

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**



“DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TENSIÓN PARA UN  
DESBOBINADOR DE TELA INFERIOR Y SUPERIOR DE UN  
PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PAÑALES UTILIZANDO  
TÉCNICAS INTELIGENTES”

**PROYECTO DE TITULACIÓN**

Previo a la obtención del Título de:

**Magister en Automatización y Control**

Presentado por:

Ing. Alex Echeverría Cuadrado

Ing. Carlos Molina Crespo

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

Año: 2021

## **DEDICATORIA**

Este trabajo lo dedico principalmente a Dios, por darme salud y entereza para afrontar las vicisitudes y continuar hasta la culminación de este proyecto.

A mi madre Anita, por su amor, paciencia y sacrificio durante toda mi vida.

A mi prometida, por su motivación, apoyo y confianza.

Ing. Alex Echeverría Cuadrado

## **DEDICATORIA**

Este trabajo lo dedico principalmente a Dios,  
por darme mi hermosa familia que ha sido mi  
soporte en todo este tiempo.

A mi esposa, por su sacrificio y por brindarme  
el apoyo en todo este tiempo.

A mis padres por todo su apoyo incondicional.

.

Ing. Carlos Molina Crespo

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi madre, prometida y mi familia por acompañarme en cada etapa de mi vida, por sus consejos, cuidados y cariño.

A nuestro profesor el PhD. Douglas Plaza G. al cual respeto y admiro, por sus conocimientos y destrezas que impartieron en cada una de las materias, las que nos impulsaron para realizar un excelente proyecto de titulación.

A mis compañeros de salón por siempre estar predispuestos a ayudar.

Ing. Alex Echeverría Cuadrado

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres, esposa e hijos por acompañarme en esta etapa de crecimiento profesional.

A nuestro profesor el PhD. Douglas Plaza G. que con su apoyo nos impulsó a cerrar esta etapa de aprendizaje.

A mis compañeros de salón por siempre estar predispuestos a ayudar.

Ing. Carlos Molina Crespo

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Ing. Alex Echeverría Cuadrado y Ing. Carlos Molina Crespo, damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



---

**Alex Omar Echeverría Cuadrado**



---

**Carlos Patricio Molina Crespo**

## COMITÉ EVALUADOR



Firmado digitalmente por:  
**RONALD  
DAVID SOLÍS**

.....  
**Msc. Ronald Solís M**

PROFESOR TUTOR

**GABRIELA  
PAOLA  
SALCAN REYES** Firmado digitalmente  
por GABRIELA PAOLA  
SALCAN REYES  
Fecha: 2021.11.12  
12:11:24 -05'00'

.....  
**PhD. Gabriela Salcán R**

PROFESOR EVALUADOR

## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se muestra el diseño y simulación de una máquina desbobinadora de tela, mediante técnicas rápidas de identificación usando datos experimentales y MatLab.

Además, se diseñan distintos tipos de controladores, como el PID y el PID difuso con el fin de mejorar el control actual que existe en la máquina desbobinadora de tela, siendo esta la parte principal del trabajo.

Parte importante de este trabajo es también la integración de parte investigativa con la parte industrial, esto se obtiene combinando herramientas como Simulink, Tia Portal, Kepserver, logrando integrar dos herramientas fuertes y cotidianas.

Como parte final se muestran las comparaciones en los distintos escenarios de los distintos controladores, tanto el PID como el PID difuso, concluyendo que el PID difuso es más robusto y con mejor respuesta para nuestro caso.

**Palabras claves:** PID, PID difuso, Desbobinadora de rollos



## **ABSTRACT**

*The present work shows the design and simulation of a cloth unwinding machine, through rapid identification techniques using experimental data and MatLab.*

*In addition, different types of controllers are designed, such as PID and fuzzy PID in order to improve the current control that exists in the cloth unwinding machine, this being the main part of the work.*

*An important part of this work is also the integration of the investigative part with the industrial part, this is obtained by combining tools such as Simulink, Tia Portal, Kepserver, achieving to integrate two strong and everyday tools.*

*As a final part, the comparisons in the different scenarios of the different controllers are shown, both the PID and the fuzzy PID, concluding that the fuzzy PID is more robust and with a better response for our case.*

**Keywords:** *PID, Fuzzy PID, Roll Unwinder*

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	I
DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTO .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
DECLARACIÓN EXPRESA .....	V
COMITÉ EVALUADOR.....	VI
RESUMEN .....	VII
<i>ABSTRACT</i> .....	VIII
ÍNDICE GENERAL .....	IX
ABREVIATURAS .....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIV
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVIII
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Planteamiento de la problemática .....	1
1.1 Identificación del problema .....	1
1.2 Justificación .....	1
1.3 Solución Propuesta .....	2
1.4 Objetivo de la Tesis .....	2
1.4.1 Objetivo General .....	2
1.4.2 Objetivos Específicos .....	3
1.5 Metodología .....	3

1.6 Alcance.....	4
CAPÍTULO 2 .....	5
2. Estado del arte .....	5
2.1 Descripción general del proceso de fabricación de pañales .....	5
2.2 Descripción del escenario de control .....	7
2.3 Controladores PID .....	11
2.3.1 Estructura del controlador PID .....	11
2.3.2 Métodos de sintonización .....	11
2.4 Controladores Inteligentes .....	15
2.4.1 Controladores difusos .....	16
2.5 Sistemas de control de Tensión en máquinas de pañales .....	17
2.5.1 Introducción .....	17
2.5.2 Etapas del sistema .....	17
2.5.3 Ecuaciones del sistema.....	20
2.6 Descripción de la solución propuesta .....	23
2.7 Presupuesto de Implementación .....	24
CAPÍTULO 3 .....	25
3. Modelamiento matemático y diseño del controlador inteligente .....	25
3.1 Modelo matemático de sistemas de control de tensión en el proceso de producción de pañales. ....	25
3.1.1 Modelo matemático de una máquina desenrolladora de bobinas .....	26
3.1.2 Modelo matemático de un motor DC de una desenrolladora de bobinas 27	
3.1.3 Modelo matemático del diámetro de un rollo de una desenrolladora .....	30
3.1.4 Modelo matemático de un freno de partículas magnético .....	30
3.1.4.1 Identificación del subsistema freno magnético de partículas .....	35
3.2 Simulación del modelo matemático del control de tensión. ....	37

3.2.1	Simulación del subsistema motor DC y velocidad lineal .....	37
3.2.2	Simulación del subsistema diámetro de rollo .....	39
3.2.3	Simulación del subsistema freno magnético de partículas .....	40
3.2.4	Simulación del subsistema desenrolladora .....	41
3.3	Pruebas de seguimiento del modelo matemático del proceso de producción de pañales .....	42
3.4	Simulación del controlador PID y del controlador inteligente de tensión .....	43
3.4.1	Diseño y simulación de un controlador PID .....	44
3.4.2	Diseño y simulación del controlador lógico PID Difuso .....	48
CAPÍTULO 4 .....		60
4.	Diseño y pruebas de interfaz hombre máquina .....	60
4.1	Configuración del sistema .....	60
4.1.1	Configuración de la plataforma de programación de PLC .....	60
4.1.2	Configuración de la plataforma para enlace OPC .....	70
4.1.3	Sintonización del sistema de control .....	73
4.2	Configuración de interfaz hombre máquina .....	73
4.2.1	Programación del HMI .....	73
4.2.2	Establecimiento de niveles de alarma .....	75
4.3	Gráficas de consignas de tensión .....	76
CAPÍTULO 5 .....		81
5.	Análisis comparativos de resultados .....	81
5.1	Análisis comparativo del desempeño de controladores PID .....	81
5.2	Análisis comparativo del desempeño de controladores adaptativos .....	82
5.3	Estimaciones de consumo de materia prima y desperdicios para ambos escenarios .....	84
CAPÍTULO 6 .....		87
6.	Conclusiones y recomendaciones .....	87

6.1 Conclusiones .....	87
6.2 Recomendaciones .....	88
BIBLIOGRAFÍA .....	89
ANEXOS .....	91



## ABREVIATURAS

**CPU:** Unidad Central de Proceso  
**DP:** Periferia Descentralizada  
**E/S:** Entradas/Salidas  
**HMI:** Interfaz Hombre Máquina  
**IP:** Protocolo de Internet  
**N/P:** Número de Parte  
**OPC:** OLE para Control de Proceso  
**PID:** Proporcional Integral Derivativo  
**PLC:** Controlador Lógico Programable  
**TCP:** Protocolo de control de transmisión  
**ZOH:** Retenedor de Orden Cero  
**SCADA:** Supervisión, Control y Adquisición de Datos

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.2.1 Material enredado en la desbobinadora .....	2
Figura 2.1.1 Capas de un pañal [1] .....	6
Figura 2.1.2 Diagrama de bloques del proceso de fabricación de pañales .....	7
Figura 2.2.1 Diagrama de bloques de PID actual .....	8
Figura 2.2.2 Bloques del incremento de velocidad .....	9
Figura 2.2.3 Efecto de un incremento en la tensión de un material .....	9
Figura 2.2.4 Control de tensión a través de celdas de carga. [5] .....	10
Figura 2.3.1 Sistema de lazo cerrado con controlador PID y subsistema de motor DC. [6] .....	12
Figura 2.3.2 Respuesta de la planta en lazo abierto sin controlador. [6] .....	13
Figura 2.4.1 Control por lógica difusa de temperatura en una habitación. [7] .....	15
Figura 2.4.2 Sistema Difuso. [8] .....	17
Figura 2.5.1 Desbobinadoras de telas para máquinas de pañales. ....	18
Figura 2.5.2 Principio de Funcionamiento del Acumulador. ....	19

Figura 2.5.3 Unidad de Presión o Acumulador. ....	19
Figura 2.5.4 Sección desbobinadora. Se realiza el proceso de corte y unión de los diversos materiales. ....	20
Figura 2.5.5 Configuración simple de dos rodillos adyacentes. [4] .....	21
Figura 2.5.6 Esquema simplificado de la plataforma experimental del sistema de fabricación. [4] .....	23
Figura 3.1.1 Modelo dinámico de tensión de una desbobinadora. [10] .....	26
Figura 3.1.2 Diagrama esquemático de un motor DC controlado por armadura. [12]	28
Figura 3.1.3 Diagrama de bloques del subsistema de control de velocidad de un motor DC. [12] .....	29
Figura 3.1.4 Control de tensión de la hoja por freno magnético. [10] .....	30
Figura 3.1.5 Estructura interna y curva característica de un freno magnético de partículas. [14] .....	31
Figura 3.1.6 Corriente de excitación vs característica del torque (ejemplo típico). [15] .....	32
Figura 3.1.7 ZBK-20HBN Powder Brake. [16] .....	33
Figura 3.1.8 Curva característica vs torque del modelo ZBK-20HBN. [16] .....	33
Figura 3.1.9 trazo de los puntos del freno magnético .....	34
Figura 3.1.10 Sentencias del script para iddata del freno magnético .....	35
Figura 3.1.11 Selección de un par de polos reales para la función de transferencia .	36
Figura 3.1.12 Estimación automática de la función de transferencia .....	36
Figura 3.2.1 Declaración de valores de las constantes del motor DC .....	37
Figura 3.2.2 Motor DC controlado por armadura y salida de velocidad lineal $V$ del rollo $D$ .....	37
Figura 3.2.3 Respuesta a una entrada escalón del subsistema motor DC y velocidad lineal del rollo .....	38
Figura 3.2.4 Simulación del subsistema diámetro del rollo ( $D$ ) .....	39
Figura 3.2.5 Respuesta del subsistema diámetro del rollo ( $D$ ) .....	39
Figura 3.2.6 Subsistema freno magnético de partículas $M_d$ vs $I_f$ .....	40
Figura 3.2.7 Corriente de entrada y torque de frenado .....	40
Figura 3.2.8 Valores de las constantes del subsistema desenrolladora .....	41
Figura 3.2.9 Subsistema desenrolladora en Simulink .....	41
Figura 3.3.1 Modelo matemático del proceso de una máquina desenrolladora de tela	



para fabricación de pañales .....	42
Figura 3.3.2 Referencia de tensión de la tela vs salida de tensión de la tela en una máquina desenrolladora de tela de pañales .....	43
Figura 3.4.1 Sentencias para crear la función de transferencia freno magnético .....	44
Figura 3.4.2 Interfaz PID Tuner para sintonización del controlador .....	44
Figura 3.4.3 Implementación del controlador PID en el subsistema freno magnético	45
Figura 3.4.4 Parámetros $K_p$ , $K_i$ , $K_d$ .....	45
Figura 3.4.5 Respuesta al escalón del sistema freno magnético con controlador PID .....	45
Figura 3.4.6 Implementación del controlador PID en la planta .....	46
Figura 3.4.7 Respuesta al escalón de nuestra planta con controlador PID .....	47
Figura 3.4.8 Diagrama del sistema de control de tensión de una desenrolladora. [11] .....	48
Figura 3.4.9 Controlador en fuzzy logic designer .....	49
Figura 3.4.10 Funciones de membresía de $e$ y $\dot{e}$ .....	50
Figura 3.4.11 Funciones de membresía de $K_p$ , $K_i$ , $K_d$ .....	51
Figura 3.4.12 Reglas de pertenencia de nuestro controlador difuso .....	53
Figura 3.4.13 Modelo de simulación del controlador difuso PID .....	54
Figura 3.4.14 Planta desenrolladora con controlador PID difuso .....	54
Figura 3.4.15 Respuesta al escalón del sistema desenrolladora con controlador PID difuso .....	55
Figura 3.4.16 Funciones de membresía error y derivada del error 2 .....	57
Figura 3.4.17 Funciones de membresía $K_p$ , $K_i$ , $K_d$ 2 .....	57
Figura 3.4.18 Respuesta al escalón del sistema desenrolladora con controlador PID difuso 2 .....	58
Figura 4.1.1 Soporte de simulación al compilar bloques en TIA Portal .....	61
Figura 4.1.2 Acceso de servidor Web para puerto Profinet X1 .....	61
Figura 4.1.3 Activación de servidor Web y acceso HTTPS .....	62
Figura 4.1.4 Autorización de usuarios en PLC .....	62
Figura 4.1.5 Habilitación de acceso de comunicación PUTGET en PLC .....	63
Figura 4.1.6 Activación de servidor OPC UA en PLC .....	63
Figura 4.1.7 Activación de cliente OPC UA en PLC .....	64
Figura 4.1.8 Selección de licencia OPC UA para PLC .....	64

Figura 4.1.9 Creación de estructura para controlador PID .....	65
Figura 4.1.10 Variables del PLC .....	65
Figura 4.1.11 Bloque PID_Compact con señales de E/S .....	66
Figura 4.1.12 Tipo de controlador PID .....	66
Figura 4.1.13 Parámetros de E/S de controlador PID .....	67
Figura 4.1.14 Límites de proceso en controlador PID .....	67
Figura 4.1.15 Alarmas de proceso en controlador PID .....	68
Figura 4.1.16 Parámetros de controlador PID .....	68
Figura 4.1.17 Pantalla de PLCSIM con instancia PLC_1 .....	69
Figura 4.1.18 Tipo de canal para enlace OPC .....	70
Figura 4.1.19 Dirección IP de canal para enlace OPC .....	70
Figura 4.1.20 Tipo de dispositivo para enlace OPC .....	71
Figura 4.1.21 Dirección IP de dispositivo para enlace OPC .....	71
Figura 4.1.22 Creación de variable de entrada para enlace OPC .....	72
Figura 4.1.23 Creación de variable de salida para enlace OPC .....	72
Figura 4.2.1 Conexión Profinet entre PLC y HMI .....	74
Figura 4.2.2 Ajuste de interface PG/PC para comunicación S7ONLINE .....	74
Figura 4.2.3 Pantalla HMI diseñada .....	75
Figura 4.3.1 Prueba simulada de HMI con consigna de 100 N .....	77
Figura 4.3.2 Prueba simulada de HMI con consigna de 90 N .....	77
Figura 4.3.3 Prueba simulada de HMI con consigna de 80 N .....	78
Figura 4.3.4 Prueba simulada de HMI nuevamente con consigna de 100 N .....	78
Figura 4.3.5 Variables E/S de enlace OPC .....	79
Figura 4.3.6 Prueba simulada de HMI (tensión en nivel bajo) .....	79
Figura 4.3.7 Prueba simulada de HMI (tensión en nivel alto) .....	80
Figura 5.1.1 Tensión en la tela de desbobinadora (control clásico) .....	81
Figura 5.1.2 Corriente de campo en motor DC de desbobinadora (control clásico) ..	82
Figura 5.2.1 Tensión en la tela de desbobinadora (control adaptativo) .....	83
Figura 5.2.2 Corriente de campo en motor DC de desbobinadora (control adaptativo) .....	84
Figura 5.3.1 Consumo de materia prima tela barrera .....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.3.1 Ajuste de ganancia por Ziegler-Nichols por Oscilaciones Sostenidas. [6] .....	13
Tabla 2.3.2 Ajuste de ganancia para Ziegler-Nichols por curva de reacción Para $L/T < 1$ . [6].....	13
Tabla 2.3.3 Ajuste de ganancias para Tyreus-Luyben por Oscilaciones Sostenidas. [6] .....	14
Tabla 2.3.4 Ajuste de ganancia para Cohen-Coon por Curva de Reacción. [6] .....	14
Tabla 2.7.1 Presupuesto aproximado de implementación .....	23
Tabla 3.1.1 Datos experimentales de freno magnético .....	33
Tabla 4.1.1 Parámetros de controlador digital.....	71
Tabla 5.1.1 Comparativa de respuesta de tensión con controladores PID .....	79
Tabla 5.2.1 Comparativa de respuesta de tensión con controladores PID Difuso.....	81
Tabla 5.3.1 Consumo de materias primas por mes .....	84
Tabla 5.3.2 Cálculo de la eficiencia y producción.....	84
Tabla 5.3.3 Cálculo del ahorro en materia prima.....	84



# CAPÍTULO 1

## 1. PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

### 1.1 Identificación del problema

Durante el proceso de producción de pañales desechables, es crítico que la materia prima esté a una determinada tensión. Por esto, un adecuado y eficiente control de tensión es necesario.

Actualmente, el controlador que se usa es del tipo PID; éste demanda varios tiempos de calibración por la parte operativa, lo cual genera desperdicios de materia prima, paradas de máquina por la ruptura de materiales e impide el uso del total de materia prima que despacha el proveedor, de la cual queda un desperdicio considerable cuando no está correctamente calibrada la tensión.

El proceso de fabricación se ha detectado un desperdicio del 10% en la materia prima a causa de desajustes de tensión, esto representa un alto costo en la fabricación de las unidades de pañales, por tal motivo, se vuelve imperativo contar con un controlador eficiente, que ayude a reducir el desperdicio en al menos un 3%, es decir pasar de 10% a 7%, permitiendo generar ahorros en costos de producción.

### 1.2 Justificación

Con la implementación de un controlador inteligente de tensión, se conseguirá reducir el desperdicio de materia prima, se disminuirán las paradas de máquina por ruptura de telas, además se mejorará las variables de calidad, aceptación del producto, esto último debido a que la tensión es directamente proporcional a la elongación de la materia prima, es decir, menor cantidad de producto final rechazado.



**Figura 1.2.1 Material enredado en la desbobinadora**

### **1.3 Solución Propuesta**

Para eliminar los problemas antes mencionados nos enfocamos en encontrar el modelo matemático del sistema y un controlador inteligente que permitió una menor intervención de los operadores en el proceso de calibración. La importancia de este controlador es tal que si la tensión no se encuentra en los rangos adecuados el material se alargará provocando los efectos indicados previamente.

