proceso con dinámica de

primer orden se le puede dar un comportamiento deseado utilizando un controlador PI. Si la respuesta a un escalón se parece a aquella de un sistema de primer orden o, más precisamente, si la curva de Nyquist permanece sólo en el primer y cuarto cuadrante, entonces el control PI es suficiente. Muchos procesos encontrados en control de procesos tienen dinámicas con respuestas a un escalón esencialmente monótonas, a menudo con retardo de tiempo. Si la dinámica está dominada por el retardo la acción derivativa da unas mejoras de comportamiento modestas comparadas con el control PI, sin embargo la acción derivativa da mejoras significativas en el caso de procesos donde domina la constante de tiempo.” (Åström & Hägglund, 2007, p. 91-92).

De acuerdo con lo anterior, en MATLAB se puede observar el diagrama de Nyquist (Figura 35) de la planta obtenida en la sección 4.1.2., tiene un comportamiento estable por lo que el tipo de control a implementar será de tipo Proporcional – Integral.

Figura 35. Diagrama de Nyquist para la planta a controlar.



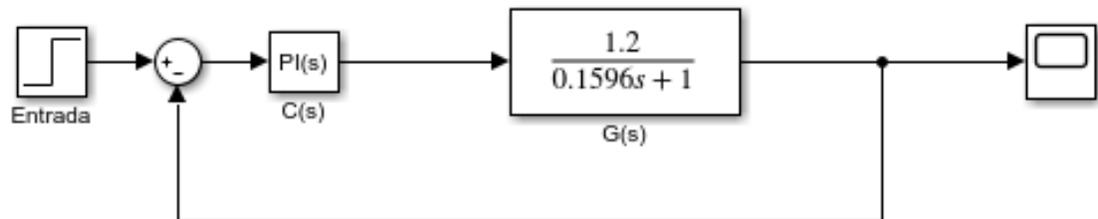
Fuente: MATLAB.

4.1.3.1 Controlador PI

Los criterios de diseño que se tendrán en cuenta son los requerimientos por el Grupo de Investigación DSIM – Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, los cuales son el tiempo de respuesta de 1 segundo y tolerancia permitida del 5% como se menciona en la sección 3.2.1. De acuerdo a la teoría y características técnicas del LOGO! para este sistema se implementa un controlador PI para el control de la velocidad del motor.

Por medio de Simulink de MATLAB se simula el lazo cerrado para evaluar las constantes del controlador. Donde $C(s)$ es el controlador PI y $G(s)$ es la función de transferencia del modelo de la planta calculado en la sección 4.1.2 con realimentación unitaria (Figura 36).

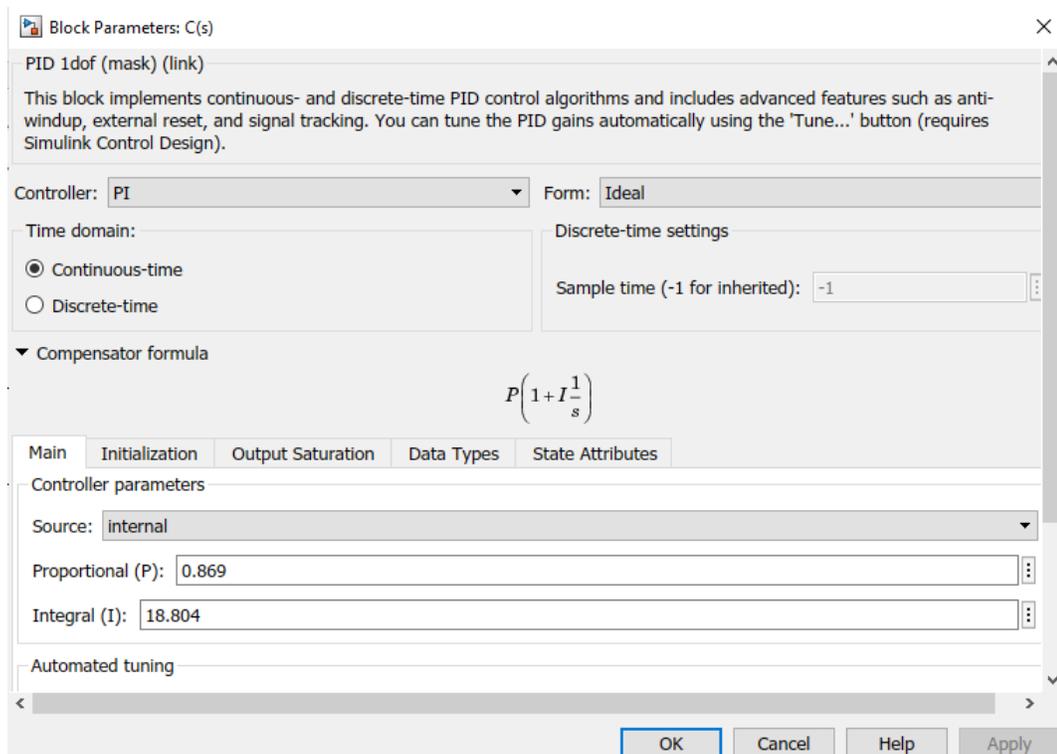
Figura 36. Lazo cerrado sistema de velocidad.



Fuente: Simulink.

En la Figura 37 se puede observar los parámetros del bloque del controlador $C(s)$, el tipo de controlador es Proporcional – Integral ideal en el dominio continuo del tiempo.

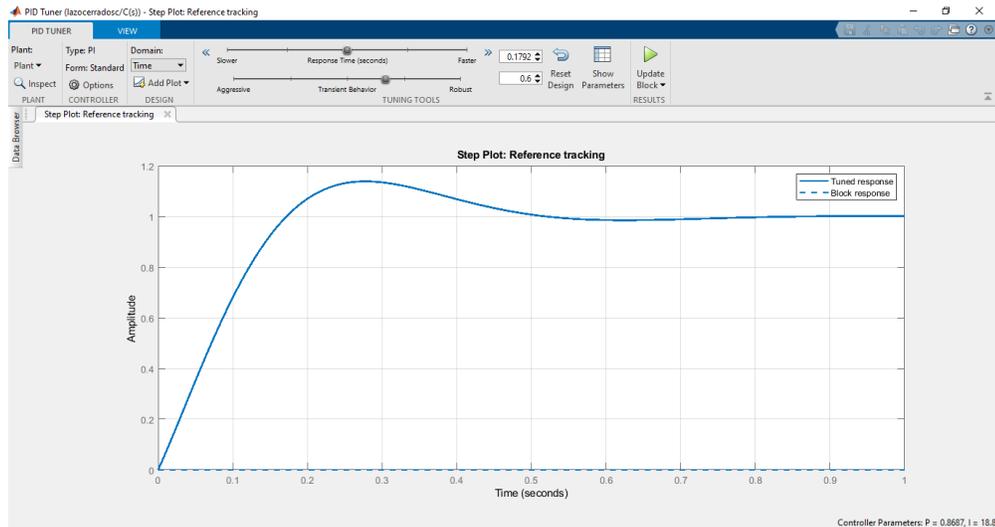
Figura 37. Bloque de parámetros del controlador.



Fuente: Simulink.

Para el método de sintonización del controlador, se usa la herramienta de MATLAB: PID Tuner App. El tiempo de respuesta es de 0.1792 s, con un comportamiento transitorio robusto de 0.6 (Figura 38).

Figura 38. PID Tuner.



Fuente: Simulink.

Las constantes del controlador son:

Proporcional (P): 0.869

Integral (I): 18.804

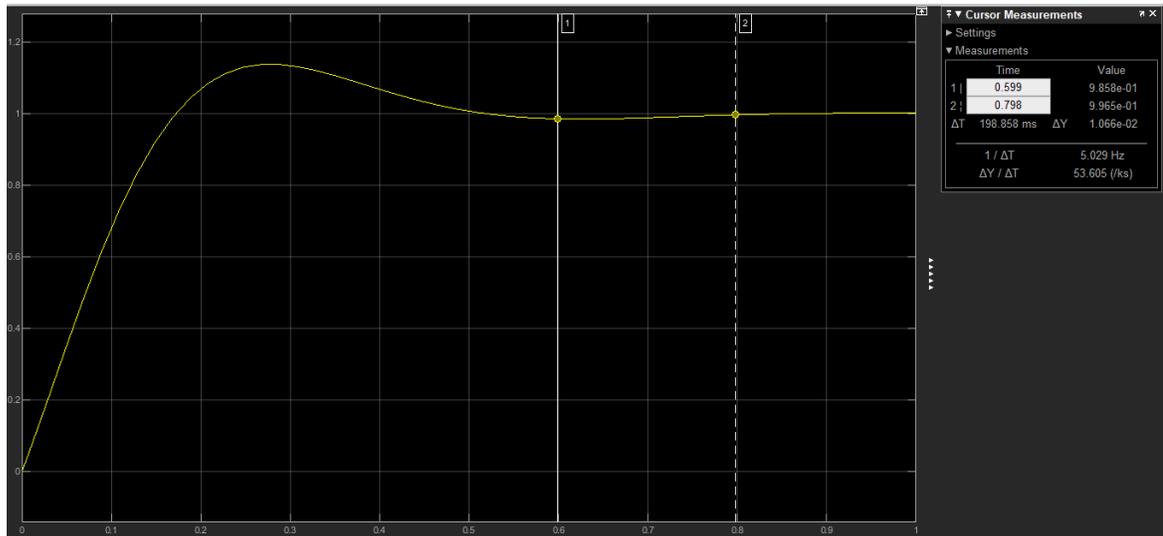
Donde $C(s)$ es el controlador PI que tiene la fórmula que se muestra a continuación:

$$C(s) = P \left(1 + I \frac{1}{s} \right) = 0.869 \left(1 + 18.804 \frac{1}{s} \right)$$

La respuesta al escalón del lazo cerrado del sistema de velocidad es la que se observa en la Figura 39. Por medio de la herramienta del cursor de medidas se halla gráficamente:

- Tiempo de subida: 0.174 s.
- Tiempo pico: 0.282 s.
- Tiempo de asentamiento: 0.962 s.

Figura 39. Respuesta en lazo cerrado.



Fuente: Simulink.

4.2 Implementación del sistema de control

4.2.1 Lazo abierto control de velocidad

Para la implementación del lazo abierto se realiza el montaje y conexión del VSD, motores acoplados, osciloscopio para la lectura del encoder y multímetro para obtener datos de la tensión en las terminales en el motor DC (Figura 40).

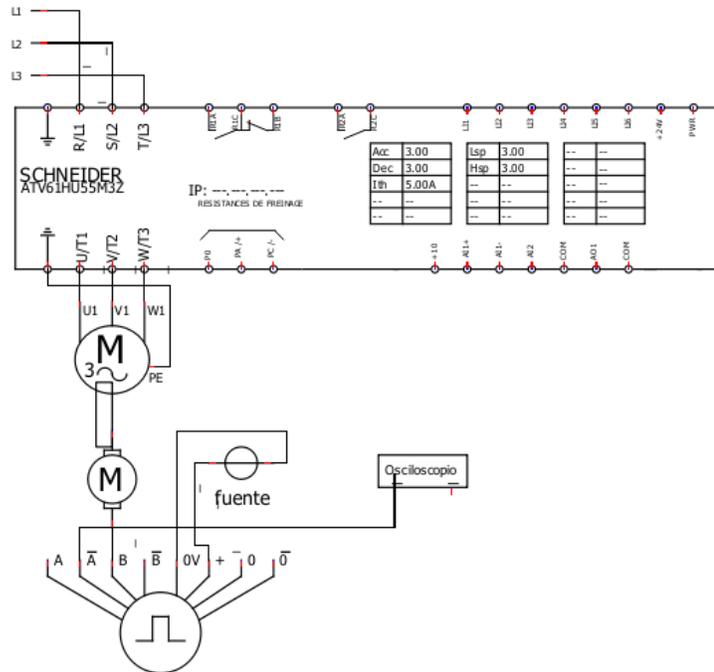
Figura 40. Implementación lazo abierto.



Fuente: Propia.

En la Figura 41, se presenta el diagrama de las conexiones para el lazo abierto.

Figura 41. Diagrama de conexiones lazo abierto.

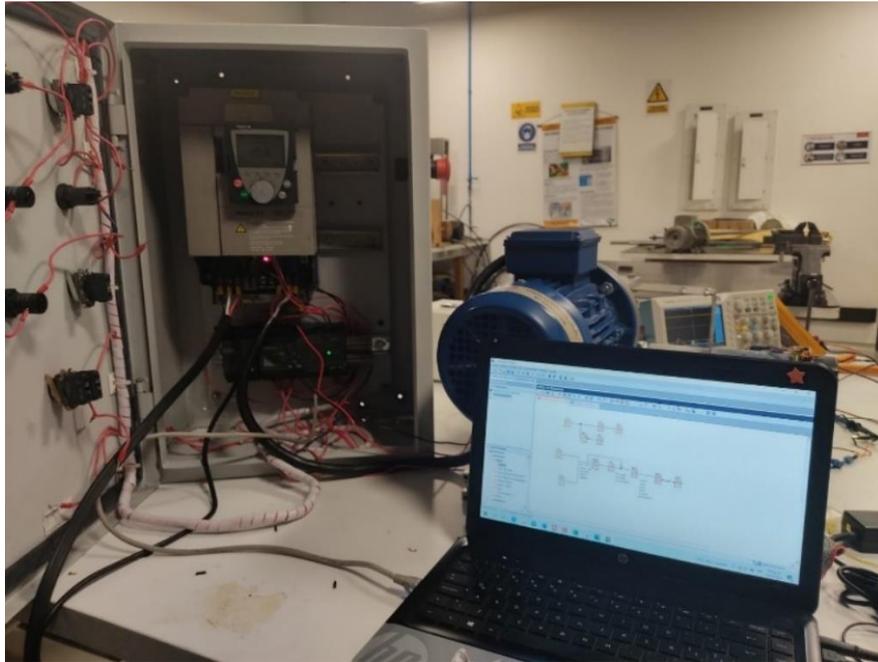


Fuente: Diagrama realizado en QElectroTech.

4.2.2 Lazo cerrado control de velocidad

Se procede a implementar el lazo cerrado, el lazo se cierra con la señal del encoder que en este caso se acondiciona la señal, haciendo una lectura de la señal en la tarjeta de desarrollo ESP32 y con una salida digital se envía la señal al PLC. Si se envía la señal del encoder directamente al PLC no es posible la lectura. Es necesario conectar un potenciómetro como entrada analógica al PLC que tendrá como objetivo actuar como setpoint de la velocidad deseada y poder hacerse la comparación con la lectura del encoder para que finalmente la salida de velocidad sea la real (Figura 42).

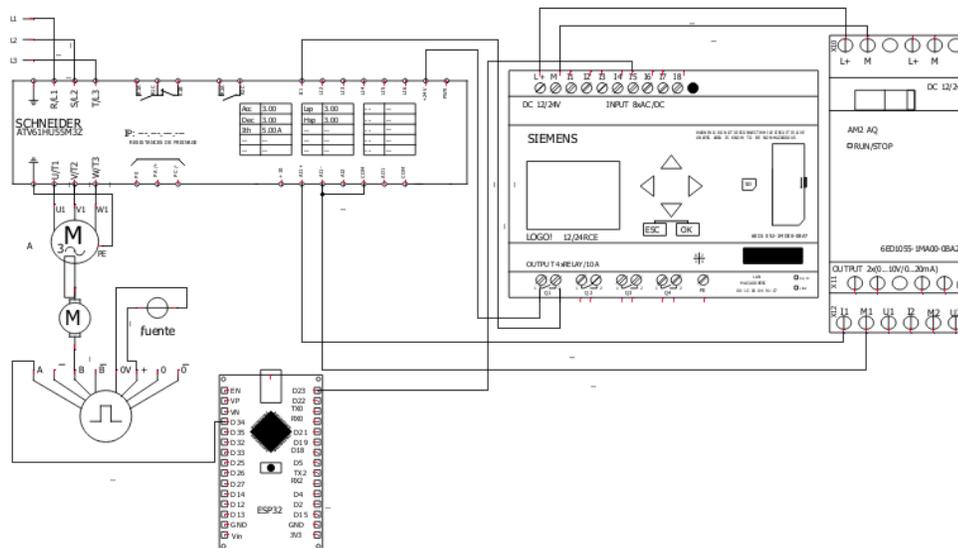
Figura 42. Implementación lazo cerrado.



Fuente: Propia.

En la Figura 43, se presenta el diagrama de las conexiones para el lazo cerrado. Se dejan sin conexiones de I1 a I4 para uso de pulsadores y paro de emergencia; al igual que Q2 a Q4 para pilotos luminosos para indicar algún estado del proceso.

Figura 43. Diagrama de conexiones lazo abierto.



4.3 Parametrización y pruebas

En esta sección con la implementación del lazo abierto y cerrado se procede a hacer las parametrizaciones necesarias y las pruebas funcionales del sistema de control de velocidad.

4.3.1 Parametrización del variador de velocidad ATV61HU55M3Z

Con los datos de la placa del motor se hace la parametrización del variador en el programa SoMove (Figura 44), el cual se comunica directamente con el VSD. Para el tiempo de establecimiento de la velocidad del motor se tendrán en cuenta los valores parametrizados en las rampas de aceleración (ACC) y desaceleración (DEC) con el objetivo de forma experimental hacer la validación de los tiempos teniendo en cuenta la inercia del motor y la carga que tendrá con el tambor del banco de trefilado.

Figura 44. Parametrización de los datos del motor en el VSD.

Código	Etiqueta larga	Valor actual	Valor predeterminado	Valor mín.	Valor máx.	Dirección lógica
LAC	Nivel acceso funciones	Estándar	Estándar			3006
TCC	Tipo control 2/3 hilos	Ctrl. 2 hilos	Ctrl. 2 hilos			11101
CFG	Selección Macro config	Bomb.Vent.	Bomb.Vent.			3052
BFR	Frec estandar motor	60Hz NEMA	50 Hz IEC			3015
IPL	Conf Pérdida fase red	Rueda libre	Rueda libre			7002
TUS	Estado del autoajuste	No realiz.	No realiz.			9609
PHR	Rotación fases motor	ACB	ABC			13401
NPR	Potencia nominal motor	2 HP	7.5 HP	1 HP	15 HP	9613
UNS	Tensión nominal motor	220 V	230 V	100 V	240 V	9601
NCR	Intensidad Nom Motor	6.8 A	20 A	6.8 A	33 A	9603
FRS	Frecuencia nom motor	60 Hz	60 Hz	10 Hz	500 Hz	9602
NSP	Velocidad nom motor	1700 rpm	1780 rpm	0 rpm	60000 rpm	9604
TFR	Frec. máxima de salida	60 Hz	72 Hz	10 Hz	500 Hz	3103
ITH	Intensidad térmica motor	6.8 A	20 A	5.5 A	33 A	9622
ACC	Rampa aceleración (s)	10 s	3 s	0.1 s	999.9 s	9001
DEC	Rampa desaceleración (s)	10 s	3 s	0.1 s	999.9 s	9002
LSP	Velocidad mínima	0 Hz	0 Hz	0 Hz	60 Hz	3105
HSP	Velocidad máxima	60 Hz	60 Hz	0 Hz	60 Hz	3104
AC2	Rampa aceleración2 (s)	5 s	5 s	0.1 s	999.9 s	9012
DE2	Rampa dec 2 (s)	5 s	5 s	0.1 s	999.9 s	9013
INR	Incremento de rampa	0.1	0.1			9020
DCF	Coef. parada rápida	4	4	0	10	11230

Fuente: SoMove.

Cuando el VSD se encuentra a 60 Hz la velocidad medida con el tacómetro EXTECH en el motorreductor es de 208 RPM y 30 m/min (Figura 45).

Figura 45. Medición de m/min del motor.



Fuente: Propia

Como se indica a inicios de este capítulo, las pruebas se harán de 0 a 20 m/min, por lo que se calcula la frecuencia máxima de salida que se debe parametrizar el VSD para no superar los 20 m/min.

$$60 \text{ Hz} \rightarrow 30 \text{ m/min}$$

$$X \rightarrow 20 \text{ m/min}$$

$$X = \frac{20 \text{ m/min} * 60 \text{ Hz}}{30 \text{ m/min}} = 40 \text{ Hz}$$

Al hacer la parametrización de la frecuencia máxima de salida (TFR) a 40 Hz y la medición con el tacómetro EXTECH se observa una velocidad 23,86 m/min (Figura 46) por lo que se empieza a disminuir la frecuencia y midiendo la velocidad mediante el tacómetro se llega al que valor de TFR en el VSD debe ser de 35 Hz para que este en una velocidad máxima de 20 m/min (Figura 47).