### **1.4 Objetivo de la Tesis**

#### **1.4.1 Objetivo General**

Diseñar un sistema de control de tensión de la desbobinadora de tela inferior y superior de un proceso de producción de pañales utilizando técnicas de control inteligente para reducir el consumo de materia prima y los tiempos de respuesta del sistema de control.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Realizar la revisión literaria respecto a la obtención del modelo matemático del sistema con el fin de asemejarse lo más posible al comportamiento real del proceso en nuestras pruebas.
- Emplear un software de simulación para validación del modelo matemático obtenido.
- Revisar las condiciones necesarias para el uso de controladores difusos, estableciendo los rangos de funcionamiento de la desbobinadora.
- Comparar sistemas de control ya implementados con el controlador desarrollado, para seleccionar el mejor controlador considerando rendimiento y robustez.
- Diseñar un sistema SCADA para el subproceso descrito, mediante el cual podamos controlar la variable de tensión y visualizar la respuesta del sistema.

### **1.5 Metodología**

Establecer claramente los conceptos del proceso de fabricación de pañales, incluyendo la explicación del control actual que se realiza; además mostrar los distintos tipos de control inteligentes que se pueden utilizar para la regulación de la tensión de la tela.

Luego de esto, realizar el modelo matemático de la parte del proceso que nos corresponde, basándonos en distintos artículos relacionados, y validar este modelo aproximado por medio de simulación en MatLab aplicando el controlador actual, y variables del sistema medidas en la planta.

Una vez validado el modelo matemático, se escogió el controlador inteligente que mejor se ajustó a nuestro sistema.

Se parametriza nuestro controlador para lo cual se usó la metodología correlacional, encontrando las relaciones entre las variables del sistema, luego se definió su mejor rango de operaciones y valores de trabajo.

Después de encontrar estas relaciones se trabajó con el modelo aproximado y su controlador inteligente, simulando el sistema en Matlab, con el cual se procedió a probar los valores encontrados en el controlador que se implementó en el PLC de control.

Adicionalmente, se comparó el controlador PID con el controlador inteligente encontrado, para poder concluir cuál responde mejor en nuestro sistema.

Finalmente, para poder visualizar las variables del controlador usamos un sistema SCADA, que nos ayudó a gestionar tanto la operación, como el control de nuestro sistema.

## **1.6 Alcance**

El proyecto se encuentra enfocado en el desarrollo de un controlador inteligente de tensión, aplicando herramientas aprendidas durante el desarrollo de la maestría; en vista que al proceso de producción estudiado se le va a plantear una modernización, se esperan resultados en varios ámbitos como el académico y el industrial, los cuales se listan a continuación:

- Se desarrolló un controlador para la regulación de la tensión que permitió el cumplimiento de las especificaciones de los materiales y la reducción del desperdicio.
- Al implementarse la propuesta se logró la reducción del 0.3% en el desperdicio de materia prima.
- Al mejorar el sistema SCADA actual, se redujo la intervención del operador en el sistema para la calibración de la tensión, reduciendo así fallas por errores de operación.

# **CAPÍTULO 2**

## **2. ESTADO DEL ARTE**



En esta sección se presenta una revisión literaria de los conceptos, técnicas y métodos de control que fueron aplicados en el desarrollo de los experimentos. Las variables revisadas corresponden a la descripción del modelo del sistema de fabricación de pañales, control PID, control difuso y por redes neuronales.

## **2.1 Descripción general del proceso de fabricación de pañales**

El proceso de fabricación de pañales de manera general está compuesto por 8 etapas que muestran en la Figura 2.1.2 y que detallamos a continuación:

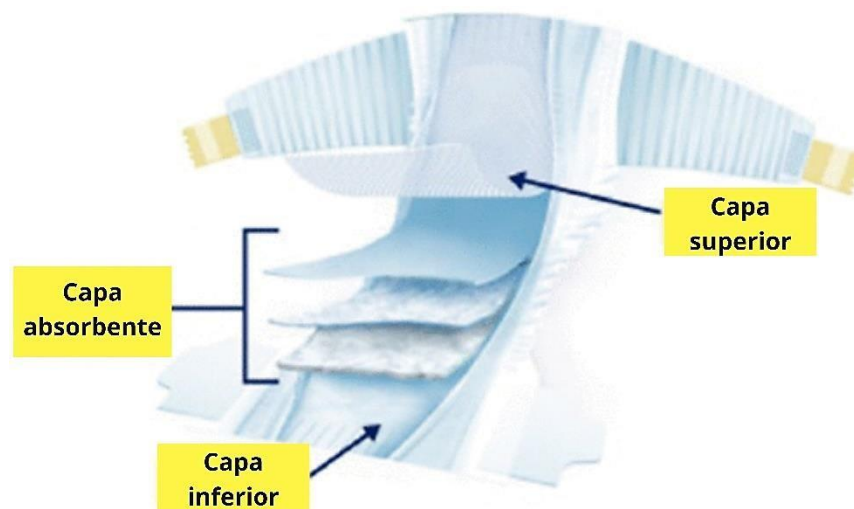
- 1.- Ingreso de materia prima donde las principales son el super absorbente y la pulpa que luego de su ingreso van a un molino que permitirá la formación del PAD o colchón de absorción.
- 2.- La etapa de formación consiste en tomar esa mezcla y colocarla en los respectivos pockets por medio del tambor formador dentro del cual el tamaño varía según la talla del pañal para luego por medio del tambor de transmisión pasar a la banda transportadora sobre la tela inferior que fue ingresa al proceso por medio de su respectivo desbobinador de tela inferior, ya en la banda y por medio de vacío que genera en ella el material continuo para entrar en la siguiente etapa.
- 3.- La etapa de la primera prensa permite que el pañal se comprima y tenga la altura adecuada con la densidad correcta.
- 4.- La etapa del corte del pad permite que el colchón sea precortado según la talla del pañal para luego pasar a la colocación de los respectivos aditivos.
- 5.- En esta Etapa se coloca el Frontal o tela que sirve de base para que las orejas delanteras se puedan adherir. Es importante mencionar que el suministro de la tela frontal es provisto por una estación de desbobinadoras que permiten la entrega de esta materia prima.
- 6.- Aquí por medio de un cilindro con un orificio de vacío permiten la aplicación de las orejas de corte anatómico que por medio de un adhesivo de secado rápido se

agregan al pañal en esta etapa ya se dispone de un sistema de visión que ayuda a la detección de defectos en la ubicación de los materiales.

7.- por medio de un sistema de corte vamos a separar los pañales y a doblarlos.

8.- Por medio de un sistema de bolsillos consecutivos se van a alojar los pañales doblados en donde por medio de estos se procederá a realizar el conteo de los mismos para enviarlos a la empaquetadora según lo requiera el formato seteado.

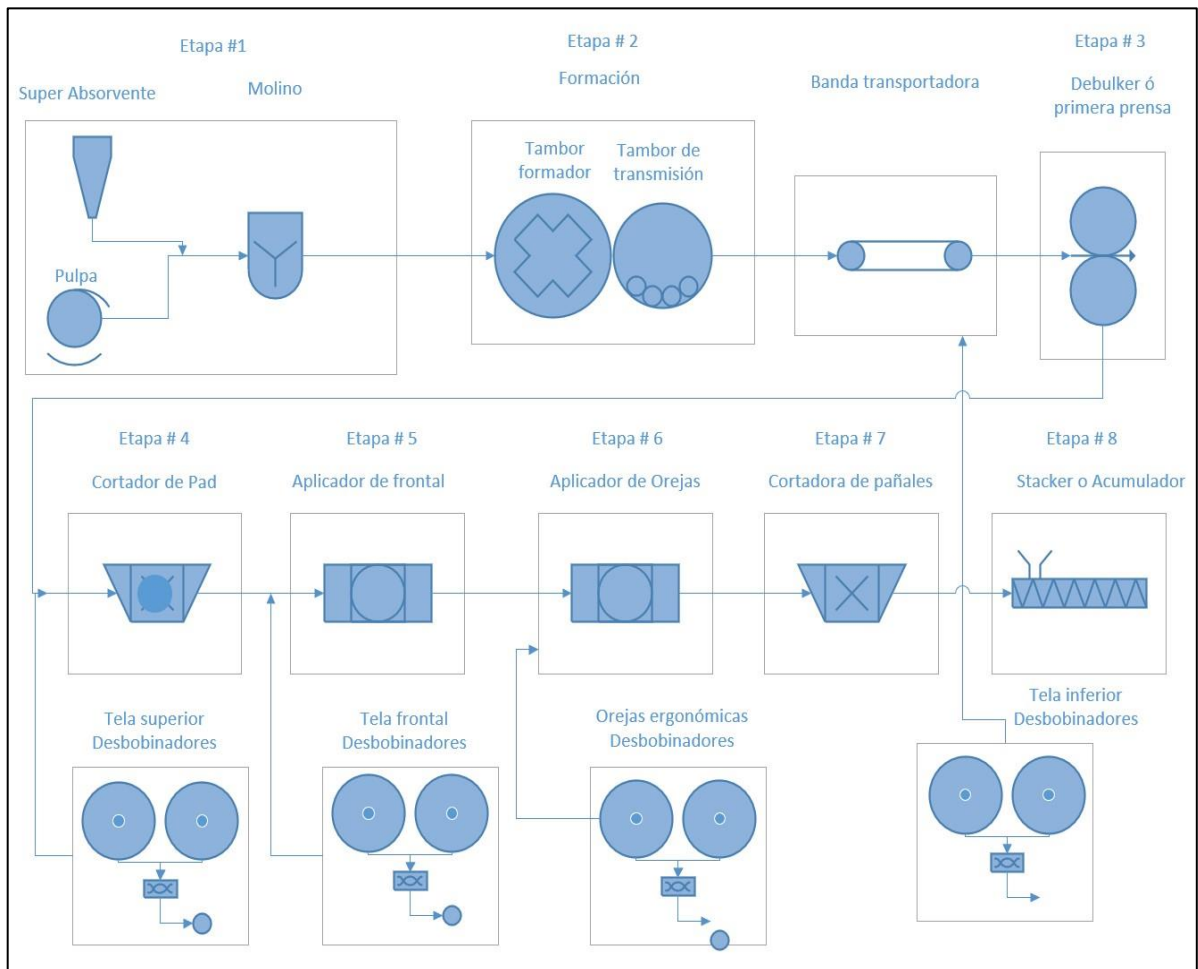
Es importante mencionar que las estaciones que vamos a estudiar son los desbobinadores son el sistema medular en la fabricación de pañales ya que la mayoría de las materias primas pasa por alguno de estos.



**Figura 2.1.1 Capas de un pañal [1]**

Los costos de fabricación de pañales implican el costo de la materia prima, costo de manufactura, costo de mano de obra, consumo de energía eléctrica y la infraestructura. [2]

La descripción del proceso se detalla específicamente en el trabajo de Balasubramanian K. y col. [3]



**Figura 2.1.2 Diagrama de bloques del proceso de fabricación de pañales**

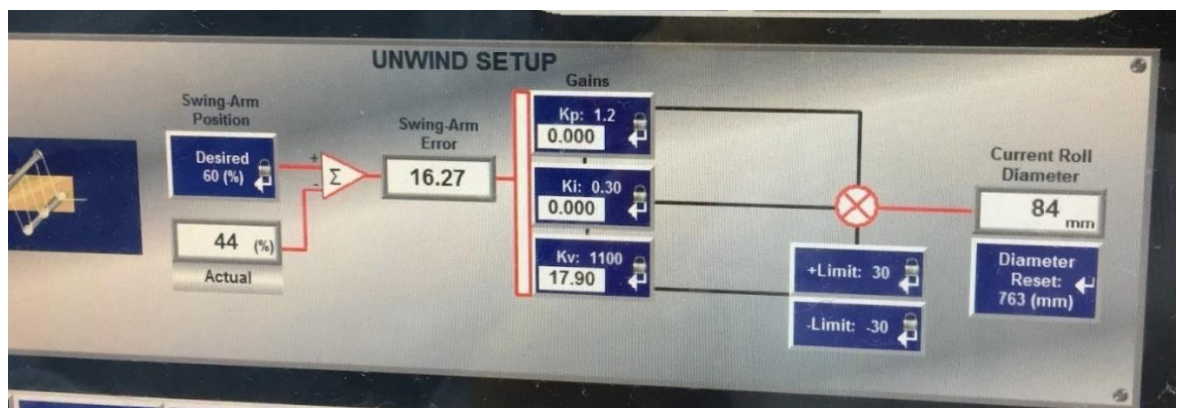
## 2.2 Descripción del escenario de control

En la fabricación de pañales, el control de la tensión de los materiales es fundamental durante el transporte a través de los diferentes procesos. Las etapas de fabricación pueden requerir diferentes velocidades de funcionamiento y existen muchas perturbaciones que los sistemas de control deben compensar para mantener la referencia de tensión. [4]

En la industria se utiliza el controlador PID de ganancia fija, estas ganancias se ajustan empíricamente para dar una respuesta estable de acuerdo con las condiciones de funcionamiento. A cambiar las condiciones como la propiedad del material, la tensión de la banda, los controladores PID de ganancia fija no

proporcionan un buen rendimiento haciendo que el sistema de control de tensión de circuito cerrado en algunos casos sea inestable. [4]

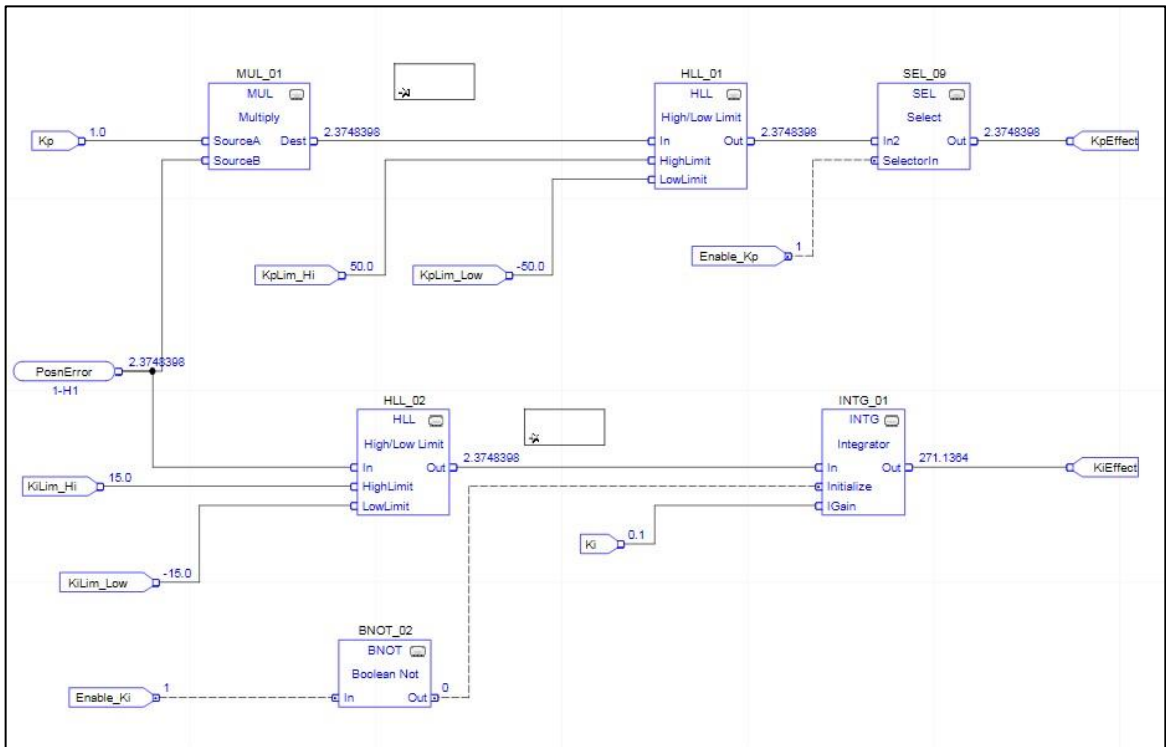
El control de Tensión se realiza por medio de un algoritmo de control que se encuentra programado dentro de la memoria de nuestro PLC que intercambia las señales de control con el sistema de fabricación de pañales. (Figura 2.2.1)



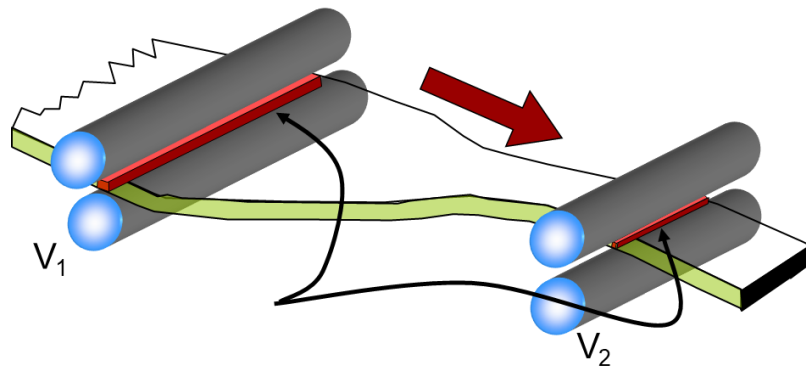
**Figura 2.2.1 Diagrama de bloques de PID actual**

Como podemos observar en la Figura 2.2.2, en el algoritmo programado para el control de tensión estos parámetros del PID tienen un efecto directo en la velocidad de los motores que hacen que se incremente o decremente su velocidad para aumentar o disminuir la tensión. Por lo que una correcta parametrización de estos parámetros permite que el proceso sea más estable y cuando no se sintoniza de manera correcta tendremos problemas de elongación de materiales que terminan provocando roturas de estos o problemas de aceleración en los respectivos ejes de las desbobinadoras.

En la Figura 2.2.3, se observa como el efecto de un control no parametrizado de manera correcta provocará que la tensión no sea la requerida y el material se elongue.



**Figura 2.2.2 Bloques del incremento de velocidad**



**Figura 2.2.3 Efecto de un incremento en la tensión de un material**

Para el control de tensión se debe ajustar la velocidad de cada sección de la máquina. Para esto existe dos tipos de control:

- I. Transmisión mecánica entre módulos: Se corrige la velocidad cambiando una correa en la polea de conos entre módulos de acuerdo con la variación de la

posición del rodillo. No usada en nuestro proyecto ya que en la máquina en estudio dispone de servomotores independientes.

- II. Trasmisión independiente entre módulos (servomotores): Se corrige la velocidad acorde con la carga aplicada en el material la cual es medida por las células de carga que la soportan

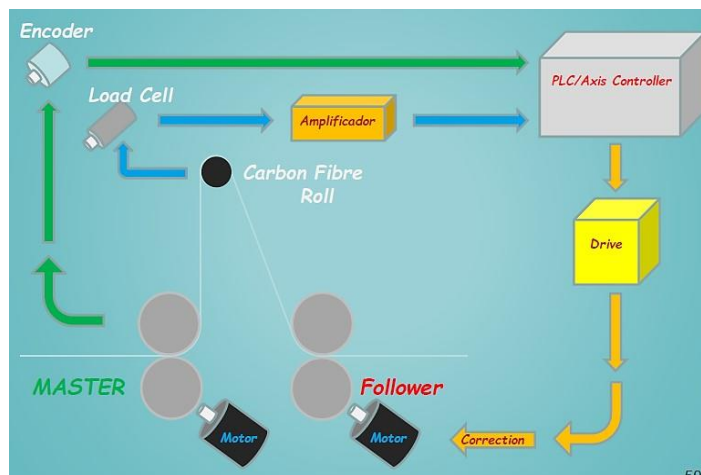


Figura 2.2.4 Control de tensión a través de celdas de carga. [5]

Existen diferentes supuestos críticos que se pueden presentar en el proceso y se los puede enumerar de la siguiente manera:

1. Calibración de velocidad
2. Calibración de la celda de carga
3. Calibración de rollo bailante
4. Sintonización de bucle de control
5. Coordinación del drive

Estos supuestos críticos se describen de manera más específica en el manual de prácticas. [5]

## 2.3 Controladores PID

### 2.3.1 Estructura del controlador PID

Un controlador PID se describe mediante la siguiente función de transferencia en el dominio S continuo:

$$G_c(s) = P + I + D = K_p + K_i s^{-1} + K_d s \quad (2.3.1)$$

Donde la variable  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $K_i$  conocido como el coeficiente de integración mientras que  $K_d$  es conocido como coeficiente derivativo.

### 2.3.2 Métodos de sintonización

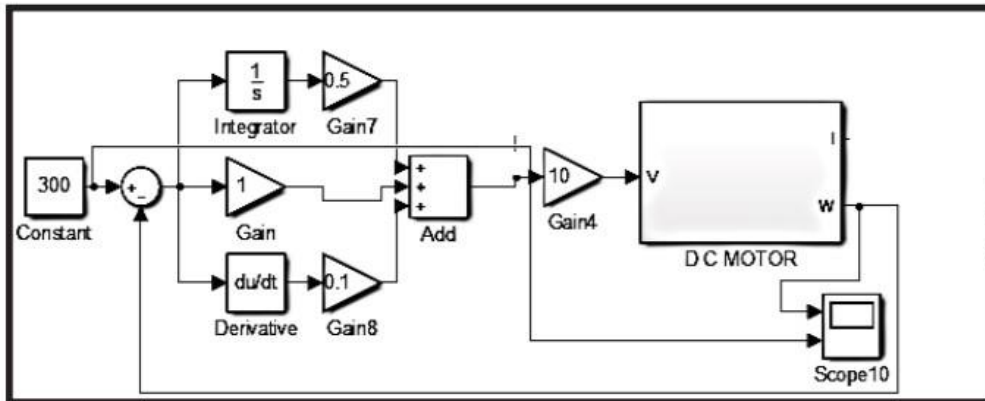
Existen diferentes métodos de sintonización de controladores PID, pero todos buscan hallar los parámetros  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  que mejoren la respuesta del sistema, es decir lo más fiel, rápido y robusto a la salida deseada.

Los métodos de sintonización se dividen principalmente en 2 grupos, métodos de sintonización de lado abierto y métodos de sintonización de lazo cerrado, además dependen del tipo de proceso a controlar que puede ser auto regulado o integradores.

Los métodos de sintonización del controlador PID son 4, según [6]:

- Método de prueba y error (lazo cerrado)
- Método de Ziegler - Nichols (lazo abierto, lazo cerrado, procesos integradores, procesos auto-reguladores)
- Método de Cohen - Coon (lazo abierto, procesos auto-reguladores) ● Método de Tyreus – Luyben (lazo cerrado, procesos integradores)

El método de prueba y error consiste en ir variando uno a uno los parámetros, empezando con la ganancia proporcional  $K_p$  hasta que llegué a la cercanía del valor de referencia, luego se empieza a variar el parámetro  $K_i$  hasta que el error de estado estacionario sea cero o lo más cercano a cero, después se empieza a ajustar el parámetro  $K_d$  hasta conseguir la respuesta más rápida; por último, se vuelven a ajustar estos tres valores.



**Figura 2.3.1 Sistema de lazo cerrado con controlador PID y subsistema de motor DC. [6]**

En la Figura 2.3.1 se observa la implementación de un controlador PID en un sistema de lazo cerrado con planta DC MOTOR, el bloque PID está compuesto de la sumatoria de sus 3 componentes, la proporcional, integral y derivativa.

En el método de Ziegler – Nichols, existen dos formas de caracterizar el controlador y así obtener una respuesta sub-amortiguada al escalón.

- Análisis frecuencial por oscilaciones sostenidas (lazo cerrado).
- Análisis temporal de la curva de reacción (lazo abierto).

El procedimiento en este método para lazo cerrado consiste en variar el parámetro  $K_p$  hasta encontrar la frecuencia crítica de oscilación, es decir amplitud igual y frecuencia igual en el tiempo, a esta ganancia se la llama  $K_{crit}$ .

Luego llenamos la tabla abajo mostrada, ajustando las ganancias del controlador PID hasta obtener la respuesta deseada.

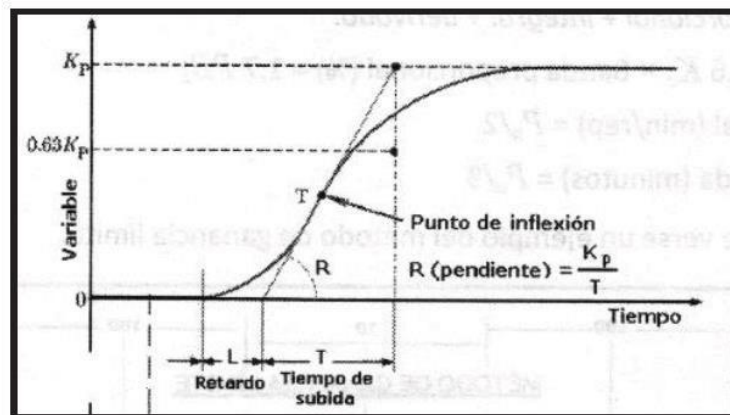
Controlador/Ganancia	$K_p$	$T_I$	$T_D$
P	$0.5K_{crit}$	0	0
PI	$0.45K_{crit}$	$0.85T$	0
PID	$0.65K_{crit}$	$0.5T$	$0.13T$



**Tabla 2.3.1 Ajuste de ganancia por Ziegler-Nichols por Oscilaciones Sostenidas. [6]**

Para este mismo método en lazo abierto se sigue el procedimiento de la respuesta al escalón sin controlador, y consta de los siguientes pasos [6]:

- Llevar la planta a un punto de operación normal.
- Aplicar un cambio escalón al 20% de su escala total.
- Observar la curva resultante y trazar una tangente al punto de cambio de la curva.
- Dar valores a  $T$  y  $L$  (tiempo de subida y retardo respectivamente).
- Ajustar las ganancias del controlador con la tabla 2.3.2, y por último volver a ajustar hasta tener el resultado esperado.



**Figura 2.3.2 Respuesta de la planta en lazo abierto sin controlador. [6]**

Controlador/Ganancia	$K_p$	$T_I$	$T_D$
P	$T/L$	0	0
PI	$0.9T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2T/L$	$2L$	$0.5L$

**Tabla 2.3.2 Ajuste de ganancia para Ziegler-Nichols por curva de reacción Para  $L/T < 1$ . [6]**

En el Método Tyreus-Luyben se siguen los mismos pasos que el Ziegler-Nichols en lazo cerrado, simplemente cambiando la tabla de sintonización, la cual se encuentra a continuación:

Controlador/Ganancia	$K_P$	$T_I$	$T_D$
PI	$K_{crit}/3.2$	$T/0.45$	0
PID	$K_{crit}/2.2$	$T/0.45$	$T/6.3$

**Tabla 2.3.3 Ajuste de ganancias para Tyreus-Luyben por Oscilaciones Sostenidas. [6]**

Para el Método Cohen-Coon en lazo abierto, se sigue el mismo procedimiento que el Ziegler-Nichols. La única diferencia es la tabla abajo mostrada.

Controlador/Ganancia	$K_P$	$T_I$	$T_D$
P	$\frac{1}{R} \left( 1 + \frac{1}{3}D \right)$	0	0
PI	$\frac{1}{R} \left( 0.9 + \frac{1}{12}D \right)$	$L \left( \frac{30 + 3D}{9 + 20D} \right)$	0
PID	$\frac{1}{R} \left( \frac{4}{3} + \frac{1}{4}D \right)$	$L \left( \frac{32 + 6D}{13 + 8D} \right)$	$L \left( \frac{4}{11 + 2D} \right)$

**Tabla 2.3.4 Ajuste de ganancia para Cohen-Coon por Curva de Reacción. [6]**

Donde  $R=V_p/T$  y  $D=L/T$  donde  $V_p$  es el valor máximo (y) al que llega la curva. [6]

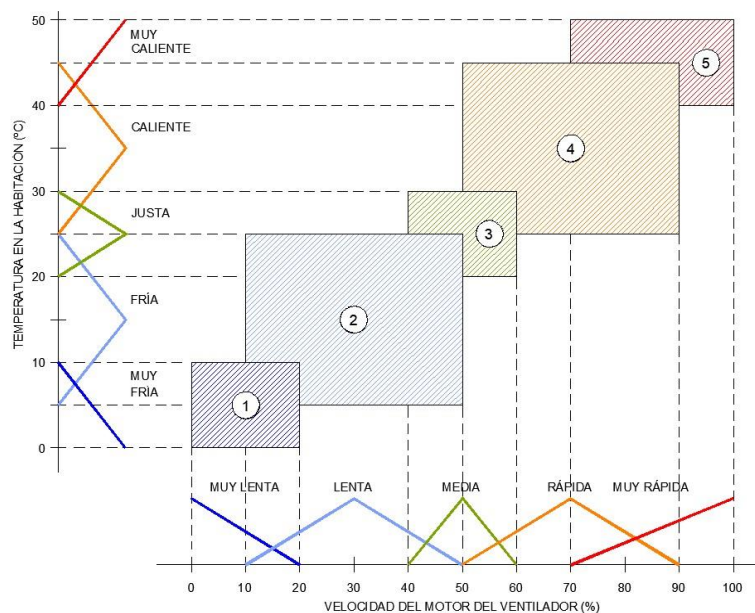
## 2.4 Controladores Inteligentes

Este tipo de control tiene como objetivo la investigación y desarrollo de aplicaciones basadas en inteligencia artificial, tales como las redes neuronales y la lógica difusa, siendo estas técnicas distintas a técnicas convencionales que se basan fundamentalmente en modelos matemáticos.

Mientras que en el control digital la señal de salida es binaria, la lógica difusa utiliza operadores para describir un sistema mediante reglas. Un ejemplo aplicado industrial y residencialmente es el control de temperatura de una habitación, con un termostato y el motor de un ventilador. Los valores de temperatura, dentro de

cierto rango, obedecen a una lógica multivariada en un intervalo (0,1), y la relación entre la temperatura y la velocidad del motor se muestran en la Figura 2.4.1 cuyas reglas respectivamente son:

1. Si la temperatura es muy fría, la velocidad del motor es muy lenta.
2. Si la temperatura es fría, la velocidad del motor es lenta.
3. Si la temperatura es justa, la velocidad del motor es media.
4. Si la temperatura es caliente, la velocidad del motor es rápida.
5. Si la temperatura es muy caliente, la velocidad del motor es muy rápida.



**Figura 2.4.1 Control por lógica difusa de temperatura en una habitación. [7]**

### 2.4.1 Controladores difusos

El controlador difuso se basa principalmente en el condicionamiento SI (antecedentes), ENTONCES (consecuentes). Es necesario entender algunos conceptos al hablar de lógica difusa:

**Universo del discurso:** conjunto formado por todos los elementos que se están considerando, pueden ser agrupados según su propiedad o propiedades que los va a caracterizar para agruparlos. También se los puede agrupar nombrándolos, los anteriores nombrados son definidos por el método de la regla y el método de la lista.

**Conjunto de corte:** es el conjunto de elementos que pertenecen al conjunto  $A$ , y que se encuentran en un intervalo de valores definido por el corte horizontal de  $A$  al  $\alpha$  y se denota como sigue:

$$A_\alpha = \{u \in U | \mu_A(u) > \alpha\} \quad (2.4.1)$$

**Soporte:** el soporte está compuesto por aquellos elementos  $\mu$  del universo del discurso  $U$  que conforman el subconjunto  $A$  que cumplen la condición de que el grado de pertenencia es mayor estricto que cero.

$$S(A) = \{u \in U | \mu_A(u) > 0\} \quad (2.4.2)$$

**Función de pertenencia:** es una función asociada al subconjunto difuso y generalmente recibe el mismo nombre. Su forma depende de la aplicación y como se pretenda describir la relación de pertenencia.

Sus formas principales son:

- Triangular
- Trapezoidal
- Campana de Gauss

**Grado de pertenencia:** se dice que un elemento pertenece al conjunto  $A$  con un grado de pertenencia determinado. Este grado es evaluado por un número entre 0 y 1 incluidos.

**Variable y etiqueta lingüística:** es una palabra o una oración de palabras. Esta es la principal diferencia entre una variable lingüística y una numérica.

**Operaciones con los conjuntos difusos:** intersección y conjunción. **Composición de un sistema difuso**

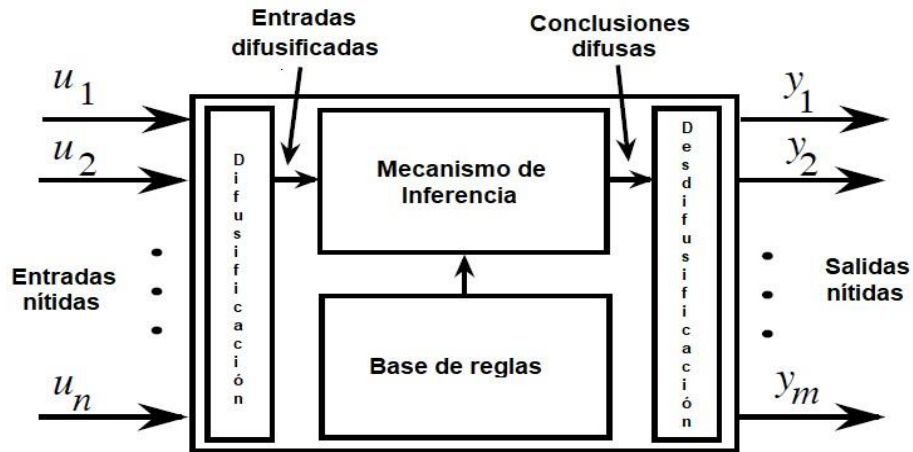


Figura 2.4.2 Sistema Difuso. [8]

## 2.5 Sistemas de control de Tensión en máquinas de pañales

### 2.5.1 Introducción

Durante el proceso de fabricación de pañales se presentan algunos inconvenientes que afectan a la producción. Uno de los inconvenientes principales es el control de tensión del tejido o tela el cual ocasiona desperdicio de material, paradas de la máquina, y alta demanda de tiempo para el ajuste y calibración de parámetros del sistema control. [9]

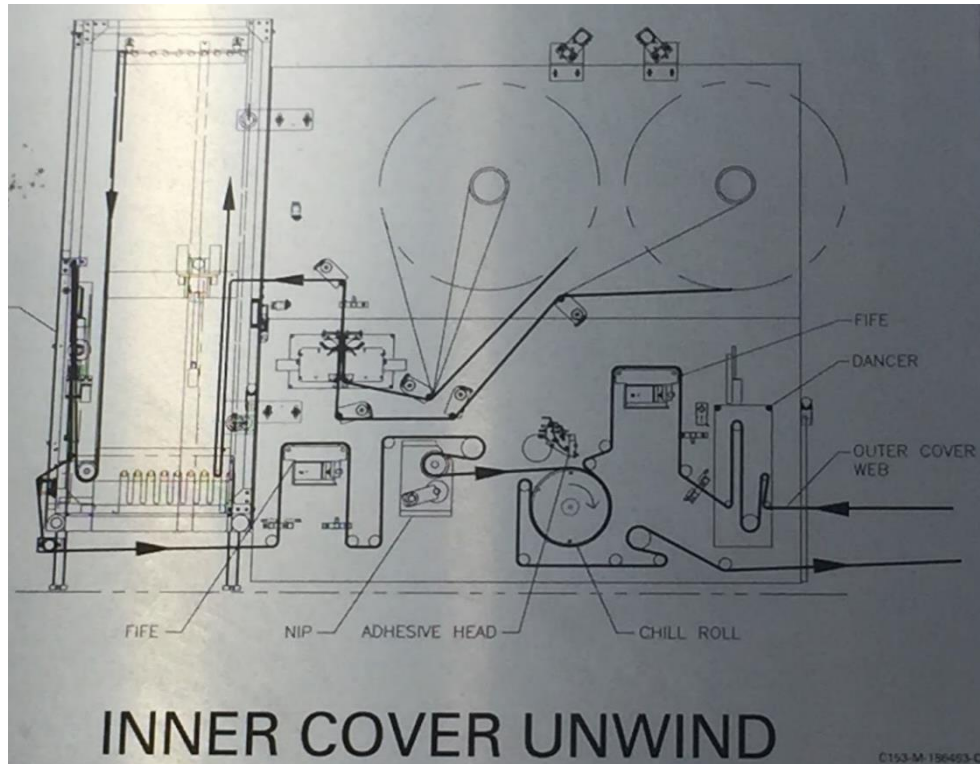
### 2.5.2 Etapas del sistema

La máquina de producción de pañales se la divide en 8 etapas de producción como vimos anteriormente en las que se usan 4 desbobinadores para diferentes materiales.

El material que es entregado por el proveedor de materia es ubicado en las desbobinadoras, la punta del material es llevada a través del sistema de arrastre hasta el acumulador (Figura 2.5.1). De tal manera que se tense las telas que pasan a través de ella para mantener un movimiento uniforme.

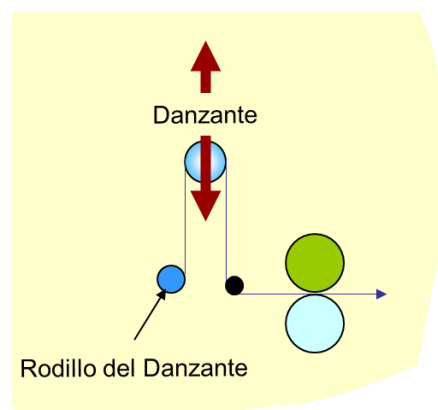
En total se tienen 4 desbobinadoras, como se mencionó anteriormente el funcionamiento de estas dos secciones es similar por lo que solo se tiene un rodillo conectado a la transmisión el cual se lo denomina rodillo perfilado o NIP (Figura

2.5.1). Mediante las ranuras angulares que están en contacto con el otro rodillo, esta captura la tela y la hala.



**Figura 2.5.1 Desbobinadoras de telas para máquinas de pañales.**

Los acumuladores los podemos encontrar en las etapas 3, 4, 5 y 6, estas se encargan de tensionar la tela. El Danzante del acumulador sube o baja según el diámetro de la bobina y se unen mediante un rodillo, el giro de este rodillo tensiona la tela cuando pasa y hace que la máquina en funcionamiento mantenga una mínima variación de tensión (Figura 2.5.2).



**Figura 2.5.2 Principio de Funcionamiento del Acumulador.**



**Figura 2.5.3 Unidad de Presión o Acumulador.**

El módulo de desbobinador de la Figura 2.5.4 se realiza el proceso de desbobinado su eje central dispone de un freno electromagnético que ayuda con el control de la tensión adicionalmente se disponen de dos bobinas y un sistema de empalme neumático que cuando la bobina que está trabajando ya se encuentre vacía pueda realizar el empate y darle continuidad al proceso.

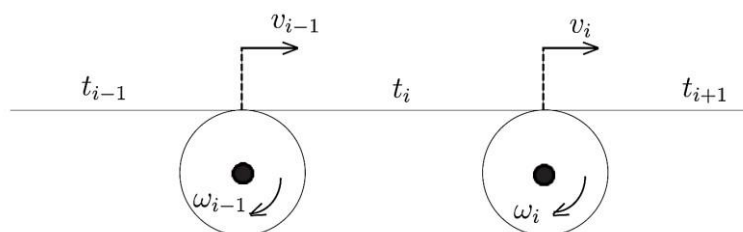




**Figura 2.5.4 Sección desbobinadora. Se realiza el proceso de corte y unión de los diversos materiales.**

### 2.5.3 Ecuaciones del sistema

En la Figura 2.5.5,  $t_i$  denota la tensión de la banda en el tramo en el espacio entre (i-1)-ésimo y su rodillo,  $v_i$  es la velocidad de transporte en el i-ésimo rodillo y  $\omega_i$  es la velocidad angular del i-ésimo rodillo.