Figura 46. Medición de velocidad con el VSD a 40 Hz.



Fuente: Propia.

Figura 47. Medición de velocidad con el VSD a 35 Hz.



Fuente: Propia.

Se realizan las mediciones de las velocidades con el tacómetro EXTECH para las RPM y m/min de 0 a 35 Hz como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Equivalencia de la velocidad de Hz a RPM.

Valor VSD (Hz)	Medición tacómetro (RPM)	Medición tacómetro (m/min)	Valor VSD (Hz)	Medición tacómetro (RPM)	Medición tacómetro (m/min)
0	0	0	18	106,9	10,76
1	5,9	0,59	19	112,8	11,28
2	11,8	1,14	20	119,2	11,94
3	17,8	1,74	21	124,7	12,48
4	23,7	2,34	22	130,6	13,08
5	30	3,01	23	136,6	13,68
6	35,6	3,54	24	142,5	14,28
7	41,5	4,14	25	149,6	15,06
8	47,5	4,74	26	154,4	15,48
9	53,4	5,34	27	160,3	16,08
10	59,4	5,94	28	166,3	16,68
11	65,3	6,54	29	172,2	17,28
12	71,2	7,14	30	179,4	18,12
13	77,2	7,74	31	184,1	18,48
14	83,1	8,34	32	190,1	19,08
15	89,6	9,15	33	196,2	19,68
16	95,1	9,54	34	201,9	20,28
17	100,9	10,14	35	207,7	20,87

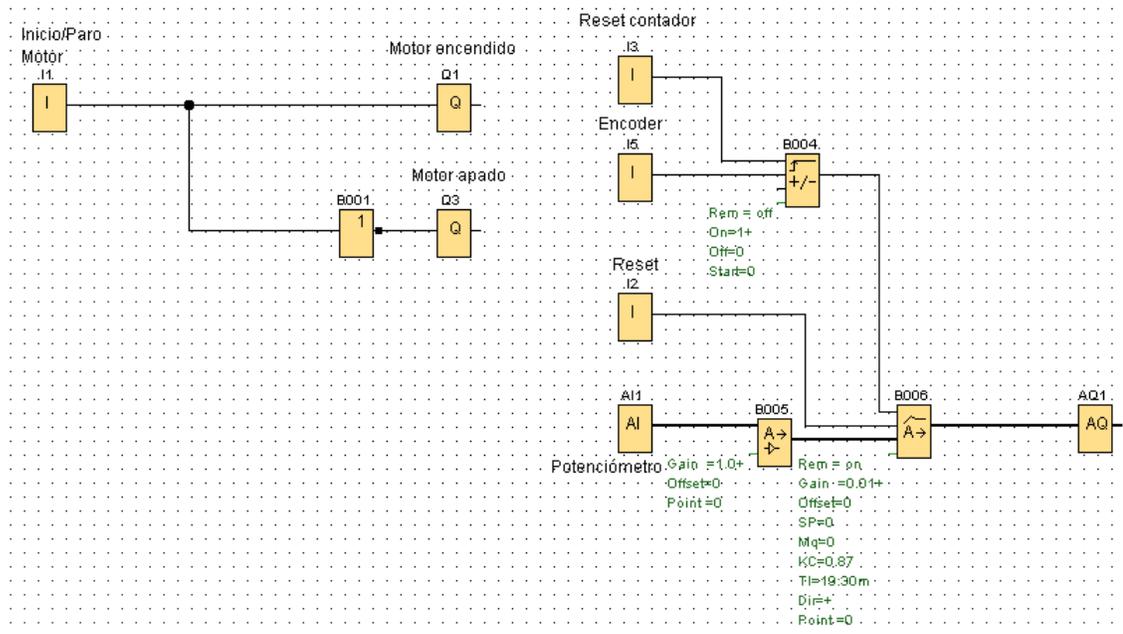
Fuente: Propia.

Estos datos serán de utilidad, debido a que la pantalla que se observa en el montaje prueba es el del VSD, en donde el dato que visualizado es en Hz.

4.3.2 Programación del PLC LOGO!

Con la implementación de lazo cerrado y los requerimientos del sistema de control de velocidad se procede a realizar la programación del PLC en LOGO!Soft Confort V8. (Figura 48).

Figura 48. Programa a implementar en LOGO!



Fuente: Diseño realizado en LOGO!Soft.

De acuerdo a las características del LOGO! y la selección del controlador, se parametriza el bloque análogo denominado Regulador PI (B006), en donde se colocan los valores del controlador obtenidos en la sección 4.1.3.1. También se colocan los datos de la consigna del valor deseado “SP”, consigna manual, la ganancia, las características del sensor, en este caso de 0 a 10V (Figura 49).

Figura 49. Parametrización bloque Regulador PI.

Fuente: Datos tomados del software LOGO!Soft Comfort.

En la Tabla 3 se pueden observar las entradas y salidas asignadas en programa del LOGO!

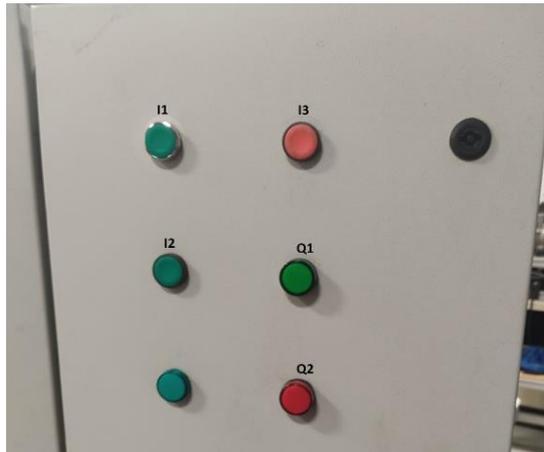
Tabla 3. Entradas y salidas en el LOGO! y tablero.

ENTRADAS		
Denominación LOGO!Soft	Función	Elemento en el tablero
I1	Inicio/Paro	Pulsador NA
I2	Reset bloque PI	Pulsador NA
I3	Reset contador	Pulsador NC
I5	Lectura Encoder	Conexión al encoder del motor
AI1	Setpoint	Potenciómetro 20k Ω
SALIDAS		
Q1	Inicio motor	Piloto luminoso verde
Q2	Paro motor	Piloto luminoso rojo

Fuente: Propia.

La disposición final en el cofre del banco de pruebas para los pulsadores y pilotos luminosos son los que se observan en la Figura 50. Teniendo en cuenta la Tabla 3 y el programa en el PLC LOGO! se puede saber qué pulsadores se deben oprimir para el funcionamiento de la programación.

Figura 50. Disposición entradas y salidas en el cofre eléctrico.



Fuente: Propia

4.3.3 Programación de tarjeta de desarrollo ESP32

La tarjeta de desarrollo ESP32 tiene como objetivo realizar la lectura del encoder reemplazando el osciloscopio como se puede observar en la implementación de lazo abierto del sistema de control. La programación de la tarjeta se hace en el IDE de Arduino, en donde se puede agregar la librería de la ESP32 (Figura 51).

Figura 51. Programación tarjeta ESP32.

```

Trefiladora_tesis Arduino 1.8.16
Archivo Editor Programa Herramientas Ayuda

Trefiladora_tesis
#include <PID_v1.h>
#include "HX711.h"
#include <Adafruit_MAX31865.h>

// Use software SPI: CS, DI, DO, CLK
Adafruit_MAX31865 thermo = Adafruit_MAX31865(10, 11, 12, 13);
// use hardware SPI, just pass in the CS pin
//Adafruit_MAX31865 thermo = Adafruit_MAX31865(10);

// The value of the Rref resistor. Use 430.0 for FT100 and 4300.0 for FT1000
#define RREF 430.0
// The 'nominal' 0-degrees-C resistance of the sensor
// 100.0 for FT100, 1000.0 for FT1000
#define RNOMINAL 100.0

// HX711 circuit wiring
const int LOADCELL_DOUT_PIN = 32;
const int LOADCELL_SCK_PIN = 35;

#define PIN_OUTPUT 25

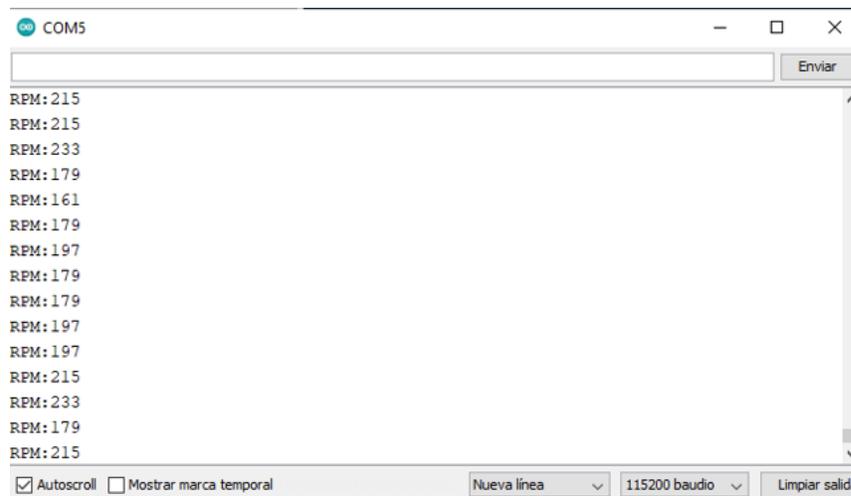
int Line_Count = 334;
int inputPin = 23;
int timerMs = 1000;
uint32_t RPM = 0;

const int ledPin = 16; // 12 corresponds to GPIO12
int cont print = 0;

```

La lectura de encoder hará parte de la medición y visualización de los datos más relevantes del banco didáctico de trefilado. La visualización se hará mediante el computador donde estará conectada la tarjeta de desarrollo ESP32 por medio del Monitor Serie del IDE de Arduino (Figura 52). De acuerdo con el avance del proyecto “Modelación numérica y física del proceso de trefilado industrial” a futuro se puede revisar si con una aplicación como interfaz en un dispositivo móvil.

Figura 52. Visualización velocidad por medio del Monitor Serie.



Fuente: Propia.

Para la lectura de las variables propias del proceso como lo son: velocidad, fuerza y temperatura se realiza una programación implícita para implementación a futuro con los sensores ya disponibles en el banco de trefilado didáctico (Figura 53).