**Figura 2.5.5 Configuración simple de dos rodillos adyacentes. [4]**

La tensión de la banda en el i-ésimo tramo está dada por:



$$\dot{t}_i = \frac{EA}{L_i}(v_i - v_{i-1}) + L_i^{-1}(t_{i-1}v_{i-1} - t_iv_i) \quad (2.5.1)$$

Donde:

- $E$ : Modulo de elasticidad del material
- $A$ : Área de la sección transversal del material
- $L_i$ : longitud del tramo  $i$

La velocidad de transporte del material en el  $i$ -ésimo rodillo está dada por:

$$\dot{v}_i = \frac{R_i^2}{J_i}(t_{i+1} - t_i) + \frac{R_i}{J_i}n_i u_i - \frac{b_{fi}}{J_i}v_i. \quad (2.5.2)$$

Donde:

- $R_i$ : Radio del  $i$ -ésimo rodillo
- $J_i$ : Inercia del  $i$ -ésimo rodillo
- $n_i$ : Relación de transmisión
- $b_{fi}$ : Coeficiente de fricción

Estas ecuaciones se pueden linealizar alrededor de los valores de referencia, para lo cual se definen las variables incrementales como siguen:

$\Delta t_i = t_i - t_r$ ,  $\Delta v_i = v_i - v_r$  y  $\Delta u_i = u_i - u_{eq}$ , donde  $u_{eq}$  es la entrada de control de equilibrio. Aplicando la transformada de Laplace en las ecuaciones linealizadas de tensión y velocidad se obtienen las siguientes funciones de transferencia.

$$T_i(s) = \frac{EA/V_r}{\tau_{oi}s + 1}(V_i(s) - V_{i-1}(s)) + \frac{1}{\tau_{oi-1}s + 1}T_{i-1}(s), \quad (2.5.3)$$

$$V_i(s) = \frac{R_i^2}{J_i s + b_{fi}}(T_{i+1}(s) - T_i(s)) + \frac{R_i}{J_i s + b_{fi}}n_i U_i(s) \quad (2.5.4)$$

Donde  $\tau_{oi} = L_i/v_r$  es la constante de tiempo del tramo, es decir el tiempo que le toma al material entrar y salir de un tramo. En la ecuación  $T_i(s)$ , el término  $T_{i-1}(s)$  aparece debido a las deformaciones que ocurren en el transporte desde los tramos aguas arriba hasta los tramos aguas abajo. A partir de estas funciones de

transferencia se puede crear un modelo para la tensión y velocidad del sistema de transporte de fabricación de pañales.

En el sistema de transporte de material se emplean muchos rodillos locos (rodillos que no cuentan con un sistema de accionamiento) además de los rodillos accionados para establecer la trayectoria del material a través de todos los procesos. Para simplificar el modelo del sistema se emplea la zona de tensión activa, la cual considera la dinámica del material entre dos rodillos accionados y descarta la dinámica del material entre dos rodillos locos ya que estos no contribuyen de manera significativa a la dinámica del sistema.

En la Figura 2.5.8 se presenta un esquema simplificado lineal que muestra las zonas de tensión y los rodillos accionados. Los rodillos denotados como LC están montados en celdas de carga para proporcionar retroalimentación de la tensión. Los rodillos accionados en la sección de envoltura (S-Wrap) están unidos electrónicamente como esclavos y están bajo el control de velocidad puro, estos se tratan como un solo rodillo (M1) y se lo conoce como rodillo principal de control de velocidad.

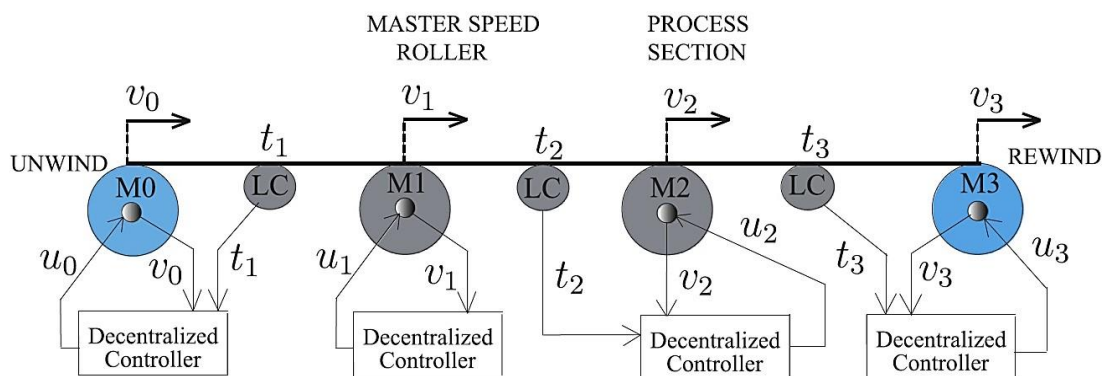


Figura 2.5.6 Esquema simplificado de la plataforma experimental del sistema de fabricación. [4]

## 2.6 Descripción de la solución propuesta

Se plantea la solución de un sistema de control de tensión por medio de un freno magnético de partículas en conjunto con un servomecanismo que permita el control de la tensión a través de las variables ingresadas por la receta de programación. Para la selección de los servomotores se sigue las recomendaciones del fabricante de la máquina y las consideraciones de la velocidad requerida.

Es importante mencionar que el control de la tensión sólo se podrá conseguir si los equipos se sincronizan de manera correcta y que el controlador logre estabilizar el sistema en el menor tiempo posible.

La tensión debe ser medida de manera constante a través de celdas de carga que constantemente estarán siendo monitoreadas por el sistema de control.

Además, se plantea una interfaz HMI para control por parte del operador.

## 2.7 Presupuesto de Implementación

Los materiales a ser utilizados para su implementación serían los siguientes:

Ítem	Descripción	Cant	Und	PU	Total
1	Controlador con comunicación ethernet	1,00	und	\$4.500,00	\$4.500,00
2	Fuente de alimentación del sistema de control de movimiento	1,00	und	\$5.300,00	\$5.300,00
3	Servomotor de control de torque	1,00	und	\$3.800,00	\$3.800,00
4	Cables de alimentación y control	1,00	glb	\$1.500,00	\$1.500,00
5	Tablero de control	1,00	und	\$2.300,00	\$2.300,00
6	Servicio de mano de obra de ingeniería y puesta en marcha	1,00	und	\$8.000,00	\$8.000,00
7	Pantalla de operador	1,00	und	\$2.800,00	\$2.800,00
8	Freno magnético de partículas	1,00	und	\$12.000,00	\$12.000,00
<b>TOTAL</b>					<b>\$40.200,00</b>

**Tabla 2.7.1 Presupuesto aproximado de implementación**

# CAPÍTULO 3

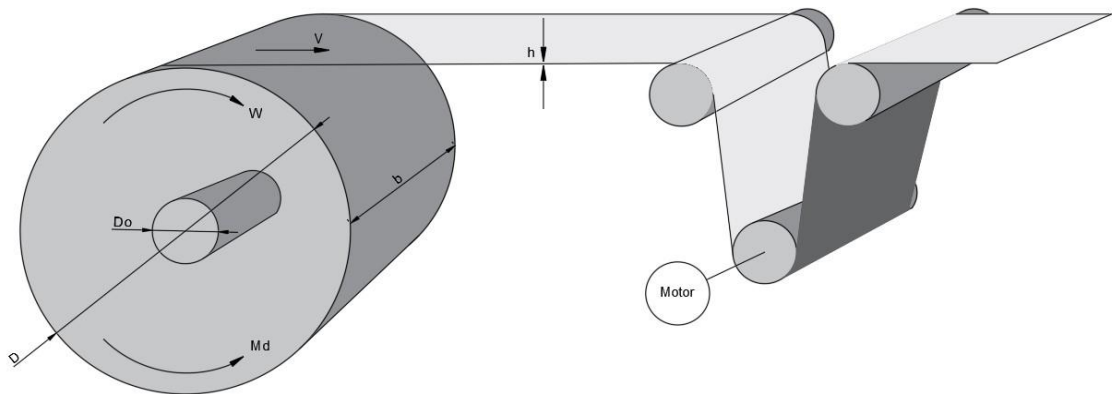
## 3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y DISEÑO DEL CONTROLADOR INTELIGENTE

### 3.1 Modelo matemático de sistemas de control de tensión en el proceso de producción de pañales.

En la máquina de producción de pañales, se introduce el término web handling que básicamente es el proceso de transportar los materiales delgados y flexibles, como tejido; se define también que hoja es todo aquel material flexible y continuo donde longitud > ancho > espesor, en el transporte de la hoja el objetivo es hacerlo a una velocidad máxima con el mínimo daño posible.

El daño en la hoja puede acontecer por múltiples razones, pero una de las más importantes es una excesiva o insuficiente tensión, de allí la necesidad de tener un buen control de tensión. La tensión es afectada por muchos factores, cambios en el diámetro de la bobina del papel, velocidad de producción, mala disposición de rodillos auxiliares, todo esto vuelve al sistema de control de tensión del papel en un sistema no lineal, complejo y variable en el tiempo.

Conseguir un modelo matemático del sistema de control de tensión lo suficientemente exacto, se convierte en la base primordial para el diseño de nuestro controlador inteligente.



**Figura 3.1.1 Modelo dinámico de tensión de una desbobinadora. [10]**

En la figura 3.1.1 se muestran las siguientes variables:

- $M_d$ : Par de frenado que actúa sobre los rodillos de la desenrolladora [N.m]
- $\omega$ : Velocidad angular del rollo de la desenrolladora [rad/s]
- $V$ : Velocidad lineal del papel [m/s]
- $D$ : Diámetro del rollo [m]
- $b$ : Ancho del rodillo [m]
- $h$ : Espesor de la hoja [m]

### 3.1.1 Modelo matemático de una máquina desenrolladora de bobinas

La ecuación de equilibrio dinámico de la desenrolladora de la hoja se puede extraer de la ecuación:

$$\frac{d(J\omega)}{dt} = \frac{TD}{2} - M_d - B_f(t)\omega \quad (3.1.1) [11]$$

Donde:

- $T$ : tensión del rollo
- $J_o$ : inercia del eje central del rollo de desenrolladora
- $B_f$ : coeficiente de amortiguación
- $\rho$ : densidad del rollo
- $D_o$ : diámetro inicial del rollo de papel

Tensión es derivada, obteniendo:

$$T = 2MDa + 4DB_2fV + [-34 - \rho bh + 8hD_0] \pi \rho b 4h (DD_0)^4 V_2 +$$

$$\left[ D_2^4 \frac{4J_0 \rho bh D^2 \pi}{8} - \frac{\rho bh D_0^4 \pi dV}{8 D^2} \right] dT \quad (3.1.2)$$

[11]

De la ecuación 3.1.2 se puede observar que la tensión es afectada por diversos factores: velocidad de la desenrolladora, inercia del rodillo, diámetro del rollo, densidad, espesor y coeficiente de fricción de la hoja.  $T$  es un polinomio que tiene como entradas principales la velocidad lineal, el diámetro del rollo, demostrando que la tensión es un sistema de control no lineal y variante en el tiempo, lo que nos da una premisa del tipo de controlador efectivo para este sistema.

Como vimos en el párrafo anterior es importante tener el modelo de la velocidad lineal de la desenrolladora de la hoja y del diámetro del rollo.

La velocidad lineal de la hoja en nuestro proceso es ajustada dependiendo del tipo de pañal a fabricar, esto se lo hace mediante una receta que posee el operador; hay dos elementos que intervienen en ese control de la velocidad lineal, uno es el motor DC y el freno magnético acoplado a la desenrolladora.

Para nuestro sistema asumiremos una velocidad lineal constante, es decir un tipo de pañal predefinido, también es necesario aclarar que no proporcionaremos un control específico de velocidad del motor DC por medio de su voltaje de armadura, solamente se crea un lazo cerrado con ganancia unitaria.

La manera de controlar la tensión de la hoja se la realiza por medio de un freno magnético de partículas, el cual también es objeto de modelamiento matemático.

### 3.1.2 Modelo matemático de un motor DC de una desenrolladora de bobinas

Un motor DC es usado para el control de la velocidad lineal del proceso y de manera indirecta por efecto de arrastre controla el desenrollado de la hoja. El modelo esquemático de un motor DC cuya velocidad es controlada por el voltaje de armadura se muestra en la figura 3.1.2

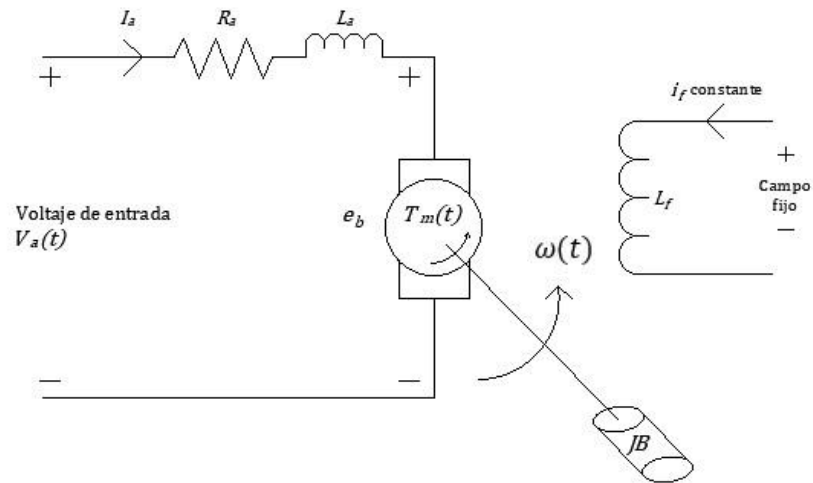


Figura 3.1.2 Diagrama esquemático de un motor DC controlado por armadura. [12]

Donde:

$$i_f(t) = I_f = \text{constante}$$

$$V_a(t) = R_a * I_a(t) + L_a * \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t)$$

$$T_m = K_m * i_a(t)$$

$$T_m(t) = T_L(t) + T_d(t)$$

$$T_L(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + b * \omega$$

$$e_b(t) = (K * K_f * I_f) * \omega(t) = K_b * \omega(t)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega(t) dt$$

Aplicamos la transformada de Laplace a las ecuaciones arriba descritas

$$I_a(s) = \frac{1}{R_a + sL_a} [V_a(s) - E_b(s)]$$

$$T_m(s) = K_m * I_a(s)$$

$$T_L(s) = T_m(s) - T_d(s)$$

$$\Omega(s) = \frac{1}{b + sJ} * T_L(s)$$

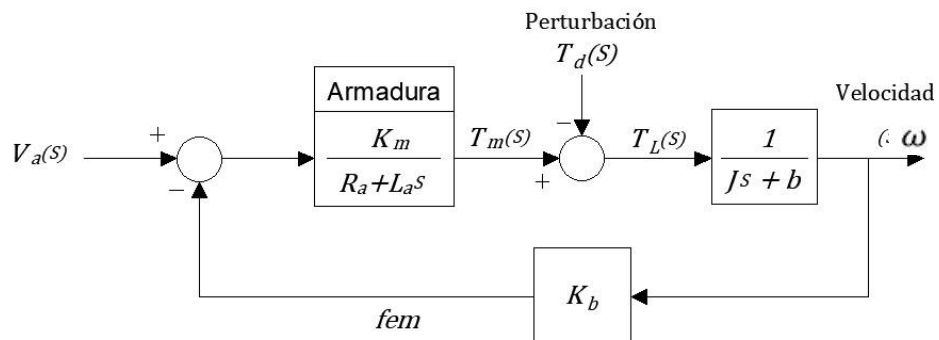
$$E_b = K_b * \Omega(s)$$

$$\theta(s) = \frac{1}{s} \Omega(s)$$

Para nuestro interés relacionamos el voltaje de armadura como entrada con la velocidad angular como salida, obteniendo la ecuación 3.1.3.

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(R_a + sL_a)(B + sJ) + K_m + K_b} \quad (3.1.3)$$

Dádonos en el siguiente subsistema:



**Figura 3.1.3 Diagrama de bloques del subsistema de control de velocidad de un motor DC. [12]**

Donde:

- $\omega$ : velocidad angular [rad/s]
- $V_a$ : voltaje de armadura [v]
- $K_m, K_b$ : constantes de armadura y fuerza contra electromotriz
- $L_a$ : inductancia de armadura [H]
- $R_a$ : resistencia de armadura [ $\Omega$ ]
- $J$ : inercia del motor y de la carga referida al eje [Kg.m<sup>2</sup>]
- $B$ : coeficiente de fricción y viscosidad del motor [N.m/rad/s]

Para convertir la velocidad angular a velocidad lineal simplemente usamos la ecuación 3.1.4.

$$V = \omega * R \quad (3.1.4)$$



Siendo  $V$  la velocidad lineal,  $\omega$  la velocidad angular y  $R$  el radio del rodillo accionado por el motor.

### 3.1.3 Modelo matemático del diámetro de un rollo de una desenrolladora

De acuerdo [9], el radio del rollo de un enrollador se calcula a partir de:

$$= R_o + \frac{h}{2\pi} \int_0^t R \omega dt \quad (3.1.5) [13]$$

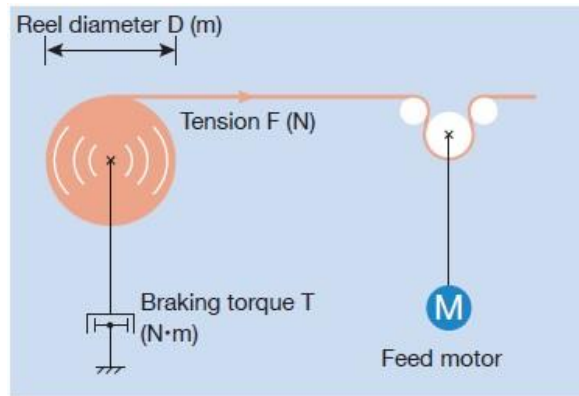
Para nuestro caso, al tratarse de una desenrolladora, simplemente cambiamos el signo positivo por negativo, indicando que el rollo en lugar de aumentar su diámetro, lo disminuye, obteniendo:

$$= R_o - \frac{h}{2\pi} \int_0^t R \omega dt \quad (3.1.6) [13]$$

Donde  $R_o$  es el valor inicial del radio del rollo  $R$ ;  $h$  es el espesor de la hoja de papel, y  $\omega$  es la velocidad angular del rollo.

### 3.1.4 Modelo matemático de un freno de partículas magnético

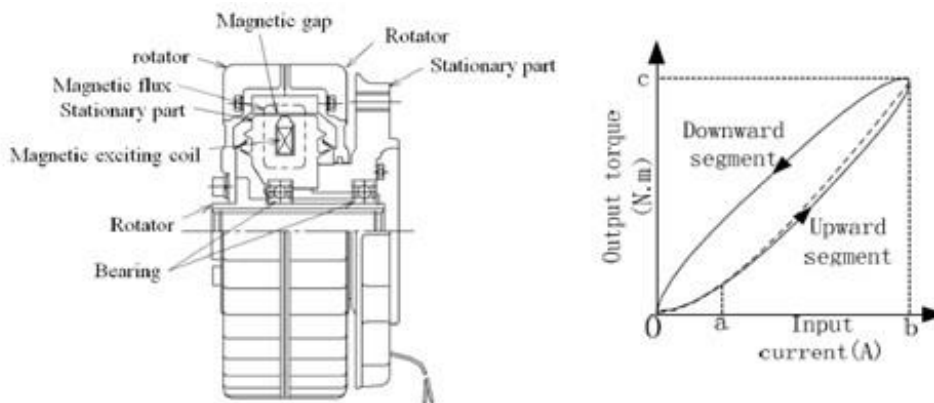
El freno magnético de partículas es un elemento indispensable para el control de tensión de sistemas modernos de rebobinadora y desbobinadora para materiales como papel, hojas, cables eléctricos, cintas, entre otros.



**Figura 3.1.4 Control de tensión de la hoja por freno magnético. [10]**

Como muestra la figura 3.1.4, cuando el freno magnético aplica un torque  $T$  (N.m), la tensión  $F$  de la hoja es  $2T/D$  (N) [10]. A medida como el diámetro de la bobina disminuye, el freno ajusta su torque para mantener la tensión del material aproximadamente constante. En conclusión, el control de tensión de la hoja se lo realiza por medio del freno magnético de partículas acoplado a la desenrolladora. De acuerdo a [14], analizando a través de datos experimentales, se obtiene las características de cargas de un MPB (magnetic powder brake) o freno magnético de partículas y el valor de los materiales para mejorar la precisión de la carga, el modelado matemático y la compensación de la histéresis.

En la figura 3.1.5 se observan los componentes físicos de un freno magnético de partículas y su curva característica teniendo como entrada la corriente en amperios y la salida el torque en N.m.



**Figura 3.1.5 Estructura interna y curva característica de un freno magnético de partículas. [14]**

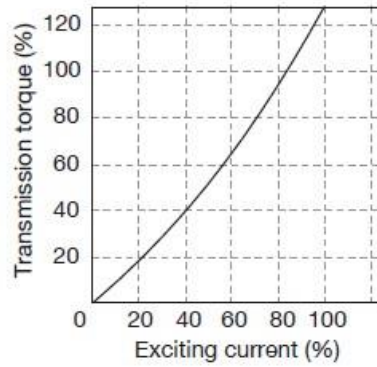
Según [13], la relación entre el torque de salida y la corriente de entrada de un freno magnético de partículas es expresada como sigue:

$$T = \frac{\pi D_m^2 N^2 I^2 L_m}{4 \mu_o \mu_\delta S_\delta^2 \left( \frac{\mu_\delta S_\delta}{l_\delta} + \frac{\mu_i S_i}{l_i} \right)^2} \quad (3.1.7) [14]$$

Donde  $T$  es el torque,  $N$  es el número de vueltas de la bobina,  $\mu_i$  es la permeabilidad del núcleo de hierro,  $S_\delta$  es la holgura y la permeabilidad de las partículas,  $S_i$  es el área del núcleo,  $l_\delta$  es la longitud del núcleo de hierro en el circuito magnético,  $D_m$  es el diámetro de salida de la bobina,  $I$  es la corriente,  $L_m$  es el ancho de la bobina,  $\mu_\delta$  es la permeabilidad de la partícula magnética,  $\mu_o$  es la permeabilidad de la holgura.

En la ecuación 3.1.7, nos damos cuenta que todos los valores se pueden considerar constantes a excepción de la corriente, por lo que el torque de salida se expresa básicamente en función de la corriente de entrada. Sin embargo, no es realista considerar un material magnético como constante debido a la saturación que experimenta, por ello en la figura 3.1.5 b se nota la histéresis propia en la gráfica corriente de excitación vs torque de salida del freno magnético. Al no contar con los valores exactos de las constantes demandadas en la ecuación 3.1.7, tomaremos referencias según [15] donde se muestra un ejemplo típico de como varía el torque en relación con la corriente de excitación.

En la figura 3.1.6 se muestra la curva corriente de excitación versus transmisión del torque en porcentajes, y podemos notar que es aproximadamente lineal hasta el 40% de la corriente de excitación, pero luego cambia su ritmo de crecimiento, terminando en 130% de transmisión de torque cuando la corriente de excitación es el 100%.



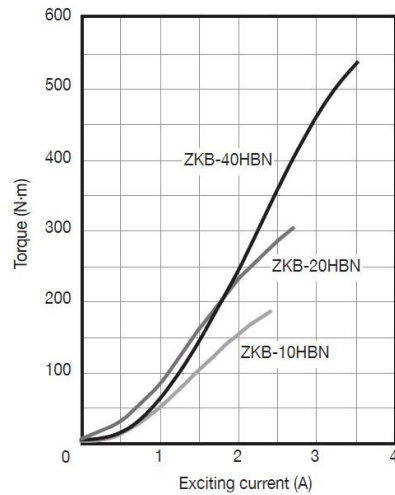
**Figura 3.1.6 Corriente de excitación vs característica del torque (ejemplo típico).** [15]

Se observa gráficamente a través de experimentación y por medio de la fórmula que la curva que describe el comportamiento de la corriente de excitación versus torque es del tipo cuadrática, asemejándose a lo descrito en la ecuación 3.1.7.

El freno magnético utilizado es el modelo ZBK-20HBN de la marca Mitsubishi, cuya imagen y curva característica se puede observar en las figuras 3.1.7 y 3.1.8 respectivamente.



**Figura 3.1.7 ZBK-20HBN Powder Brake.** [16]

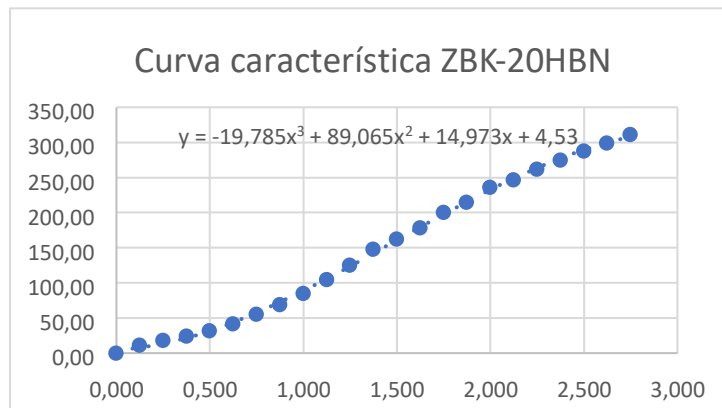


**Figura 3.1.8 Curva característica vs torque del modelo ZBK-20HBN. [16]**

La tabla 3.1.1 muestra los puntos de la curva característica de la figura 3.1.8, los cuales nos sirven para encontrar la función de transferencia del freno magnético por medio de la identificación del sistema con puntos experimentales.

<b>ZBK-20HBN</b>	
<b>Exciting current (A)</b>	<b>Torque (N.m)</b>
0,000	0,00
0,125	11,00
0,250	17,90
0,375	24,00
0,500	31,50
0,625	42,00
0,750	55,21
0,875	69,00
1,000	85,08
1,125	104,50
1,250	125,00
1,375	148,00
1,500	162,50
1,625	178,15
1,750	200,00
1,875	215,00
2,000	235,66
2,125	246,60
2,250	261,61
2,375	275,02
2,500	287,52
2,625	299,10
2,750	311,13

**Tabla 3.1.1 Datos experimentales de freno magnético**



**Figura 3.1.9 trazo de los puntos del freno magnético**

Para encontrar la función de transferencia del freno magnético aplicaremos la identificación del sistema a través de la herramienta “*pidTuner*” de MatLab, esto debido a que la identificación a profundidad, no es el objeto principal de nuestra propuesta.

### 3.1.4.1 Identificación del subsistema freno magnético de partículas

Con los datos ingresados en una tabla de Excel, se trabaja desde MatLab con las funciones “*xlsread*” e “*iddata*” que nos permiten leer datos desde un archivo de Excel y preparar datos para la identificación respectivamente.

```

%% Freno magnético de partículas
I_freno= xlsread('curva_freno2.xlsx','A2:A24');
T_freno= xlsread('curva_freno2.xlsx','B2:B24');
datos_freno2= iddata(T_freno,I_freno,0.125);

```

**Figura 3.1.10 Sentencias del script para iddata del freno magnético**

Abrimos el *pidTuner* desde el comand Windows o seleccionándolo desde la pestaña *APPS*, dentro del PID Tunner seleccionamos Plant – Identify New Plant.

Dentro del Plant identification – step response e ingresamos el *iddata* correspondiente.

Se presume que nuestra función de transferencia será de segundo orden, ingresamos 2 polos reales.

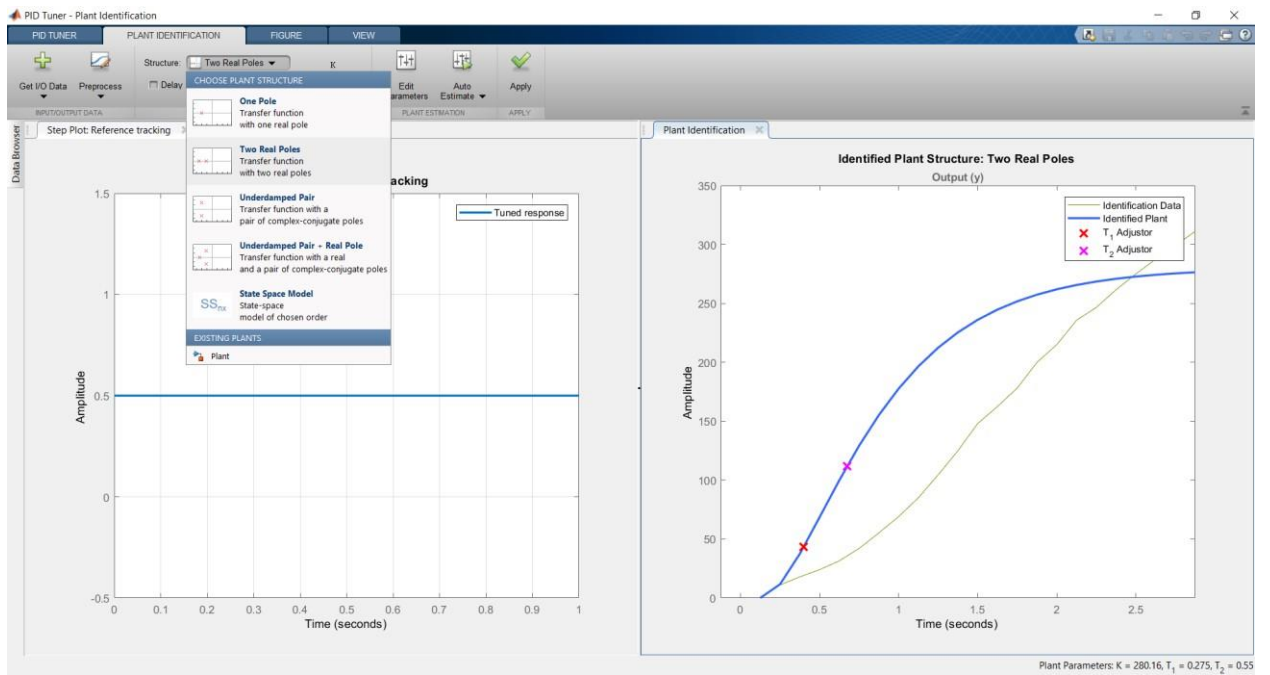


Figura 3.1.11 Selección de un par de polos reales para la función de transferencia

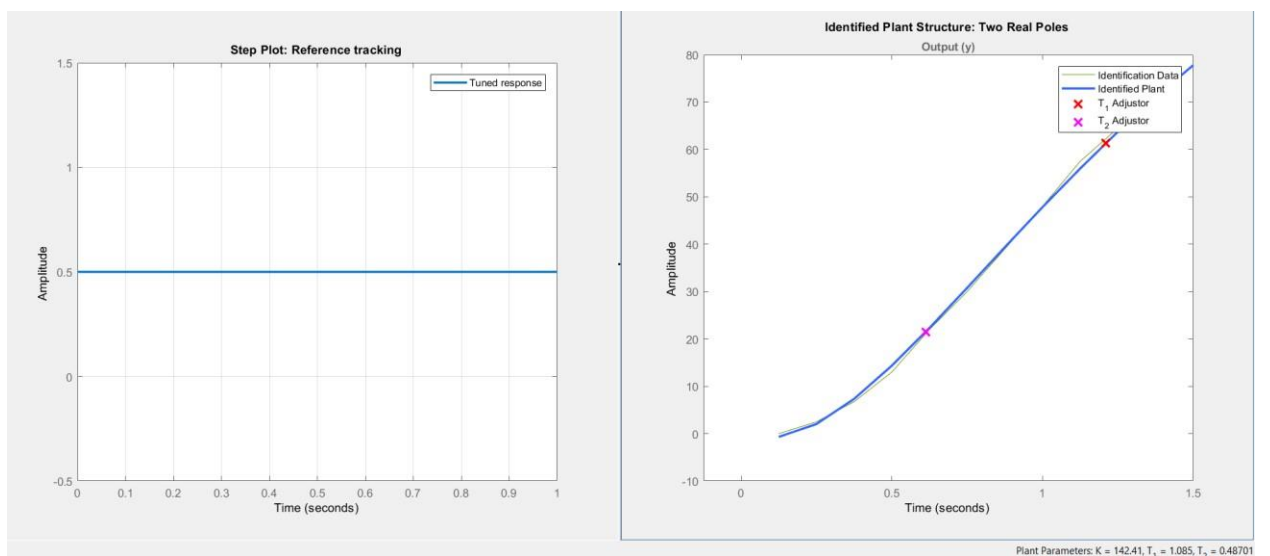


Figura 3.1.12 Estimación automática de la función de transferencia

$$\frac{Md(s)}{If(s)} = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

$$\frac{Md(s)}{If(s)} = \frac{142.41}{(1.085s + 1)(0.48701s + 1)} \quad (3.1.8)$$

### 3.2 Simulación del modelo matemático del control de tensión.

Con los modelos matemáticos encontrados de los diferentes subsistemas, comprobamos el correcto comportamiento de cada uno de ellos, simulándolos en MatLab.

### 3.2.1 Simulación del subsistema motor DC y velocidad lineal

Los valores reales de las constantes del motor dc las obtenemos de los datos del fabricante de la máquina, y los declaramos en el archivo matlab como sigue en la figura 3.2.1.

```

% %Variables del motor DC
km=8; % constante de la corriente al torque
kb=0.1; % constante del voltaje a la velocidad angular*km
La=0.9; %[H] inductancia de la armadura
Ra=2; %[ohm] resistencia de armadura
J=0.3; %[kg.m2] inercia del motor
B=0.01; %[N.m/rad/sec] Viscosidad y coeficiente de fricción del motor DC
Vnominal=240; %[Volts] voltaje nominal del motor
kt=1;
kc=1;

```

Figura 3.2.1 Declaración de valores de las constantes del motor DC

Implementamos el modelo matemático de la ecuación 3.1.3 en Simulink.

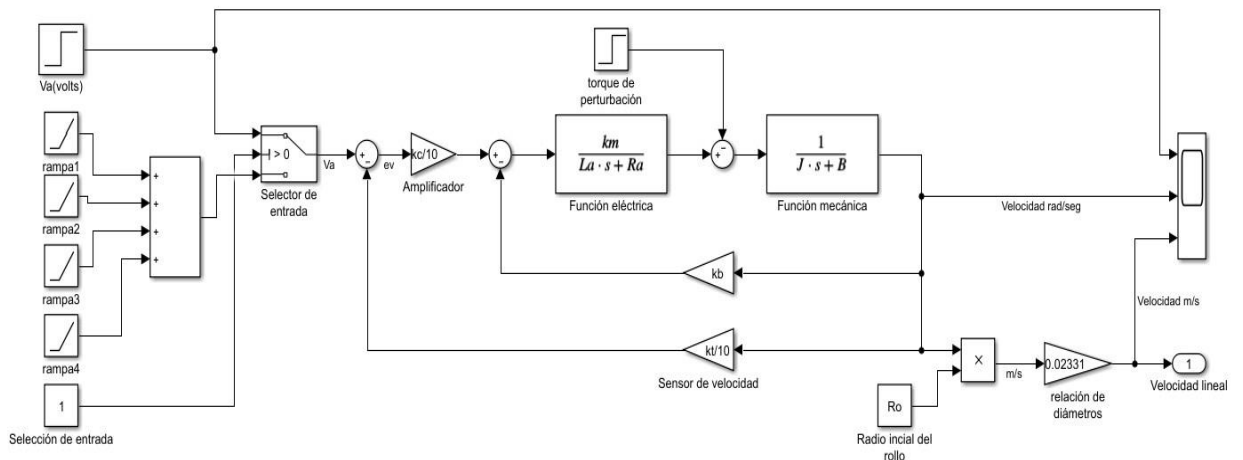
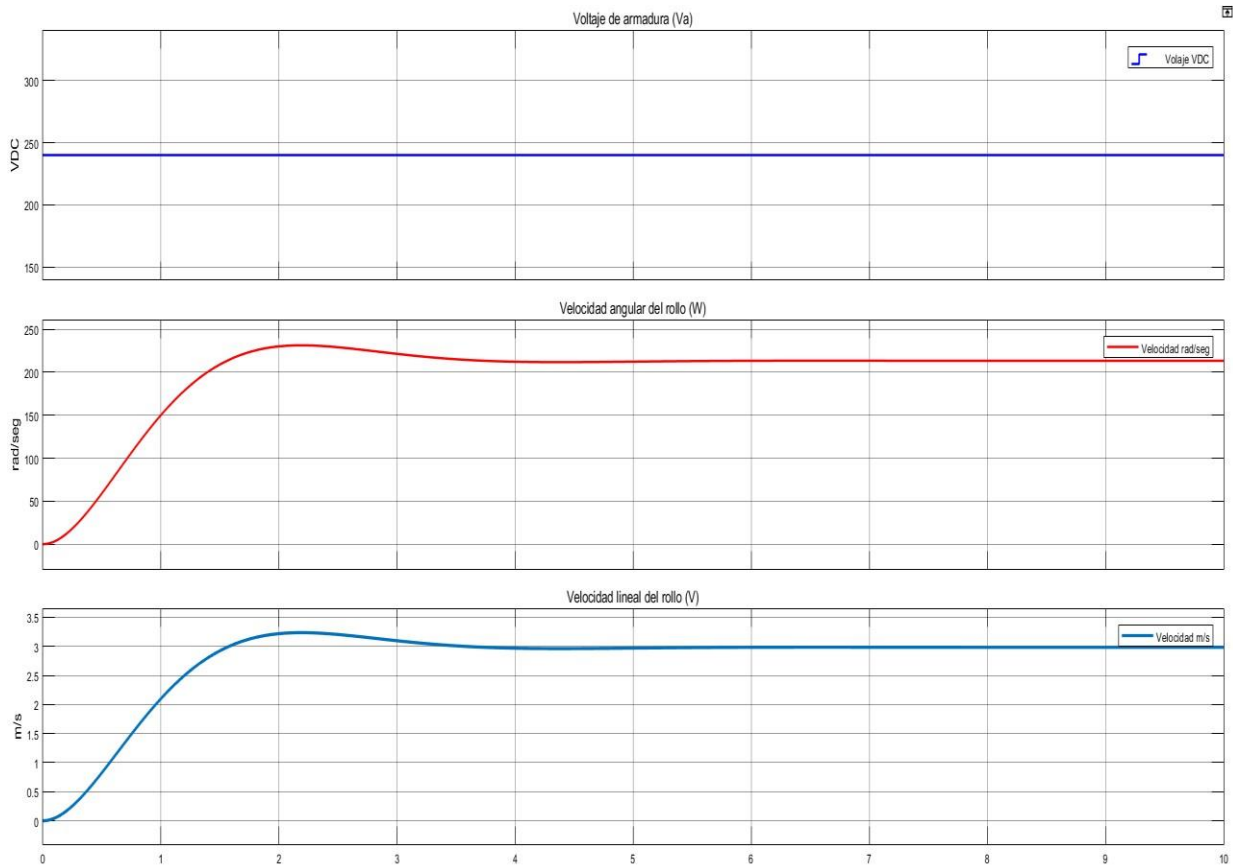


Figura 3.2.2 Motor DC controlado por armadura y salida de velocidad lineal V del rollo D

En la figura 3.2.2 se muestra el modelo de un motor DC controlado por armadura, teniendo como entrada el voltaje suministrado a la armadura y como salida la



velocidad angular; además se tiene la conversión de velocidad angular a velocidad lineal según la ecuación 3.1.4.