Figura 53. Programación para lectura de variables.

```

Trefiladora_tesis
Serial.print("RPM:");
Serial.println(zpm);
Input = rpm;
myPID.Compute();
delay(10);
dacWrite(PIN_OUTPUT, Output);
ledcWrite(ledChannel, Output);
Serial.print("Output:");
Serial.println(Output);
cont_print++;
if (cont_print > 1000) {
  cont_print = 0;
  if (scale.is_ready()) {
    long reading = scale.read();
    Serial.print("HX711 reading: ");
    Serial.println(reading);
  } else {
    Serial.println("HX711 not found.");
  }
  uint16_t rtd = thermo.readRTD();
  Serial.print("RTD value: "); Serial.println(rtd);
  float ratio = rtd;
  ratio /= 32768;
  Serial.print("Ratio = "); Serial.println(ratio, 8);
  Serial.print("Resistance = "); Serial.println(RREF * ratio, 8);
  Serial.print("Temperature = "); Serial.println(thermo.temperature(RNOMINAL, RREF));
}

```

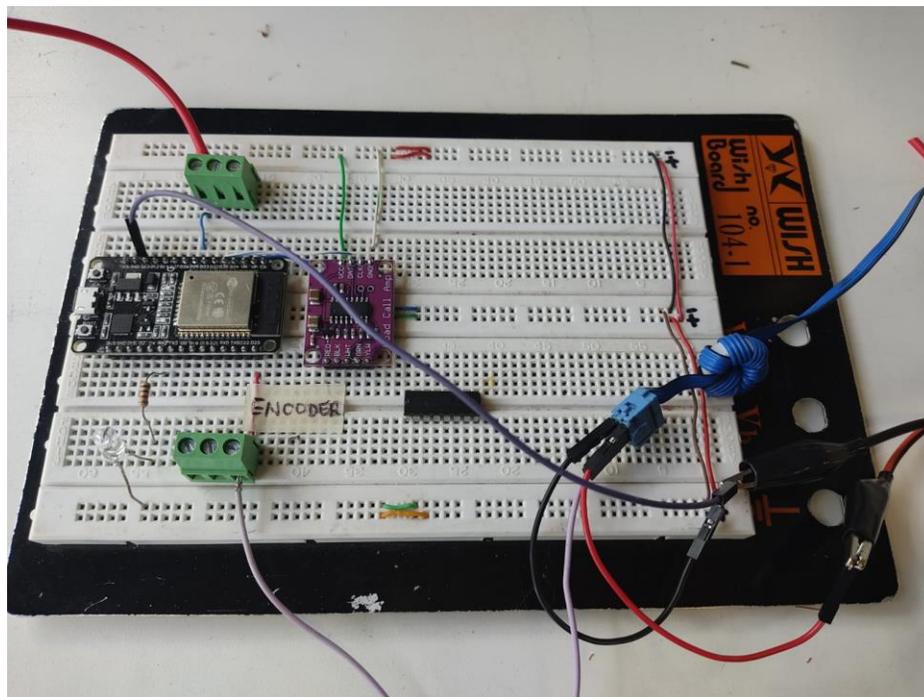
Fuente: Propia.

La programación completa para la tarjeta ESP32 se encuentra en el anexo: Trefiladora_tesis.ino

4.3.4 Montaje en Protoboard para pruebas

Para la realización de pruebas con la tarjeta ESP32 para la adquisición de datos se realiza el montaje en protoboard como se observa en la Figura 54. A la tarjeta ESP32 se conecta la señal del encoder (D23), la salida análoga que es la lectura del encoder (D25), pin CLK de la Celda de carga a D35, pin DAT de la Celda de carga a D32.

Figura 54. Montaje para pruebas de la tarjeta de adquisición.



Fuente: Propia.

4.3.5 Pruebas implementación lazo abierto

Se realiza la implementación del lazo abierto con la finalidad de observar los datos de la velocidad del motor. Teniendo la parametrización del VSD y las conexiones hechas como indica la sección 4.1.1, se realizan la prueba para la velocidad del motor, obteniendo los datos que se observan en la Tabla 4.

Tabla 4. Mediciones tomadas en el lazo abierto.

Valor VSD (Hz)	Medición osciloscopio (Hz)	Medición multímetro (mV)	Medición tacómetro (RPM)	Velocidad teórica (RPM)	Error porcentual velocidad
5	119,1	0,2	30	30,2	0,70%
10	240,1	0,3	59,4	61	2,60%
15	358,5	0,5	89,6	91,1	1,60%
20	472,7	0,6	119,2	120,1	0,75%
25	594,9	0,7	149,6	151,4	1,19%
30	710,5	0,8	179,4	180,6	0,70%
35	834,8	0,9	207,7	214,5	3,20%

Fuente: Propia.

El error porcentual se calcular de acuerdo a la Ecuación 4-2 con los datos de las RPM medidas y teóricas.

$$\text{error porcentual} = \left| \frac{\text{Valor teórico} - \text{Valor experimental}}{\text{Valor teórico}} \right| * 100\%$$

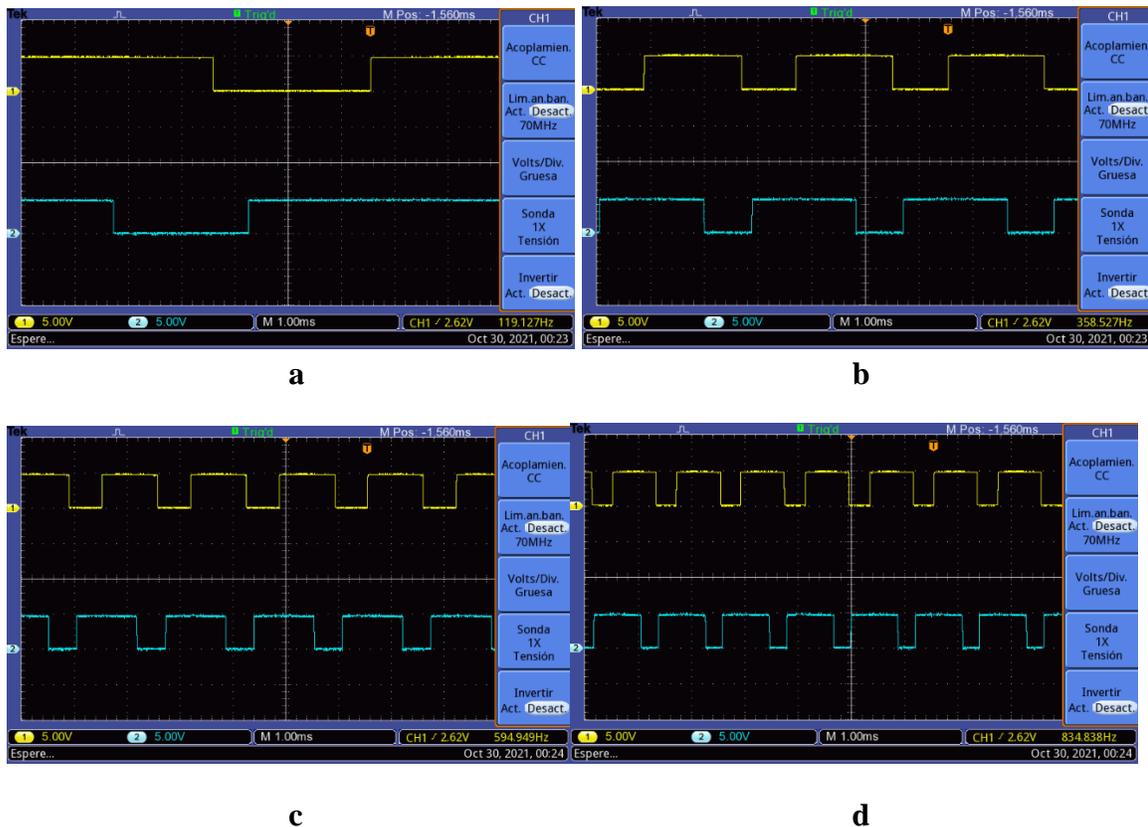
El error más alto es cuando el variador se encuentra la salida máxima de frecuencia, al compararse con los anteriores valores se llega a la conclusión que el error porcentual es aceptable para la finalidad del proyecto.

Con el dato de los pulsos por rotación (PPR) del encoder en este caso 236 , my la medición hecha en el osciloscopio se puede hacer el cálculo de la velocidad teórica del motor, la cual se compara con la medida por el tacómetro como se muestra en la columna 4 de la Tabla 2.

$$\text{Velocidad teórica (RPM)} = \text{PPR} * \text{Frecuencia (kHz)}$$

En la Figura 55 a, b, c, d aparecen la mediciones en el osciloscopio cuando el VSD tiene una salida de frecuencia de 5, 15, 25 y 35 Hz respectivamente. Con este valor de frecuencia y los pulsos por rotación se puede calcular la velocidad teórica.

Figura 55. Mediciones en el osciloscopio con 5, 15, 25 y 35 Hz parametrizados en el VSD.



Fuente: Datos obtenidos con el Osciloscopio Tektronix TBS 1052-EDU.

Con los datos tomados en esta sección cuando sean tomados con la ESP32 se puede saber los valores que se visualizarán de la velocidad, en caso de que sea demasiada la diferencia, es necesario la calibración en la programación para la adquisición de los datos de velocidad del motor.

4.3.6 Pruebas implementación lazo cerrado

Para las pruebas en el lazo cerrado del sistema de control de velocidad, se hacen las conexiones como lo indica la sección 4.1.2 y la programación del LOGO!

Se realizan las pruebas con los valores del VSD mostrados en la Tabla 3 con el fin de validar que el lazo cerrado esté funcionando de acuerdo con los datos medidos.

La configuración del VSD se debe cambiar ya que es manejado externamente, por lo que se parametriza en el menú Configuración canal control 1 (CD1) → Bornero, cuando

se hace la prueba con el valor de 30 RPM en la pantalla de visualización del VSD aparece 5 Hz que concuerda con las pruebas realizadas en lazo abierto (Figura 56).