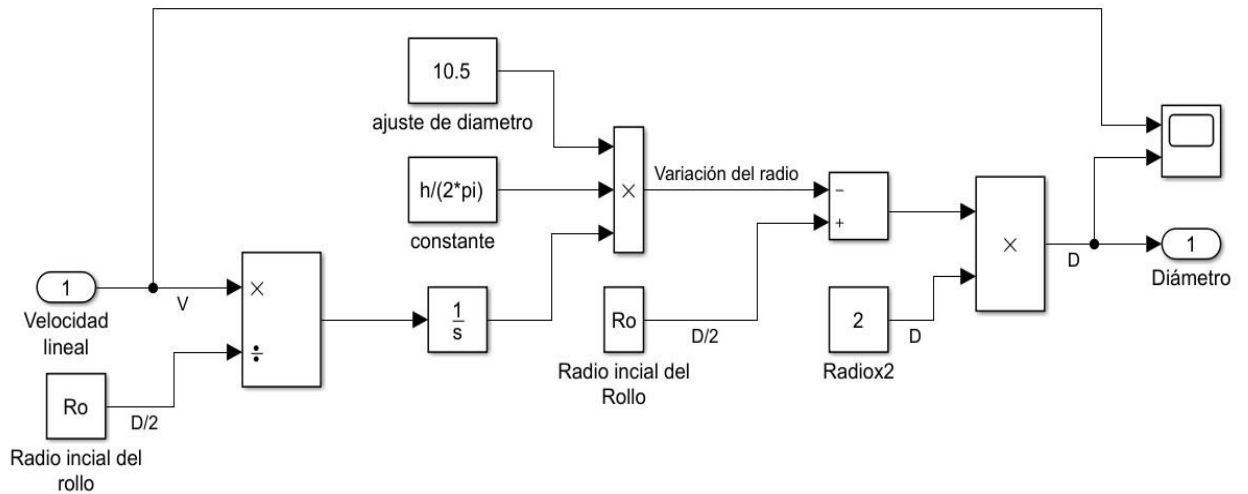


**Figura 3.2.3 Respuesta a una entrada escalón del subsistema motor DC y velocidad lineal del rollo**

En la figura 3.2.3 se muestra la respuesta al escalón de un motor DC y velocidad lineal del rollo, en la gráfica superior se muestra el voltaje de alimentación al motor, con 240VDC; la respuesta de la velocidad angular es subamortiguada y se estabiliza en aproximadamente 213 rad/seg; por otro lado la respuesta de la velocidad lineal es similar a la de la velocidad angular debido a que la conversión entre la velocidad angular y velocidad lineal es lineal, y se estabiliza en aproximadamente 3m/s.

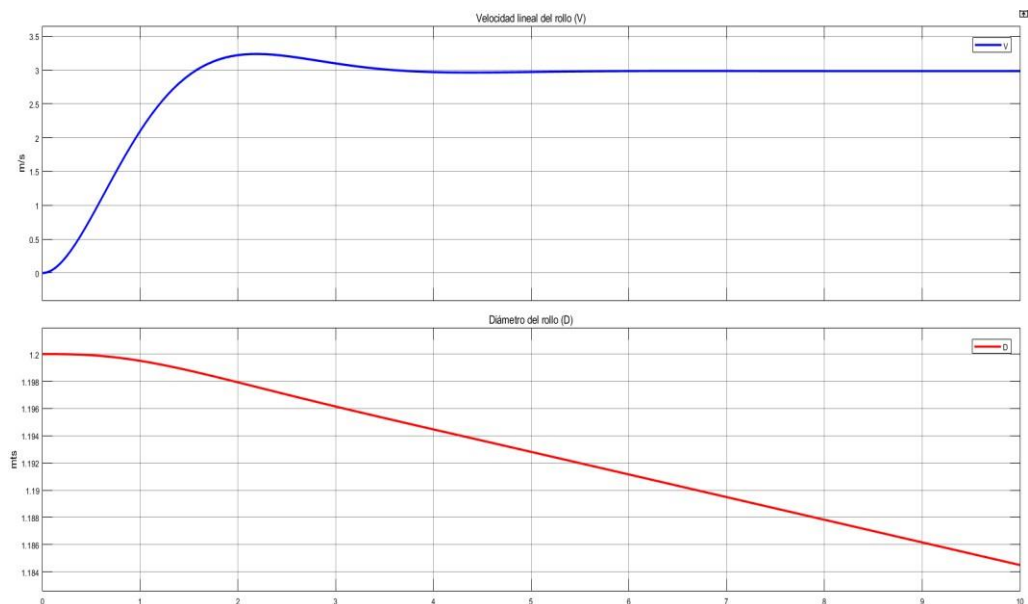
### 3.2.2 Simulación del subsistema diámetro de rollo

De la ecuación 3.1.6 modelamos nuestro subsistema teniendo como entrada la velocidad lineal y como salida el diámetro del rollo.



**Figura 3.2.4 Simulación del subsistema diámetro del rollo (D)**

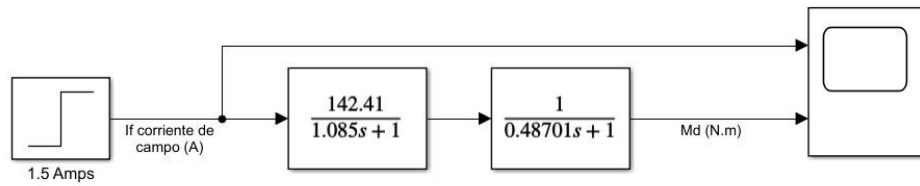
En la figura 3.2.4 se observa la simulación del subsistema del diámetro del rollo, teniendo como entrada la velocidad lineal y el radio inicial del rollo.



**Figura 3.2.5 Respuesta del subsistema diámetro del rollo (D)**

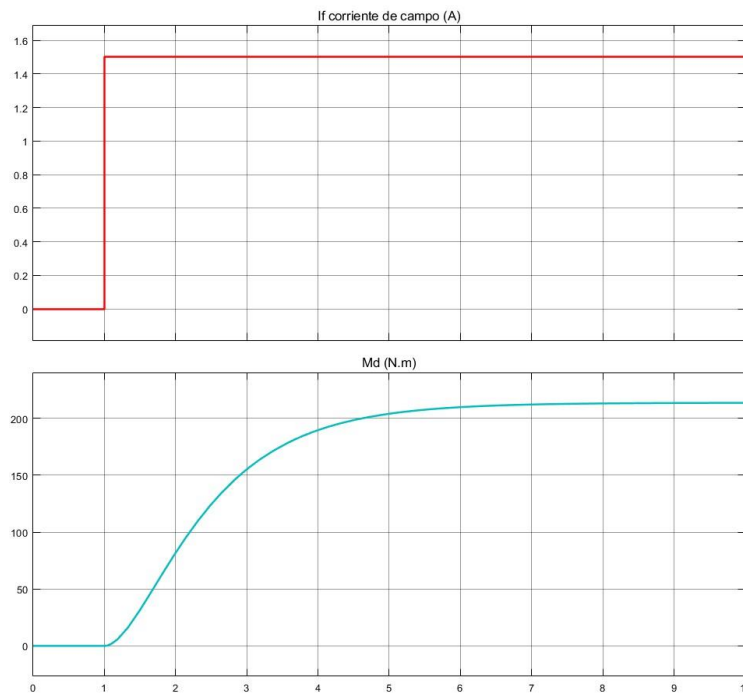
En la figura 3.2.5 se muestra como el diámetro del rollo va decreciendo conforme la velocidad lineal sigue avanzando, es decir el rollo no deja de desbobinarse. El sistema se estabiliza en aproximadamente 3.5 segundos y el sobrenivel porcentual es 8%.

### 3.2.3 Simulación del subsistema freno magnético de partículas



**Figura 3.2.6 Subsistema freno magnético de partículas  $M_d$  vs  $I_f$**

En la figura 3.2.6 se observa la simulación de la ecuación 3.1.8 del subsistema freno magnético de partículas, teniendo como entrada la corriente de excitación y como salida en torque de frenado.



**Figura 3.2.7 Corriente de entrada y torque de frenado**

En la figura 3.2.7 se observa como al corriente de entrada  $I_f$  controla el comportamiento de la señal de salida del freno magnético de partículas que es el torque de salida  $M_d$ , se ve un comportamiento de un sistema de segundo orden.

### 3.2.4 Simulación del subsistema desenrolladora

Declaramos el valor de las constantes y valores iniciales para el subsistema de la desenrolladora; los cuales fueron dados por el operador de la máquina y otros son datos del proceso.

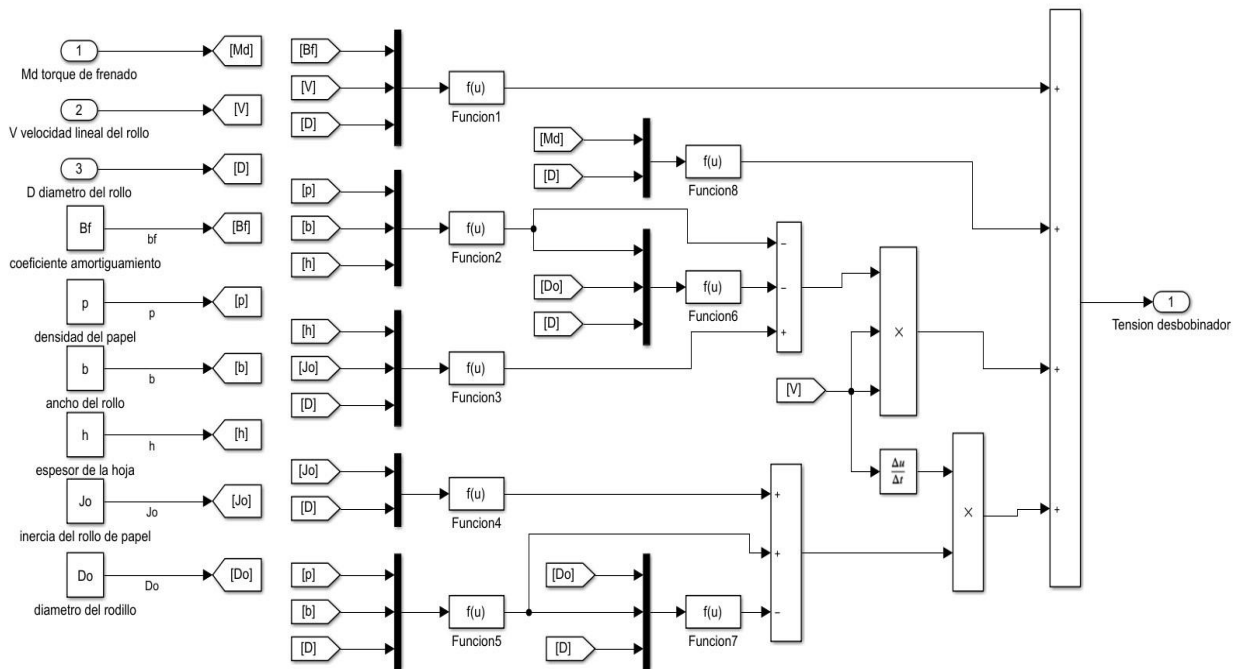
```

%% Variables de la desenrolladora
V=3; %m/s
Do=0.2; %mts
Jo=5; %Kg.m2
b=0.482; %mts
h=0.0001; %m
p=500; %Kg/m3
Bf=0.2; %N.m.s
D=1.2; %mm diametro inicial de la bobina
Ro=0.6; %[mts] radio inicial de rollo

```

**Figura 3.2.8 Valores de las constantes del subsistema desenrolladora**

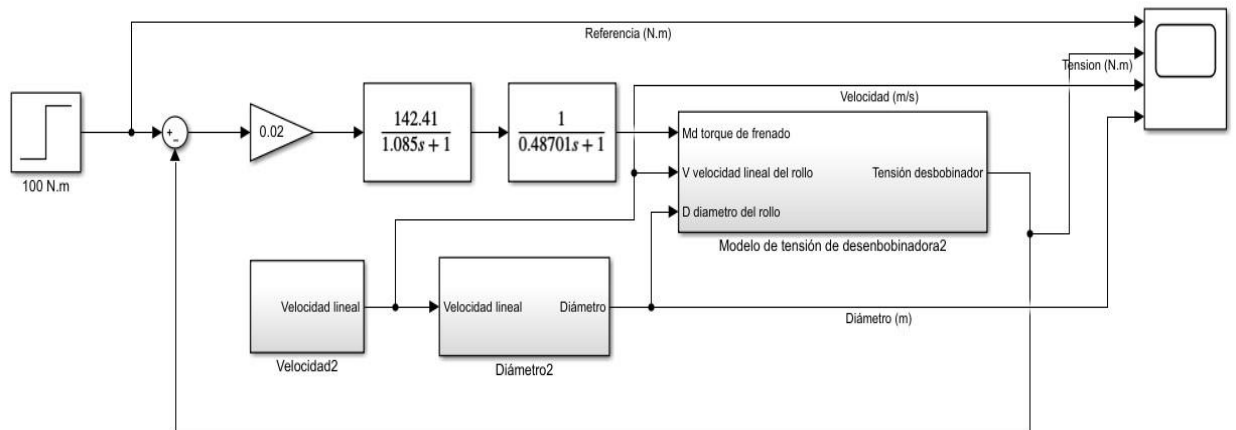
A partir de la ecuación 3.1.2, implementamos nuestro subsistema en Simulink.



**Figura 3.2.9 Subsistema desenrolladora en Simulink**

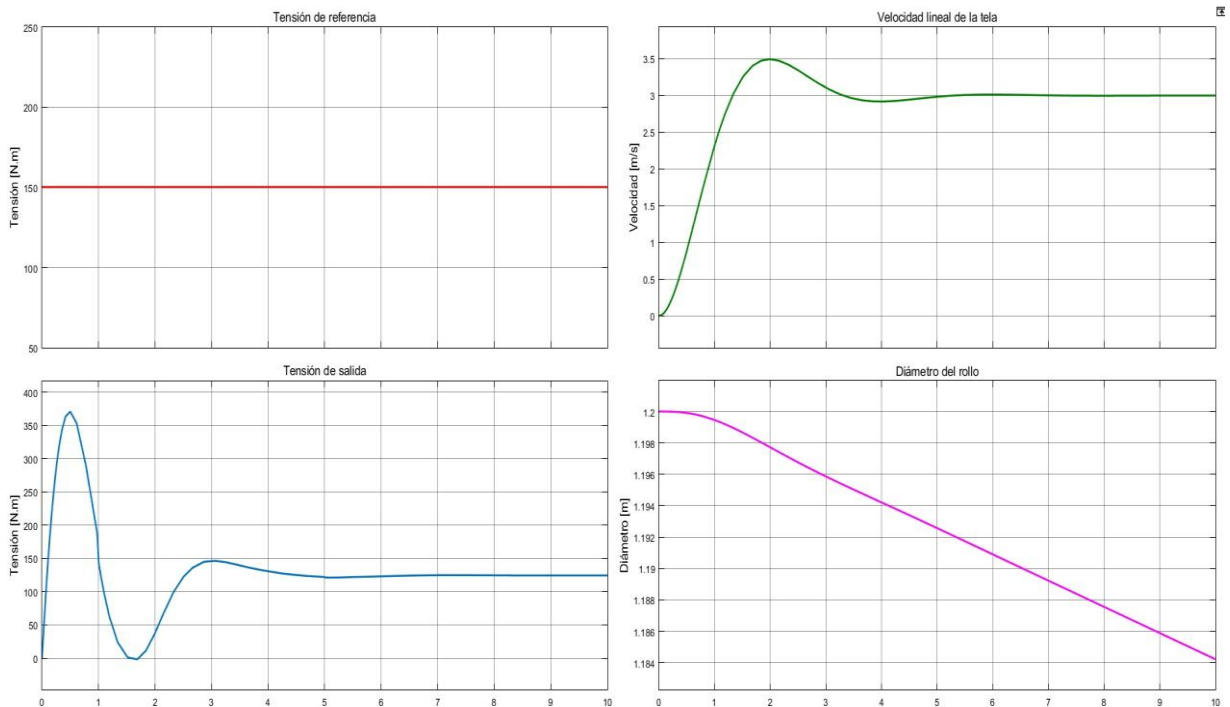
### 3.3 Pruebas de seguimiento del modelo matemático del proceso de producción de pañales

En este capítulo integramos todos los subsistemas y cerraremos el lazo, y vemos cómo se comporta el sistema en lazo cerrado sin controlador, más que un escalador proporcional.



**Figura 3.3.1 Modelo matemático del proceso de una máquina desenrolladora de tela para fabricación de pañales**

En la figura 3.3.1 se muestra el diagrama de bloques del modelo matemático de la desenrolladora de tela, se evidencian 3 bloques tipo subsistema, el bloque Velocidad2, el bloque Diámetro2 y el bloque Modelo de tensión de desenbobinadora2, el bloque de Velocidad 2, nos da la velocidad lineal del rollo, que es el mismo que el de la tela, la velocidad depende del voltaje de armadura que para nuestro caso es 240 VDC; el bloque de Diámetro 2, toma como entrada la velocidad lineal del motor DC y como salida entrega el diámetro del rollo que va disminuyendo con el correr del desbobinado; el tercer bloque contiene el modelo de tensión del desbobinado, y se basa en la ecuación 3.1.2, teniendo como entradas el torque de frenado, la velocidad lineal del rollo y el diámetro del rollo; las 2 funciones de transferencias mostradas en la figura 3.3.1 son las funciones de transferencia de freno magnético de partículas; además se realizó una realimentación de ganancia uno, con el fin de ver la respuesta del sistema en lazo cerrado.



**Figura 3.3.2 Referencia de tensión de la tela vs salida de tensión de la tela en una máquina desenrolladora de tela de pañales**

En la gráfica 3.3.2 se observan las respuestas de los distintos subsistemas encontrados a lo largo de este capítulo, esto frente a una señal de referencia de la tensión que depende del tipo de pañal a fabricar, con una referencia de 100 N.m se obtiene a la salida una tensión de 121 N.m, con un tipo de respuesta de un sistema de segundo orden subamortiguado; para las demás salidas como son velocidad lineal y diámetro del rollo el análisis se lo realizó con la gráfica respectiva.

### 3.4 Simulación del controlador PID y del controlador inteligente de tensión

En este capítulo diseñamos 2 tipos de controladores, uno el PID como actualmente se encuentra implementado, pero sintonizados mediante MatLab, el otro controlador será el controlador inteligente propuesto en este tema.

El tipo de controlador inteligente usado, se escoge según lo visto en capítulos y subcapítulos anteriores, partiendo que nuestro sistema es no lineal y actualmente cuenta con un controlador PID sintonizado de manera manual según el expertiz de los operadores o jefe de producción. Al controlador actual PID se adapta un

controlador fuzzy de mejor respuesta a sistemas no lineales, haciendo un sistema de control compuesto.

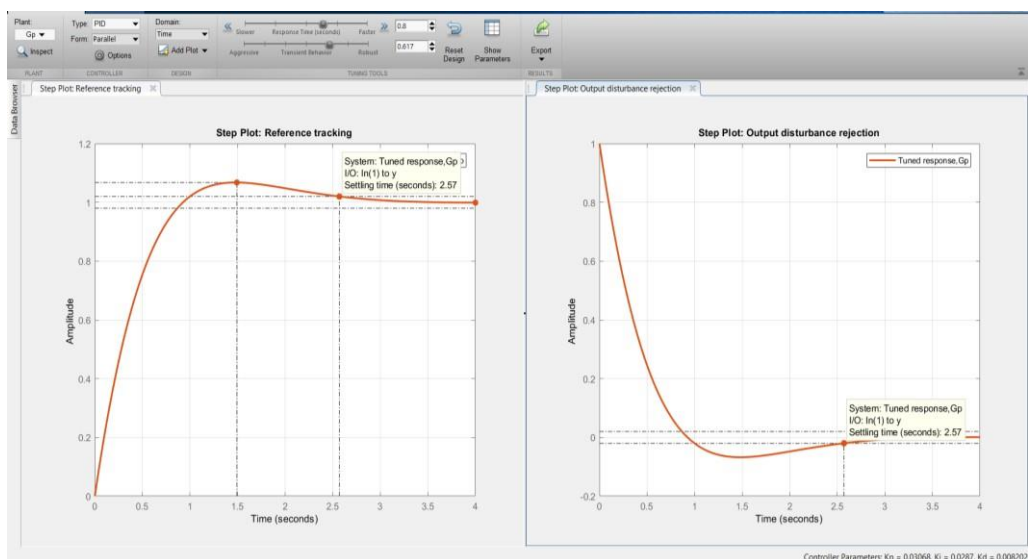
### 3.4.1 Diseño y simulación de un controlador PID

Para el diseño del controlador PID vamos a usar la herramienta “*pidTuner*” de MatLab, y vamos a usar como planta nuestro subsistema freno magnético, debido a que es el freno magnético quien controla principalmente la tensión de la tela por medio de la variación en su torque de frenado, los otros valores que son la velocidad lineal de la tela, que es también la velocidad de producción se mantiene aproximadamente constante y nuestro estudio no considera control de voltaje de armadura para poder controlar la velocidad de la desenrolladora; el diámetro del rollo por su parte es consecuencia de la velocidad lineal, y se aplica el mismo criterio; quedando que nuestra variable a controlar es el torque de frenado  $Md$  del subsistema freno magnético de partículas.

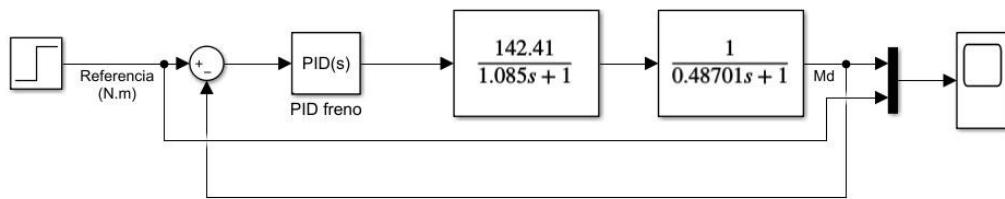
En Matlab ingresamos la función de transferencia y luego llamar al *pidTuner*.

```
Gp1=tf([142.41],[1.085,1]);  
Gp2=tf([1],[0.48701,1]);  
Gp=Gp1*Gp2;
```

**Figura 3.4.1 Sentencias para crear la función de transferencia freno magnético**



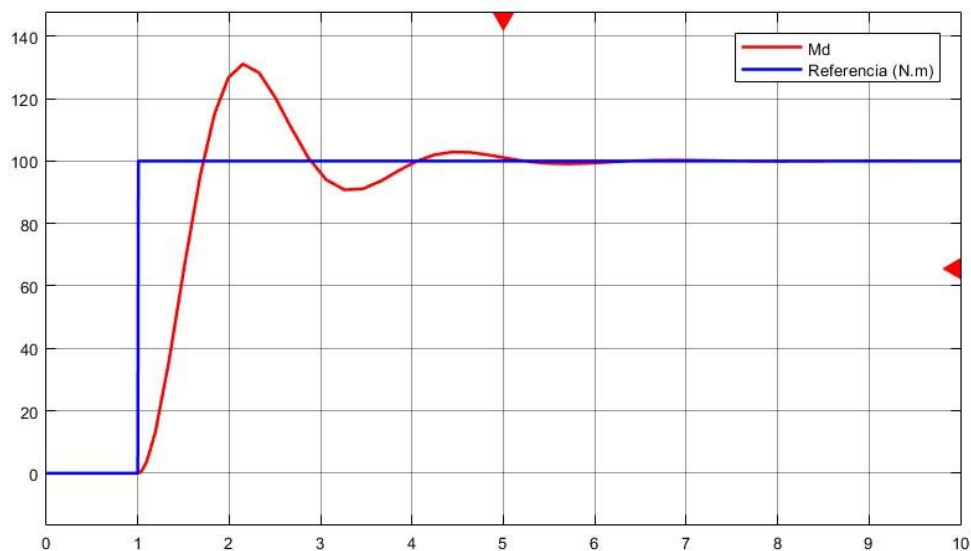
**Figura 3.4.2 Interfaz PID Tuner para sintonización del controlador**



**Figura 3.4.3 Implementación del controlador PID en el subsistema freno magnético**

Source:	internal
Proportional (P):	0.0307
Integral (I):	0.0293
Derivative (D):	0.00782
Filter coefficient (N):	0
Select Tuning Method:	Frequency Response Based
	Tune...

**Figura 3.4.4 Parámetros Kp, Ki, Kd**



**Figura 3.4.5 Respuesta al escalón del sistema freno magnético con controlador PID**

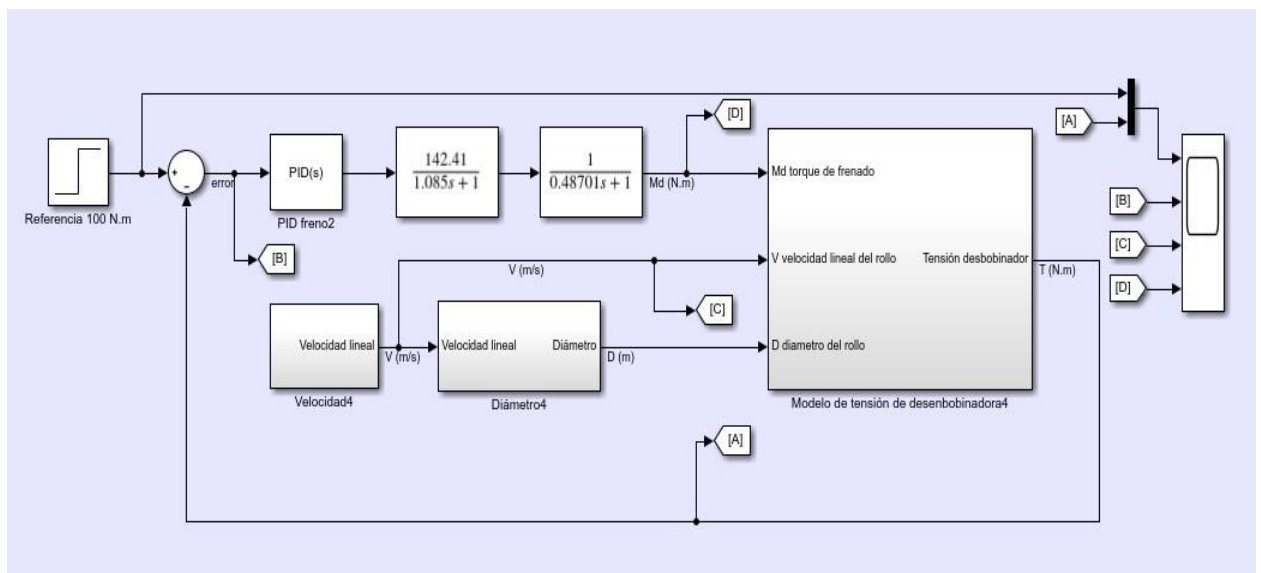
La figura 3.4.5 se muestra la respuesta del subsistema freno magnético con un controlador PID luego de sintonizar el controlador variando cada una de sus ganancias, y después de usar el auto tuning, se escogió el controlador que muestra la mejor respuesta, es decir menor tiempo de estabilización, menor sobrenivel porcentual y mejor acercamiento al set point.



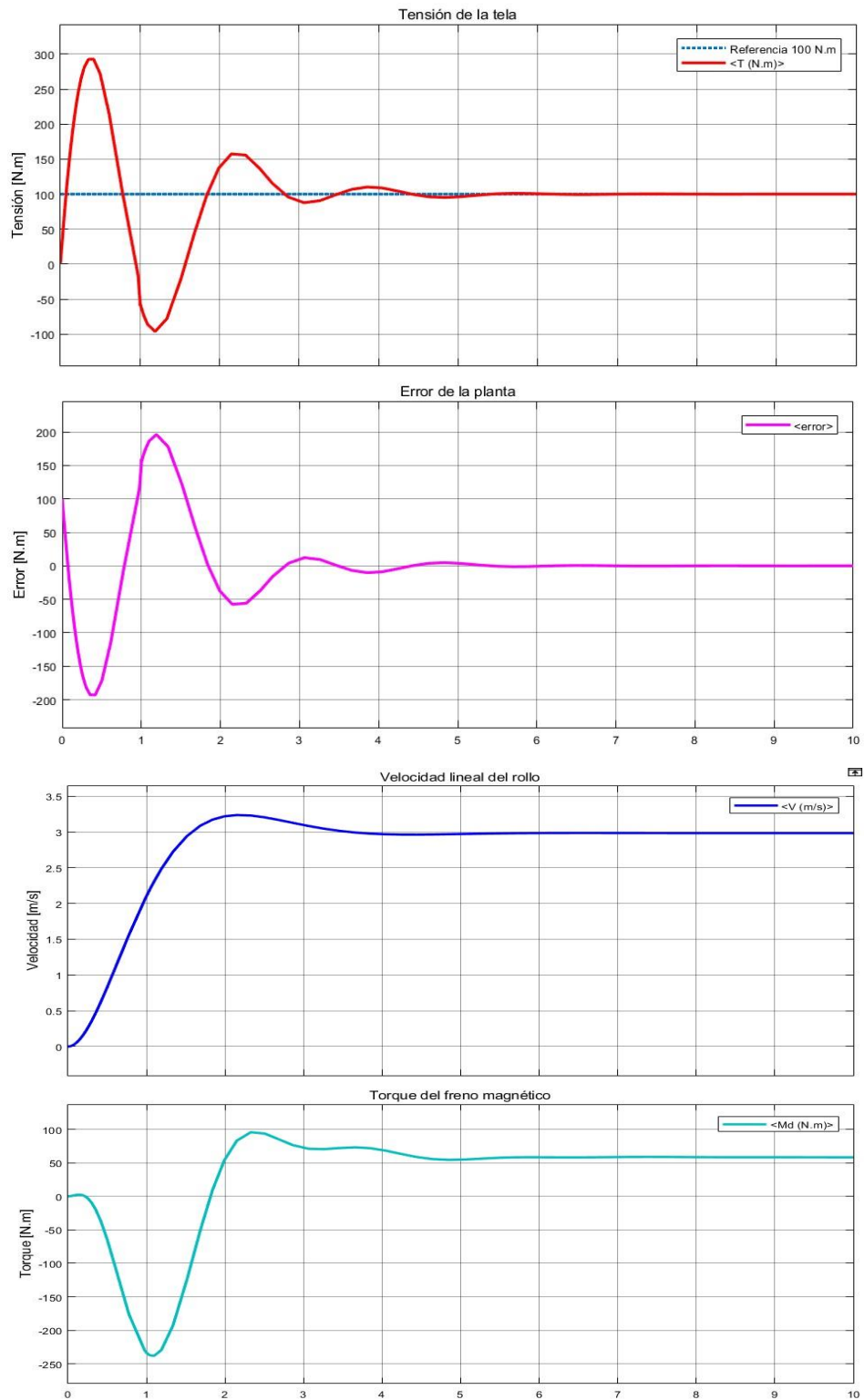
Es importante señalar que si bien el controlador PID fue encontrado con el subsistema freno magnético de partículas es aplicable agregarlo a la planta, por las razones expuestas anteriormente, al inicio del capítulo 3.4.1.

Una vez verificado el funcionamiento de nuestro controlador PID, en la figura 3.4.6 se puede ver la implantación de este controlador en nuestra planta, y se busca graficar la señal de referencia, la tensión de la tela, el error, la velocidad lineal del rollo y el torque de frenado del freno magnético.

Como en un sistema común el error es la entrada del controlador y el controlador actúa sobre la planta, en nuestro caso ingresa primero al bloque de freno magnético, ya que como vimos anteriormente la tensión de la tela se la ajusta con el toque del freno magnético.



**Figura 3.4.6 Implementación del controlador PID en la planta**



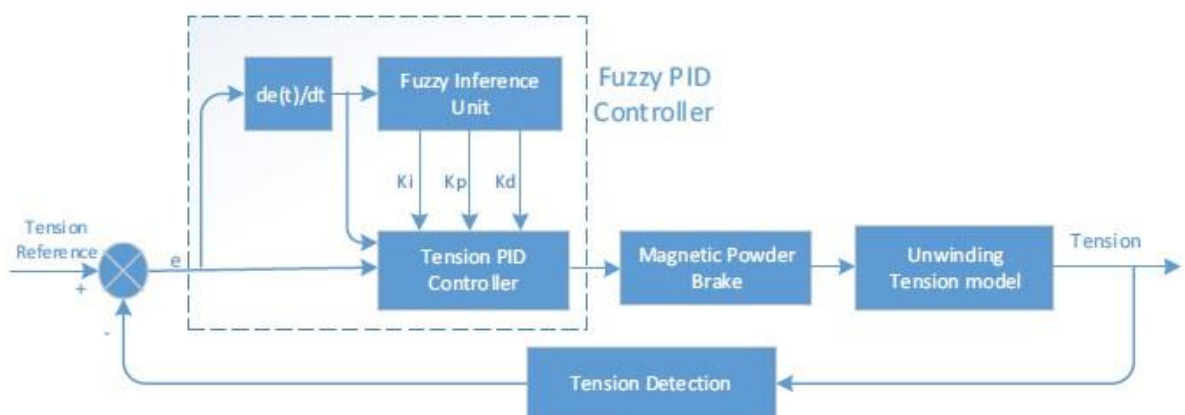
**Figura 3.4.7 Respuesta al escalón de nuestra planta con controlador PID**

En la figura 3.4.7 se muestran cuatro gráficos, el primero es la señal de referencia de tensión de la tela junto con la gráfica de la tensión de salida y se observa que el sistema

alcanza el estado estable aproximadamente a los 4 segundos, tiene un sobrenivel porcentual de casi 300% y un error en estado estacionario de casi cero. En la segunda gráfica se muestra el error que se tiene entre la señal de referencia y la señal real a la salida, se nota que el error crece negativamente a medida que la señal de salida aumenta positivamente, es decir se aleja de la referencia y viceversa, esto se mantiene hasta alcanzar el estado estable donde el error es prácticamente cero. En la tercera gráfica la velocidad lineal del rollo con su respuesta subamortiguada con un sobrenivel porcentual del 8%; finalmente la cuarta gráfica muestra la respuesta del freno magnético que tiene un comportamiento muy parecido al error, pero con un retardo cercano a 0.5 segundos, además si comparamos la respuesta de la figura 3.3.2 con la 3.4.7 que son sistema en lazo cerrado con ganancia fija frente a sistema en lazo cerrado con controlador PID, vemos que en el primero no se alcanza la referencia, mientras que en el segundo se alcanza la referencia, demostrando la eficacia del controlador PID, además el freno magnético estabiliza su torque en un valor cercano a los 50N.m.

### 3.4.2 Diseño y simulación del controlador lógico PID Difuso

En la figura 3.4.8 se muestra en bloques el proceso del controlador desarrollado



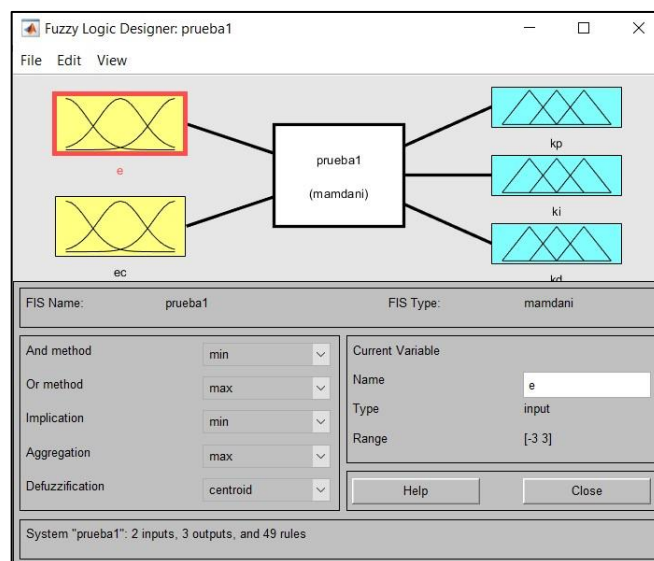
**Figura 3.4.8 Diagrama del sistema de control de tensión de una desenrolladora. [11]**

El controlador Fuzzy fue construido con la herramienta “Fuzzy Logix ToolBox”, con esto se editaron los valores de inferencia del sistema, de igual manera el número de entradas

y salidas, funciones de membresía, y sus reglas, el método de defusificación también es definido con esta herramienta.

En la figura 3.4.9 se observa que se usó el método de mínimos y máximos, la agregación también es mínimos y máximos, la defusificación es centroide. En la figura 3.4.10 se muestra las funciones de membresía de las variables de entrada error (e) y derivada del error (ec). La figura 3.4.11 muestra la función de membresía de las variables de salida: kp, ki y kd. En la figura 3.4.12 se observan las reglas de membresía del controlador difuso; en la figura 3.4.13 se muestra la implementación del controlador Difuso PID.

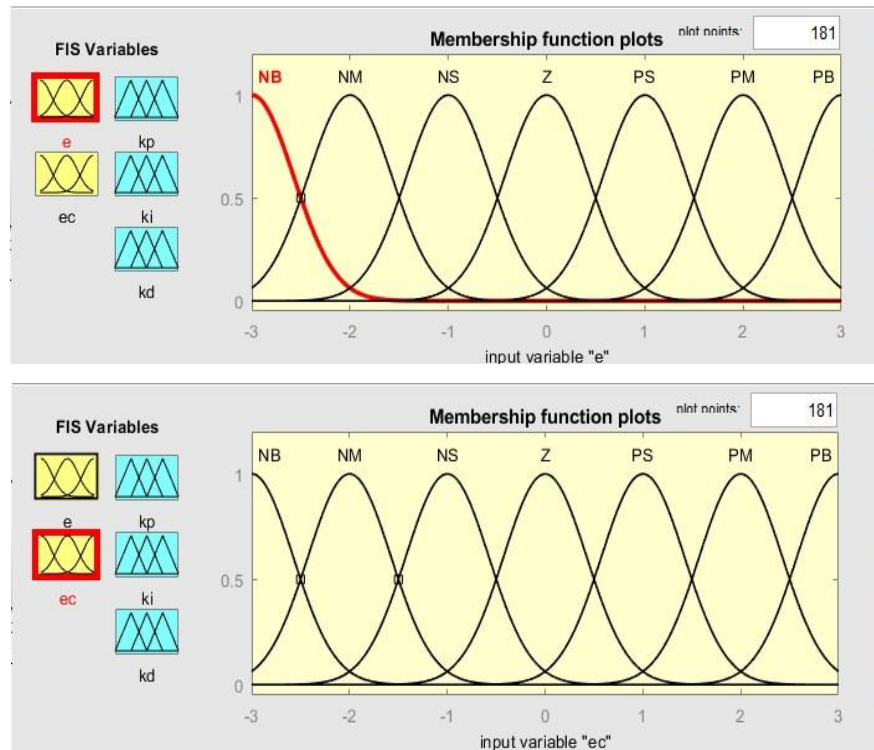
Llamamos a la función “fuzzy” desde el Command Window.