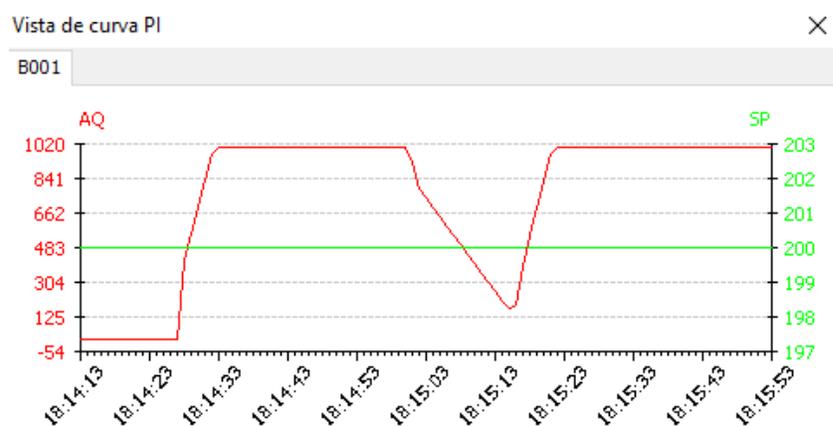
Figura 56. Prueba de funcionamiento lazo cerrado.



Fuente: Propia.

En el entorno del programa LOGO!Soft se monitorea la curva del bloque PI. Al cambiar el valor de la entrada analógica AI1 se observa el cambio del valor de la velocidad de 0 a 1020, que es la velocidad máxima cuando el VSD está a 35 Hz. Los valores que se observan en rojo es el voltaje de salida del módulo de expansión del LOGO!. En verde es el valor deseado que se parametriza en regulador PI (Figura 57).

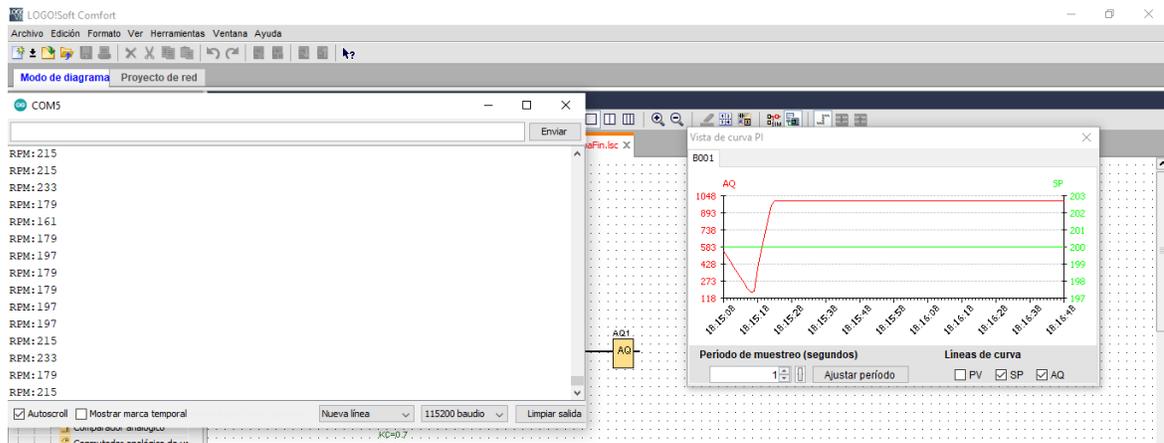
Figura 57. Curva bloque PI LOGO!Soft.



Fuente: Propia.

Con los valores AQ dados por el bloque regulador PI se puede observar la curva del comportamiento de la velocidad cuando está cambiando el valor de entrada AI1 dado por el potenciómetro. Con el Monitor Serie se puede visualizar la velocidad del motor mediante el cambio observado en el programa del LOGO! (Figura 58).

Figura 58. Visualización de los datos y curva de comportamiento de la velocidad.



Fuente: Propia.

4.4 Propuesta para mejorar la implementación en lazo cerrado

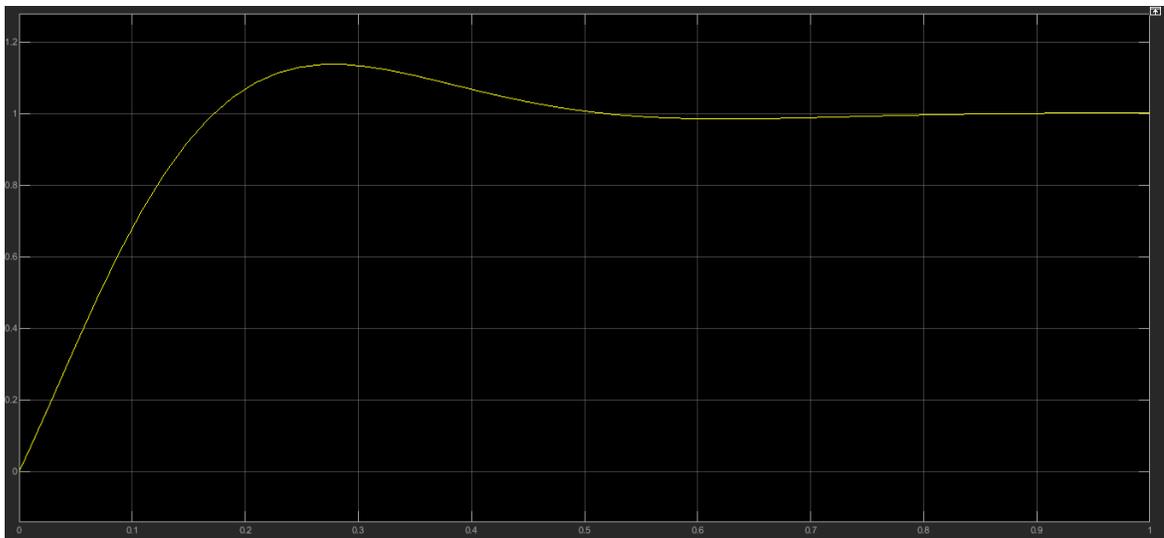
Para la implementación a futuro en el banco didáctico se propone retirar el PLC del montaje y que la tarjeta ESP32 sea el elemento de control del variador (Figura 59). En la sección 4.3.3 se explica que la señal del encoder se envía al PLC por una salida análoga de la tarjeta ESP32, por lo que en este momento el PLC no tiene una utilidad mayor y el bloque PI del entorno LOGO!Soft se puede reemplazar mediante la programación de la tarjeta.

Se hace la lectura de la señal del encoder en la tarjeta ESP32, la salida análoga D25 se conecta a la entrada análoga del variador (AI+). La parametrización de los valores de la tarjeta se hace de acuerdo con lo que admite la entrada AI+ que es de 0 a 10V en donde en la pantalla de variador se observará el rango de 0 a 35 Hz, y como se muestra en la Tabla 4, de acuerdo con el valor ingresado de la velocidad es su equivalente de frecuencia en el VSD.

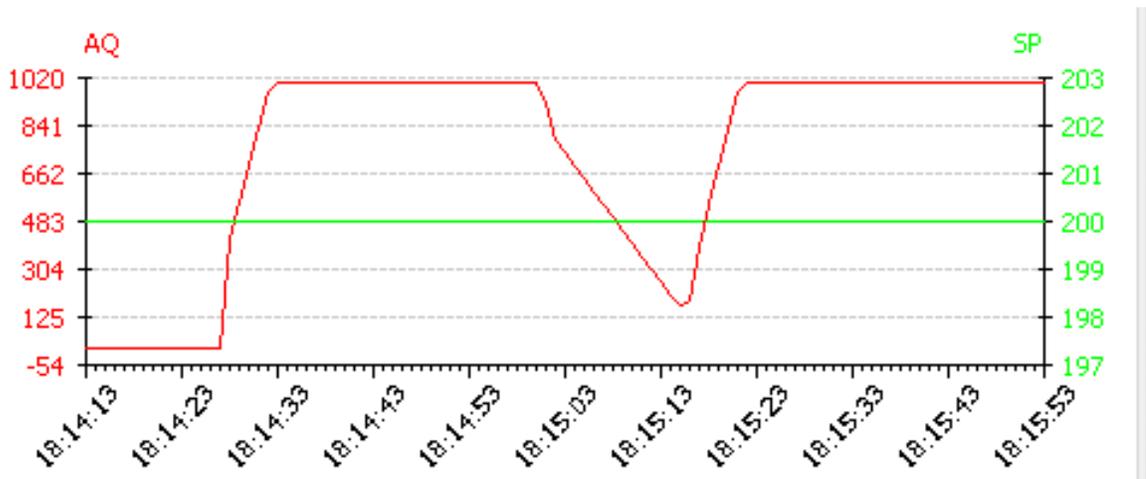
4.5 Validación del diseño

Las pruebas anteriores con el lazo abierto y cerrado muestran el comportamiento del motor sin carga. La simulación en MATLAB (Figura 61a) muestra un tiempo de asentamiento de 0.962 segundos. En el entorno de LOGO!Soft, la curva del bloque PI se puede observar los valores del cambio de la velocidad, oscila en un valor entre 0 a 1020, por lo cual no se puede determinar el valor real de la velocidad, el tiempo de asentamiento observado por la escala en la Figura 61b es de 5 segundos, es poco precisa la interfaz; además es necesario estar observando la HMI del VSD y el Monitor Serie del IDE de Arduino para determinar cuál es el valor real de la velocidad.

Figura 61. Curva de simulación en MATLAB y curva del bloque PI en LOGO!Soft.



a)



b)

Con la propuesta para mejorar la implementación del lazo cerrado del sistema de control en el banco didáctico de trefilado a futuro, se espera que el ingreso de la velocidad deseada se pueda realizar desde una aplicación móvil sin necesidad de una entrada análoga y poder monitorear las variables del proceso. La ganancia proporcional del control se pueda ir ajustando de acuerdo con el tiempo de asentamiento real de la velocidad del motor con las cargas que tendrá en el banco de trefilado.

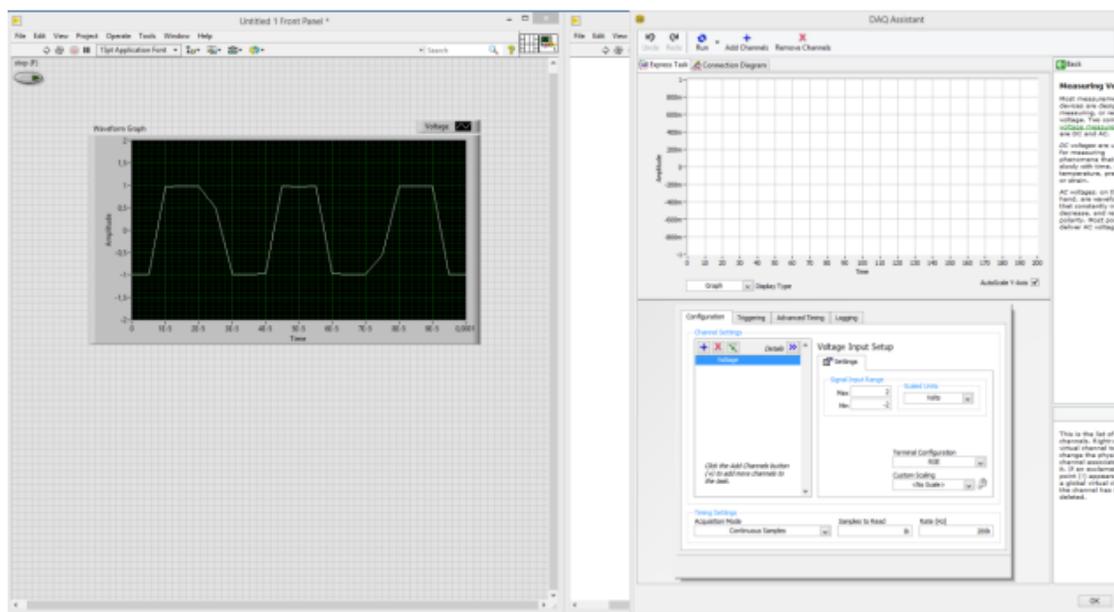
5. Diseño electrónico y eléctrico

5.1 Diseño de la tarjeta electrónica

En esta sección se procede a hacer el diseño de la tarjeta electrónica en Altium 2021 para la adquisición de datos del banco de trefilado didáctico.

Al hacer la prueba de la tarjeta myDAQ, al tener una señal de entrada de 30 kHz (simulando la señal del encoder), en la parte izquierda de la Figura 62, se puede observar la deformación de la lectura de la señal por lo que no serviría para la adquisición de datos del encoder. Físicamente también se pudo observar que solo cuenta con dos entradas análogas por lo que solo se podría hacer lectura de dos sensores, para este proyecto se descarta el uso de esta tarjeta.

Figura 62. Prueba realizada a la tarjeta myDAQ.



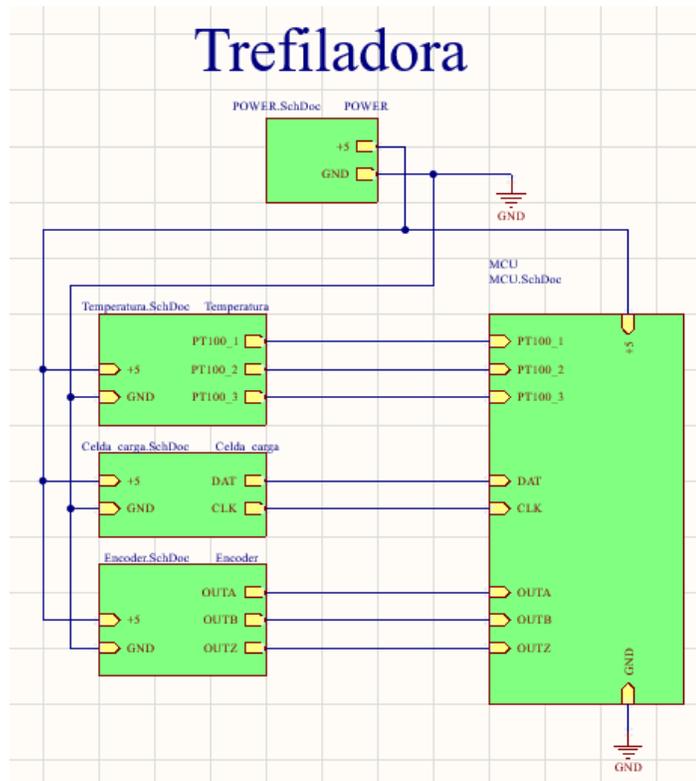
Fuente: Propia.

Para este proyecto la tarjeta a usar es la ESP-32 WROOM-32U WIFI BLUETOOTH, la cual es un microcontrolador de bajo costo y por sus características permite conectarse a aplicaciones móviles.

El diseño del PCB estará definido por los sensores mostrados en la Tabla 1. Por priorización se encuentran: la fuerza de trefilado (celda de carga) y la velocidad de alambre en la salida (encoder). Para la siguiente etapa del proyecto “Modelación numérica y física del proceso de trefilado industrial”, en el diseño se dejan planteados los conectores para los sensores de la temperatura de hilera, temperatura de entrada del lubricante y temperatura de salida del lubricante.

En el esquemático del PCB se puede observar el diagrama de bloques de los elementos que la componen (Figura 63).

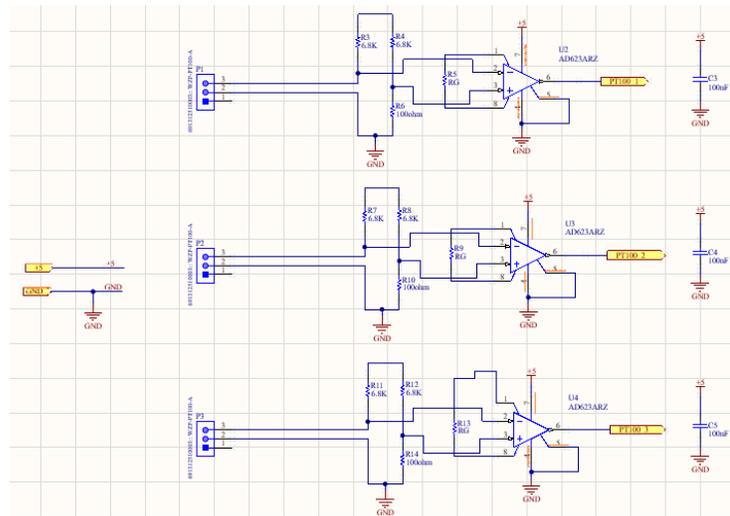
Figura 63. Diagrama de bloques del diseño de la tarjeta para adquisición de datos.



Fuente: Diseño realizado en Altium Designer.

- Temperatura: en el caso de usar el sensor de temperatura tipo PT100, se propone hacer el acondicionamiento para la señal con el amplificador de instrumentación AD623 (Figura 66).

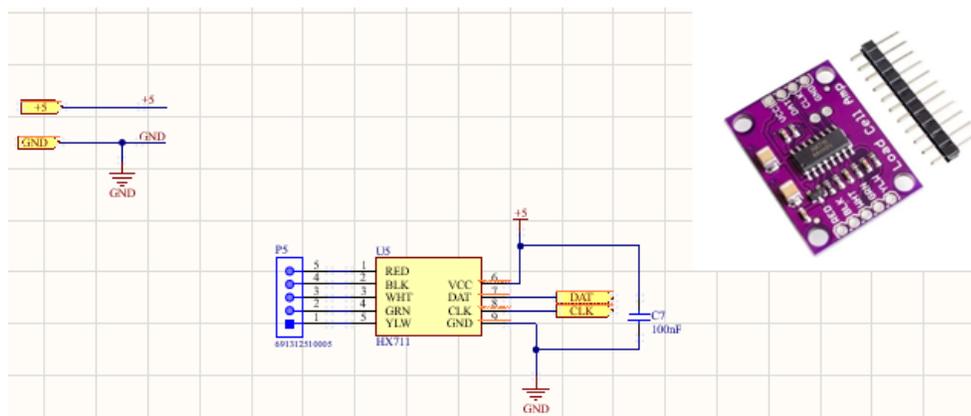
Figura 66. Esquemático con acondicionamiento de señal para sensores de temperatura PT100.



Fuente: Diseño en Altium Designer.

- Celda_carga: Módulo conversor HX711 24 bits A/D. Internamente se encarga de la lectura del puente de Wheatstone formado por la celda de carga, convierte la lectura análoga a digital (Figura 67).

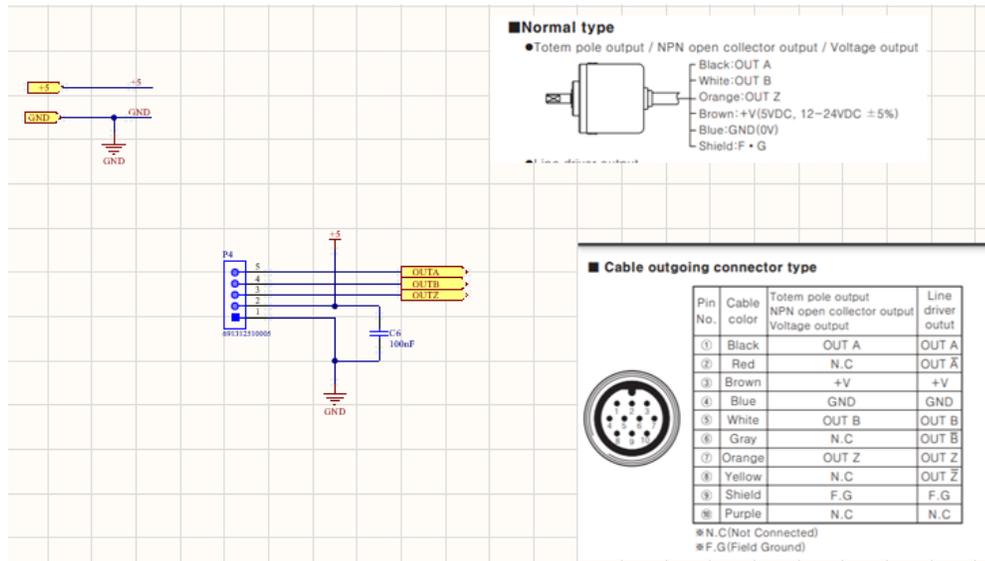
Figura 67. Esquemático de conexiones conversor HX711.



Fuente: Diseño realizado en Altium Designer.

- Encoder: De acuerdo con la hoja de datos del encoder incremental de referencia E30S45003T24, se determinan las conexiones que irían a la tarjeta ESP32 (Figura 68).

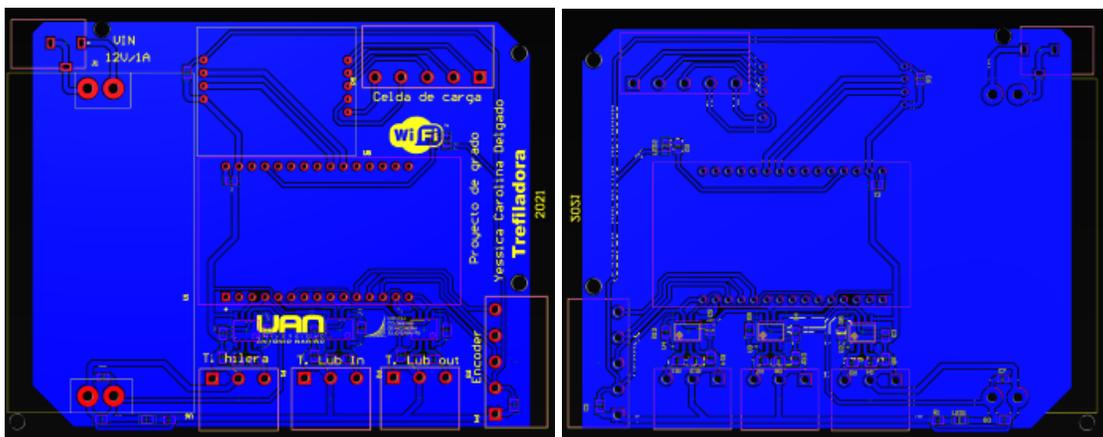
Figura 68. Esquemático de conexiones encoder E30S45003T24.



Fuente: Diseño realizado en Altium Designer.

El diseño final de la tarjeta se puede observar en la Figura 69. Vista superior (Figura 69a) y vista inferior (Figura 69b).

Figura 69. Vista final de la tarjeta para adquisición de datos de la trefiladora



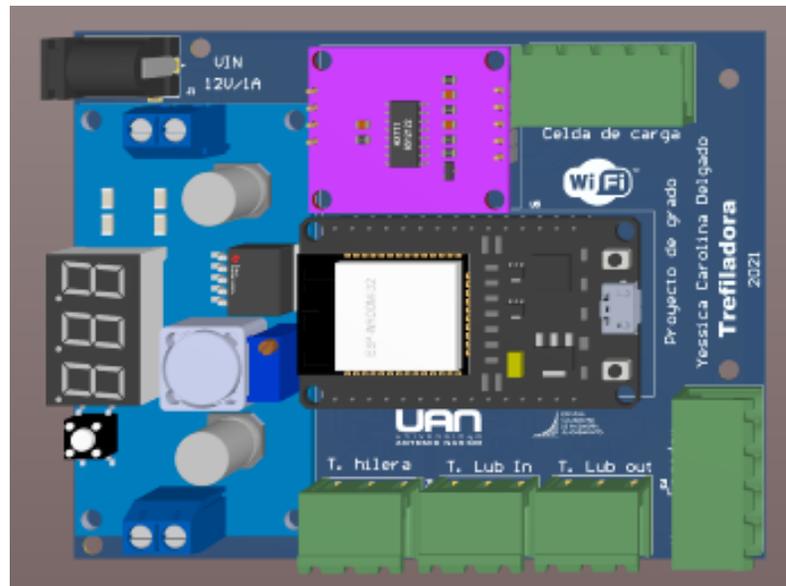
a

b

Fuente: Diseño realizado en Altium Designer.

Altium Designer da la posibilidad de implementar con modelos la tarjeta en 3D donde se puede ver la disposición final de los elementos que conforman la PCB (Figura 70).

Figura 70. Vista 3D de la tarjeta para adquisición de datos de la trefiladora.



Fuente: Diseño realizado en Altium Designer.

5.2 Diseño del tablero eléctrico para el control del motor

En esta sección se realizan los cálculos necesarios para el tablero eléctrico donde estará el sistema de control de velocidad con sus respectivos elementos como lo son el variador, PLC y motor.

Para este diseño es necesario el cálculo de la sección transversal de los conductores, la protección contra sobrecarga del motor, la protección del circuito ramal contra cortocircuito y contra falla a tierra y la protección del alimentador, para el motor ASSI, tipo: MS 90L1-4, con una potencia nominal de 1,5 kW (2 HP) y una corriente nominal de 6,08 A por placa, con un factor de servicio de 1,15, conectado a un circuito trifásico de 220 V a 60 Hz, con una temperatura que no supere los 40 °C (NTC2050, 2019).

5.2.1 Carga de los conductores

Para determinar la capacidad de corriente nominal para el motor según el artículo 430-6 de la NTC 2050 se tiene en cuenta el apartado a) Motores para aplicaciones generales y la Tabla 430-150 (Figura 71).

Figura 71. Corriente a plena carga para el motor.

Tabla 430-150 Corriente a plena carga de motores trifásicos de corriente alterna

KW	HP	Motores de inducción de jaula de ardilla y rotor devanado. (A)							Motores sincrónicos con factor de potencia unitario*. (A)			
		115 V	200 V	208 V	230V	460 V	575 V	2300 V	230 V	460 V	575 V	2300 V
0,373	1/2	4,4	2,5	2,4	2,2	1,1	0,9					
0,560	3/4	6,4	3,7	3,5	3,2	1,6	1,3					
0,746	1	8,4	4,8	4,6	4,2	2,1	1,7					
1,119	1-1/2	12,0	6,9	6,6	6,0	3,0	2,4					
1,492	2	13,6	7,8	7,5	6,8	3,4	2,7					
2,238	3		11,0	10,6	9,6	4,8	3,9					
3,730	5		17,5	16,7	15,2	7,6	6,1					
5,595	7-1/2		25,3	24,2	22	11	9					
7,460	10		32,2	30,8	28	14	11					
11,19	15		48,3	56,2	42	21	17					
14,92	20		62,1	59,4	54	27	22	53	26	21		
18,65	25		78,2	74,8	68	34	27					
22,38	30		92	88	80	40	32	63	32	26		
29,84	40		120	114	104	52	41	83	41	33		
37,30	50		150	143	130	65	52	104	52	42		
44,76	60		177	169	154	77	62	123	61	49	12	
55,95	75		221	211	192	96	77	20	155	78	62	15
74,60	100		285	273	248	124	99	26	202	101	81	20
93,25	125		359	343	312	156	125	31	253	126	101	25
111,90	150		414	396	360	180	144	37	302	151	121	30
149,20	200		552	528	480	240	192	49	400	201	161	40
186,50	250					302	242	60				
223,80	300					361	289	72				
261,10	350					414	336	83				
298,40	400					477	382	95				
335,70	450					515	412	103				
373,00	500					590	472	118				

Para factores de potencia de 90 y 80 %, las cifras anteriores se deben multiplicar respectivamente por 1,1 y 1,25.

Fuente: NTC 2050.

El valor de la corriente a plena carga utilizado para calcular la capacidad de corriente de los conductores para el motor de 1,5 kW (2 HP) es de 7,5 A.

Para un solo motor como lo indica el artículo 430-22 de la NTC 2050 en el apartado a) Generalidades, los conductores de los circuitos ramales que alimenten a un motor debe tener una corriente no menor al 125% de la corriente nominal del motor a plena carga.

Corriente conductor: Corriente a plena carga del motor * 125%

Corriente conductor: 7,5 A * 1,25 = 9,4 A

Con la corriente calculada, se puede escoger el tipo de conductor a usar. Haciendo una revisión comercial, Centelsa tiene un producto denominado: Cables para variadores VFD ROHS 600 V 90 °C, diseñado para aplicaciones en unidades de frecuencia variable (VFD), variadores de velocidad (VSD), motores de bombas, ventiladores industriales, tornos y ascensores. Se escoge un conductor calibre 14 AWG que soporta hasta 40 A (Figura 72).

Figura 72. Selección cable conductor.

CABLES PARA VARIADORES
VFD RoHS
600 V 90°C



Conductor de Fase			Conductor de Puesta a Tierra			Espesor de Cubierta	Diámetro Exterior Aproximado	Peso Total Aproximado	Ampacidad ⁽¹⁾
Calibre	Resistencia DC a 20°C	Espesor de Aislamiento	Calibre	Resistencia DC a 20°C	Espesor de Aislamiento				
AWG / kcmil	Ω /km	mm	AWG	Ω /km	mm	mm	mm	Kg/km	A
14	8,44	0,75	18	21,42	0,64	1,52	14,9	326	25
12	5,31	0,75	18	21,42	0,64	1,52	15,5	371	30
10	3,34	0,75	14	8,44	0,75	1,52	18,4	552	40
8	2,10	1,14	14	8,44	0,75	1,52	20,1	688	55
6	1,32	1,14	12	5,31	0,75	2,03	23,4	981	75
4	0,85	1,14	12	5,31	0,75	2,03	24,4	1228	95
2	0,53	1,14	10	3,34	0,75	2,03	27,7	1750	130
1/0	0,34	1,40	10	3,34	0,75	2,03	33,0	2529	170
2/0	0,27	1,40	10	3,34	0,75	2,03	35,4	3021	195
4/0	0,17	1,40	8	2,10	1,14	2,79	44,4	4727	260
250	0,14	1,65	6	1,32	1,14	2,79	48,2	5660	290
300	0,12	1,65	6	1,32	1,14	2,79	51,3	6543	320
350	0,10	1,65	6	1,32	1,14	2,79	54,3	7473	350
500	0,07	1,65	6	1,32	1,14	2,79	67,9	10752	430
750	0,05	2,03	3	0,67	1,14	3,56	84,7	16318	535

Fuente: Centelsa.

5.2.2 Protección contra sobrecarga

La protección independiente del motor contra sobrecargas se debe calcular de acuerdo con la corriente nominal en la placa de características del motor de acuerdo al Artículo 430-6a (NTC2050, 2019).

El Artículo 430-32a establece que para un motor de servicio continuo de más de 1 HP nominales debe estar protegido contra sobrecargas por medio de un dispositivo independiente que sea sensible a la corriente del motor. Este dispositivo se debe programar para que se dispare o debe tener una capacidad nominal no menor al 125% de la corriente nominal del motor a plena carga (NTC2050, 2019).

Como se había calculado en la sección 5.2.1 la protección por sobrecarga no puede superar los 9,4 A que es la corriente máxima que soporta los conductores.

5.2.3 Protección del circuito ramal contra cortocircuito y contra falla a tierra

El circuito ramal de un motor de 1,5 kW (2 HP) debe estar protegido contra cortocircuitos y fallas a tierra por un dispositivo de capacidad no superior al 300 % de los fusibles sin retardo de acuerdo a la Figura 73 (NTC2050, 2019).

Figura 73. Selección protección contra cortocircuito y falla a tierra.

Tabla 430-152 Capacidad nominal máxima o ajuste de disparo de los dispositivos de protección para circuitos ramales de motores contra cortocircuito y falla a tierra

Tipo de motor	En porcentaje de la corriente a plena carga			
	Fusible sin retardo de tiempo**	Fusible con retardo de tiempo ** (elemento dual)	Interruptor automático de disparo instantáneo	Interruptor automático de tiempo inverso *
Monofásicos	300	175	800	250
Polifásicos de c.a. distintos a los de rotor devanado				
De jaula de ardilla: Todos menos los de Diseño	300	175	800	250
E	300	175	1100	250
Los de Diseño E	300	175	800	250
Síncronicos #	150	150	800	150
Con rotor devanado	150	150	250	150
De cc. (tensión constante)				

Fuente: NTC 2050

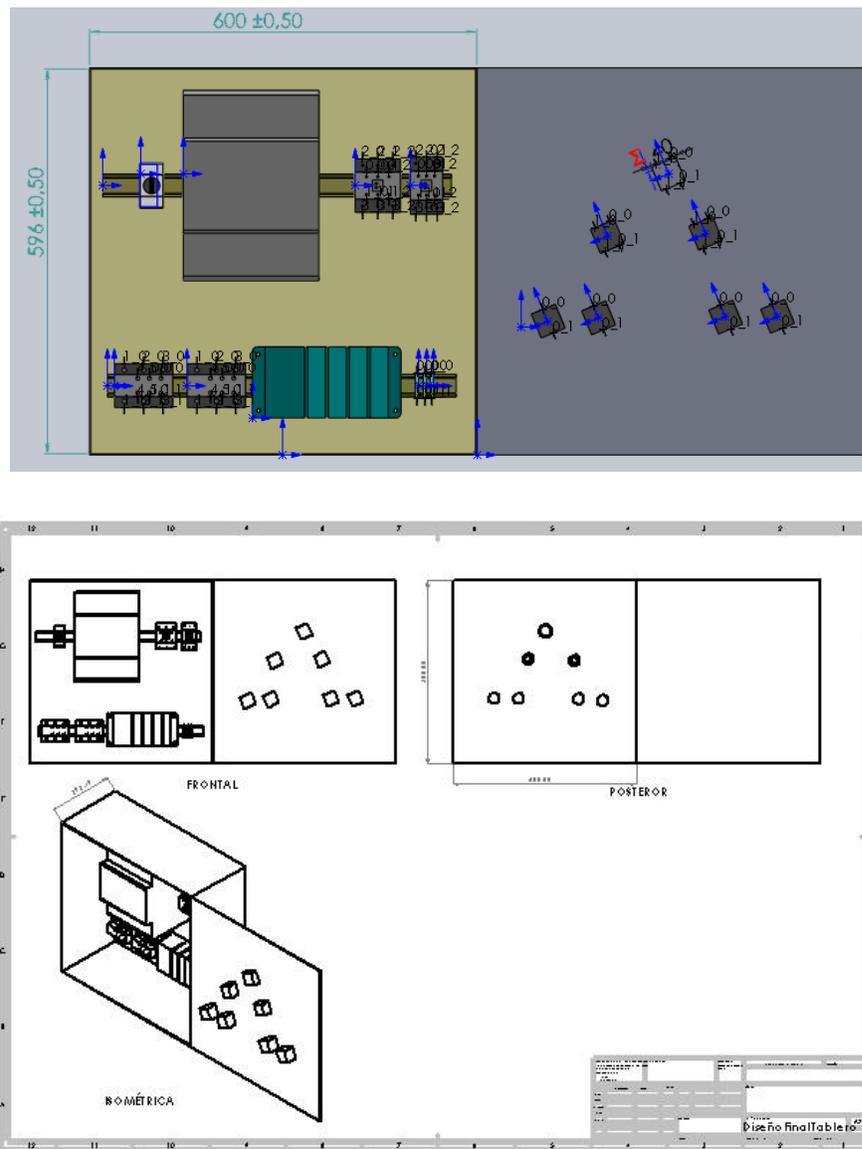
Corriente protección: $Corriente\ nominal\ motor * 300\%$

Corriente protección: $9,4\ A * 3 = 28,2\ A$

El fusible normalizado que se puede usar es de 30 A de acuerdo con el Artículo 240-6a de la NTC 2050.

En el programa de SolidWorks se realiza el ensamblaje de los componentes que conformarían el tablero con la finalidad de determinar las dimensiones que tendría la caja metálica eléctrica, en este caso 600x600x200 mm. El dimensionamiento hace parte de los requerimientos en el diseño mecánico del banco de trefilado didáctico a cargo del Programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Figura 74).

Figura 74. Dimensionamiento caja eléctrica.



Fuente: Diseño realizado en SolidWorks.

Elementos que componen el diseño del tablero eléctrico dimensionado anteriormente:

❖ Vista frontal:

- Protección contra sobrecarga (Calculada en la sección 5.2.2),
- Protección del circuito ramal contra cortocircuito y contra falla a tierra (Calculada en la sección 5.2.3).
- Protección térmica,

- Contactores.
 - Espacio para el PLC.
 - Borneras.
- ❖ Vista posterior:
- Paro de emergencia.
 - Pulsador NA (Inicio de proceso).
 - Pulsador NC (Paro de proceso).
 - Pilotos luminosos verdes (Indican funcionamiento correcto del variador y motor cada uno).
 - Pilotos luminosos rojos (Indican funcionamiento incorrecto del variador y motor cada uno).

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Con los requerimientos dados por el Grupo de Investigación DSIM – Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito se analizan los requisitos necesarios para el diseño del controlador al igual que la tarjeta electrónica para la adquisición de datos y montaje eléctrico.

Para la implementación del diseño del sistema de control de velocidad se realiza un banco de pruebas con un motor de 2 HP en vez de 7.5 HP y elementos disponibles en el lugar del proyecto que funciona como prototipo para validar el diseño del controlador.

Con el objetivo de diseñar el sistema de control de velocidad, se propone una metodología la cual consiste que, por medio de la adquisición de datos de la velocidad del motor, con MATLAB se obtenga la señal del motor y procesar los datos para hallar la constante del tiempo del sistema y la función de transferencia de la planta.

Con la función de transferencia por medio de Simulink se hallan los valores de las constantes del controlador PI, los cuales se simulan para observar el comportamiento en lazo cerrado, obteniendo el tiempo de asentamiento que cumple con los requerimientos de la respuesta del sistema de velocidad de 1 segundo.

Al implementarse el controlador en el banco de pruebas con el PLC LOGO!, este elemento no tiene una forma precisa de monitorear el cambio de velocidad, por lo que es necesario estar observando el HMI del VSD manteniendo la puerta abierta del cofre eléctrico lo que puede generar riesgos.

Al no tenerse disponibles los sensores en el lugar del proyecto, para la medición y visualización de las variables del proceso de trefilado se realiza el diseño de la tarjeta electrónica para adquisición de datos, la cual cuenta con el acondicionamiento para los sensores a utilizar. En la programación de la tarjeta ESP32 se declaran las variables para la lectura de la velocidad, fuerza y temperatura.

Finalmente, con la implementación del diseño en el banco de pruebas se observa que el PLC no tiene funcionalidad por lo que se propone retirarse y por medio de la tarjeta ESP32 hacer el envío de la señal de la velocidad deseada. Con las características de la tarjeta, se podrá hacer el diseño de una aplicación móvil en donde se ingresa el valor de la velocidad requerida y también se visualizarán las variables del proceso sin necesidad de un HMI.

Recomendaciones

Con el banco de trefilado didáctico terminado y en sitio se propone realizar la implementación que se encuentra en la sección 4.4 con la finalidad de reducir elementos y espacio en el cofre eléctrico para validar el diseño de controlador y programación final de la tarjeta ESP32.

Para la temperatura se propone el acondicionamiento de señal y lectura de un PT100, por lo que en caso no ser este sensor se debe modificar el diseño de la tarjeta electrónica y la programación de la tarjeta ESP32.

En caso de que la potencia final del motor sea de 7.5 HP para el diseño eléctrico se deben tener en cuenta los cálculos del Anexo: Motor 7.5 HP e implementarse un freno electromagnético el cual hará un frenado total del motor y que la inercia del motor no siga generando velocidades no deseadas al sistema.

Al disponer de otro motor para el banco de trefilado didáctico se recomienda implementar la metodología para la obtención de los datos y señal del motor, para poder hallar la constante del tiempo y función de transferencia para trabajar con los datos reales de la planta para realizar su respectivo control.

Referencias Bibliográficas

- Åström, K., & Hägglund, T. (2007). Control PID avanzado. In *Modern Control Engineering* (Vol. 23, Issue 4). Pearson Educación.
- Bolton, W. (2013). *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en ingeniería mecánica y eléctrica*. (5ta ed.). Alfaomega.
- Carrillo Paz, A. (2011). *Sistemas automáticos de control. Fundamentos básicos de análisis y modelado*.
- Centelsa. (2021). *Cables para baja tensión*.
https://www.centelsa.com/productos_colombia/#cables-para-baja-tension
- Guru, B. (2003). *Maquinas Eléctricas y Transformadores* (pp. 232–236). Oxford University Press.
- Kalpakjian, S. (2014). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (7th ed.). Pearson Education.
<http://ezproxy.uan.edu.co:2071/?il=3641>
- Kuo, B. (1996). *Sistemas de control automático* (Séptima ed). Pearson Education.
- Kutz, M. (2006). Mechanical engineers' handbook. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. (Tercera). John Wiley & Sons, Inc.
- Mactronica. (2021a). *Convertidor HX711 24 BITS A/D V2*.
<https://www.mactronica.com.co/convertidor-hx711-24-bits-ad-v2>
- Mactronica. (2021b). *Convertidor DC-DC LM2596 reductor con voltímetro*.
<https://www.mactronica.com.co/convertidor-dc-dc-lm2596-con-voltimetro-reductor>
- Mactronica. (2021c). *Tarjeta de desarrollo ESP32 Wifi - Bluetooth*.
<https://www.mactronica.com.co/tarjeta-de-desarrollo-esp32-wifi-bluetooth>
- NTC2050. (2019). Código eléctrico colombiano NTC2050. *Código Eléctrico Colombiano*, 847. https://www.idrd.gov.co/sitio/idrd/sites/default/files/imagenes/ntc_20500.pdf
- Ogata, K. (2013). *Ingeniería de Control Moderna*.
- Pallás, R. (2005). Adquisición y Distribución de Señales. In *Book* (pp. 27–35). Marcombo.
- Saidur, R., Mekhilef, S., Ali, M. B., Safari, A., & Mohammed, H. A. (2012). Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 543–550.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.020>