**Figura 3.4.9 Controlador en fuzzy logic designer**

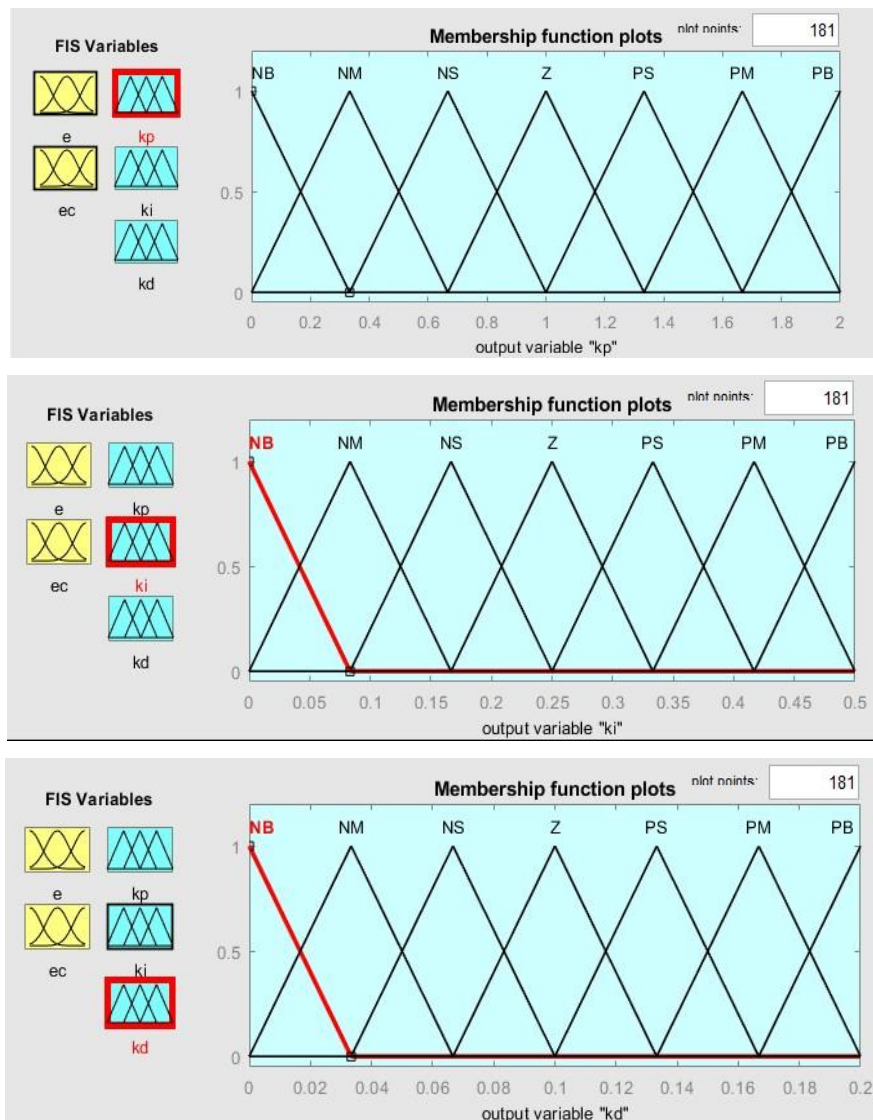
En la figura 3.4.9 se observa que las entradas son el error y la derivada del error, tal como lo ilustra la figura 3.4.8; siendo las salidas las ganancias kp, ki, kd que serán usadas en nuestro controlador PID. El método usado para hallar el controlador es el método de Mamdani, por el motivo que nuestro sistema se basa en un conjunto de reglas según la experiencia del operador de la máquina, la inferencia usada es la de máximos y mínimos y el método de defusificación escogido es el centroide debido a que todos los valores del conjunto de inferencia son relevantes para nuestro proceso, no sólo los mismos, no sólo los máximos y

no nos interesa dividir la región en partes iguales, lo requerido es un tipo de ponderación equitativa según los valores de cada miembro del conjunto.



**Figura 3.4.10 Funciones de membresía de e y ec**

En la figura 3.4.10 se nota que para nuestras entradas e y ec se escoge un comportamiento tipo campana de Gauss con el fin de suavizar la curva, y sabiendo el error tiene este tipo de comportamiento de curva suavizada.



**Figura 3.4.11 Funciones de membresía de Kp, Ki, Kd**

En la figura 3.4.11 se observan las funciones de membresía  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  y éstas fueron de forma triangular por la necesidad de obtener respuesta más rápida del controlador.

Además, vemos que como lo indica el método de Mamdani se usaron 7 propiedades lingüísticas para el error:

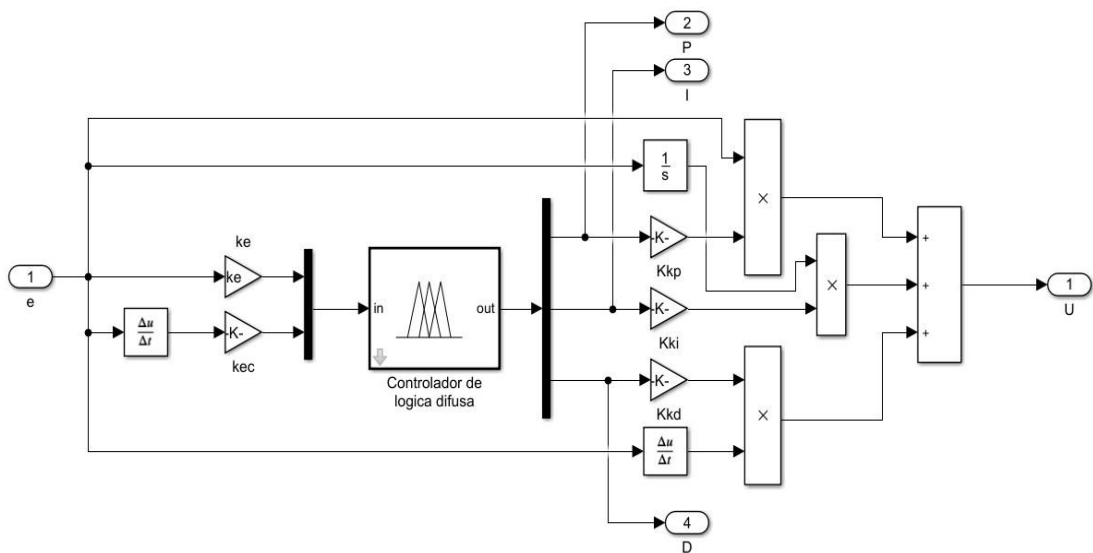
- Positivo grande (PB)
- Positivo mediano (PM)
- Positivo pequeño (PS)
- Cero (Z)
- Negativo grande (NB)
- Negativo mediano (NM)
- Negativo pequeño (NS)



1. If (e is NB) and (ec is NB) then (kp is PB)(ki is NB)(kd is PS) (1)
2. If (e is NB) and (ec is NM) then (kp is PB)(ki is NB)(kd is NS) (1)
3. If (e is NB) and (ec is NS) then (kp is PM)(ki is NM)(kd is NB) (1)
4. If (e is NB) and (ec is Z) then (kp is PM)(ki is NM)(kd is NB) (1)
5. If (e is NB) and (ec is PS) then (kp is PS)(ki is NS)(kd is NB) (1)
6. If (e is NB) and (ec is PM) then (kp is Z)(ki is Z)(kd is NM) (1)
7. If (e is NB) and (ec is PB) then (kp is Z)(ki is Z)(kd is PS) (1)
8. If (e is NM) and (ec is NB) then (kp is PB)(ki is NB)(kd is PS) (1)
9. If (e is NM) and (ec is NM) then (kp is PB)(ki is NB)(kd is NS) (1)
10. If (e is NM) and (ec is NS) then (kp is PM)(ki is NM)(kd is NB) (1)
11. If (e is NM) and (ec is Z) then (kp is PS)(ki is NS)(kd is NM) (1)
12. If (e is NM) and (ec is PS) then (kp is PS)(ki is NS)(kd is NM) (1)
13. If (e is NM) and (ec is PM) then (kp is Z)(ki is Z)(kd is NS) (1)
14. If (e is NM) and (ec is PB) then (kp is NS)(ki is Z)(kd is Z) (1)
15. If (e is NS) and (ec is NB) then (kp is PM)(ki is NB)(kd is Z) (1)
16. If (e is NS) and (ec is NM) then (kp is PM)(ki is NM)(kd is NS) (1)
17. If (e is NS) and (ec is NS) then (kp is PM)(ki is NS)(kd is NM) (1)
18. If (e is NS) and (ec is Z) then (kp is PS)(ki is NS)(kd is NM) (1)
19. If (e is NS) and (ec is PS) then (kp is Z)(ki is Z)(kd is NS) (1)
20. If (e is NS) and (ec is PM) then (kp is NS)(ki is PS)(kd is NS) (1)
21. If (e is NS) and (ec is PB) then (kp is NS)(ki is PS)(kd is Z) (1)
22. If (e is Z) and (ec is NB) then (kp is PM)(ki is NM)(kd is Z) (1)
23. If (e is Z) and (ec is NM) then (kp is PM)(ki is NM)(kd is NS) (1)
24. If (e is Z) and (ec is NS) then (kp is PS)(ki is NS)(kd is NS) (1)
25. If (e is Z) and (ec is Z) then (kp is Z)(ki is Z)(kd is NS) (1)
26. If (e is Z) and (ec is PS) then (kp is NS)(ki is PS)(kd is NS) (1)
27. If (e is Z) and (ec is PM) then (kp is NM)(ki is PM)(kd is NS) (1)
28. If (e is Z) and (ec is PB) then (kp is NM)(ki is PM)(kd is Z) (1)
29. If (e is PS) and (ec is NB) then (kp is PS)(ki is NM)(kd is Z) (1)
30. If (e is PS) and (ec is NM) then (kp is PS)(ki is NS)(kd is Z) (1)
31. If (e is PS) and (ec is NS) then (kp is Z)(ki is Z)(kd is Z) (1)
32. If (e is PS) and (ec is Z) then (kp is NS)(ki is PS)(kd is Z) (1)
33. If (e is PS) and (ec is PS) then (kp is NS)(ki is PS)(kd is Z) (1)
34. If (e is PS) and (ec is PM) then (kp is NM)(ki is PM)(kd is Z) (1)
35. If (e is PS) and (ec is PB) then (kp is NM)(ki is PB)(kd is Z) (1)
36. If (e is PM) and (ec is NB) then (kp is PS)(ki is Z)(kd is PB) (1)
37. If (e is PM) and (ec is NM) then (kp is Z)(ki is Z)(kd is NS) (1)
38. If (e is PM) and (ec is NS) then (kp is NS)(ki is PS)(kd is PS) (1)
39. If (e is PM) and (ec is Z) then (kp is NM)(ki is PS)(kd is PS) (1)
40. If (e is PM) and (ec is PS) then (kp is NM)(ki is PM)(kd is PS) (1)
41. If (e is PM) and (ec is PM) then (kp is NM)(ki is PB)(kd is PS) (1)
42. If (e is PM) and (ec is PB) then (kp is NB)(ki is NB)(kd is PB) (1)
43. If (e is PB) and (ec is NB) then (kp is Z)(ki is Z)(kd is PB) (1)
44. If (e is PB) and (ec is NM) then (kp is Z)(ki is Z)(kd is PM) (1)
45. If (e is PB) and (ec is NS) then (kp is NM)(ki is PS)(kd is PM) (1)
46. If (e is PB) and (ec is Z) then (kp is NM)(ki is PM)(kd is PM) (1)
47. If (e is PB) and (ec is PS) then (kp is NM)(ki is PM)(kd is PS) (1)
48. If (e is PB) and (ec is PM) then (kp is NB)(ki is PB)(kd is PS) (1)
49. If (e is PB) and (ec is PB) then (kp is NB)(ki is PB)(kd is PB) (1)

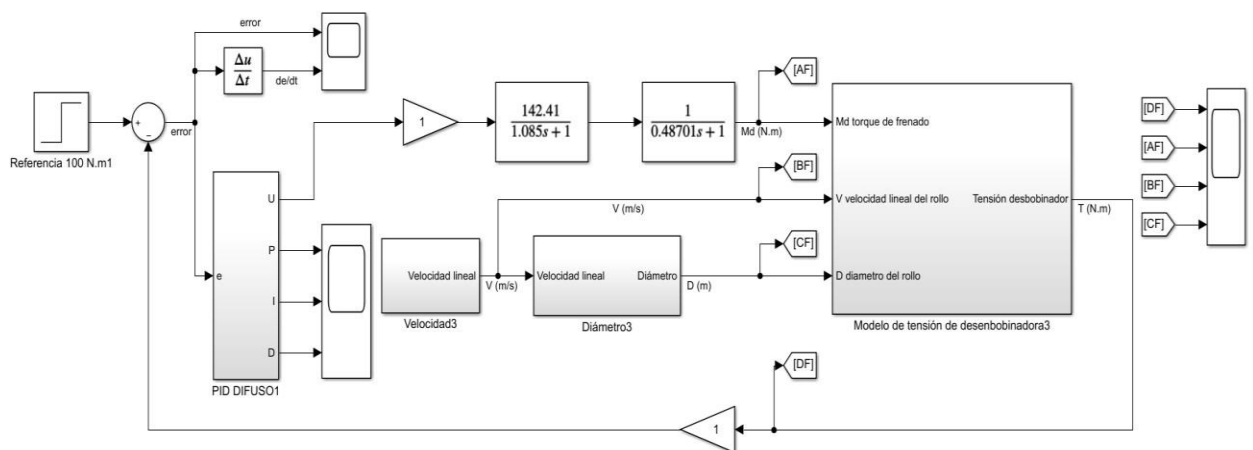
**Figura 3.4.12 Reglas de pertenencia de nuestro controlador difuso**

Las reglas de pertenencia de la figura 3.4.12 fueron definidas por conforme a la expectativa que se tenía del funcionamiento del controlador, por ejemplo, la regla 49 nos dice, si el error es PB y la derivada del error es PB, entonces  $k_p$  es NB para reducir el PB del error,  $k_i$  es PB para eliminar el error en estado estable y  $k_d$  es PB para disminuir el sobrenivel porcentual y el tiempo de estabilización.



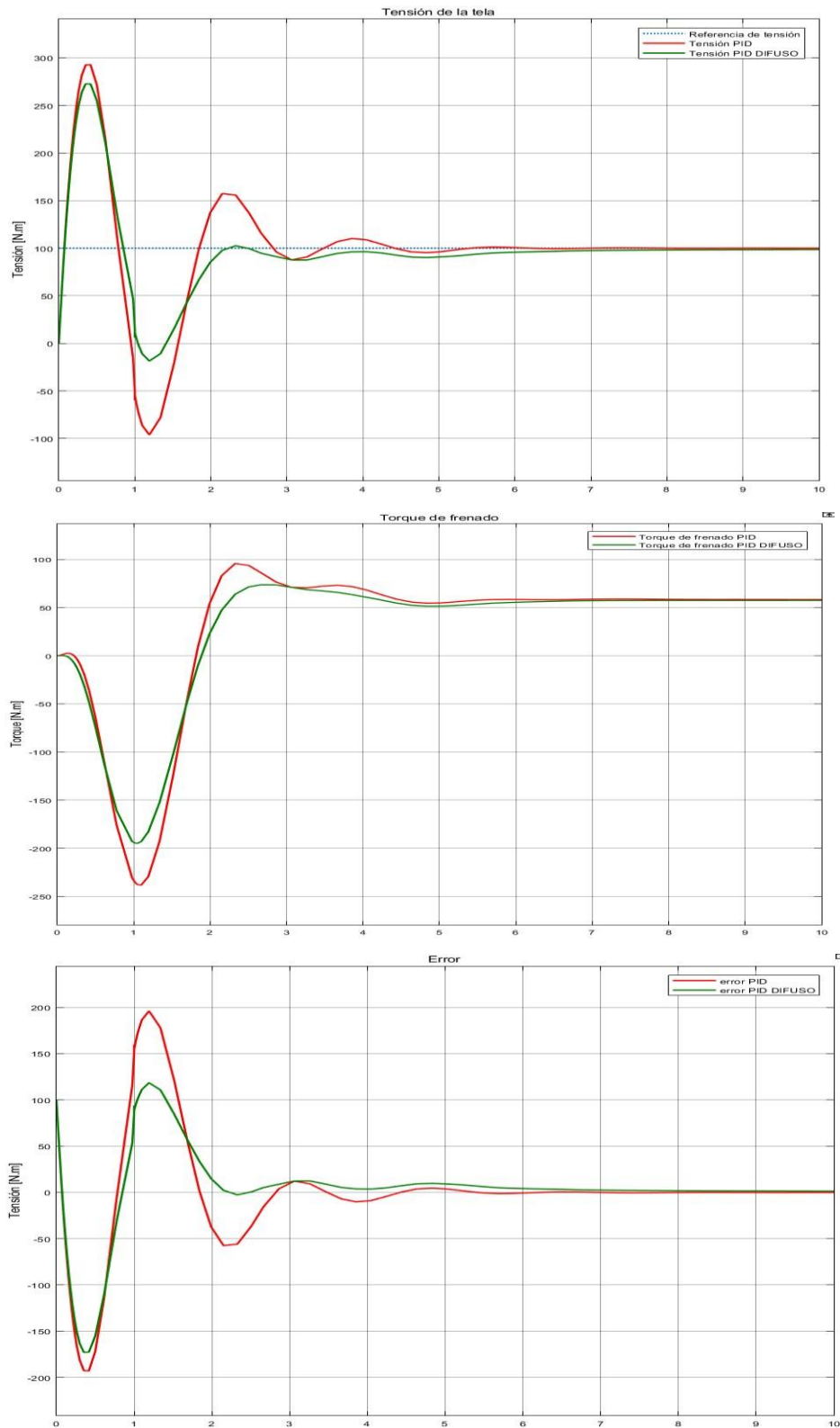
**Figura 3.4.13 Modelo de simulación del controlador difuso PID**

Donde  $k_e$  y  $k_{ec}$  son ganancias ajustables, para este caso ambas 0.3;  $K_{kp}$ ,  $K_{ki}$ ,  $K_{kd}$  son ganancias con los valores correspondientes del controlador PID del capítulo 3.4.1.



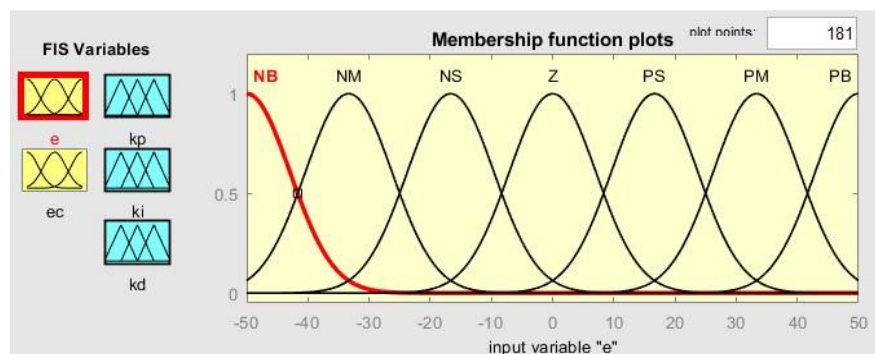


**Figura 3.4.14 Planta desenrolladora con controlador PID difuso**



**Figura 3.4.15 Respuesta al escalón del sistema desenrolladora con controlador PID difuso**

En la figura 3.4.15 se observa que el controlador PID difuso es mejor que el PID, primero en la gráfica de tensión de la tela, durante el arranque el controlador PID Difuso muestra menor oscilación, sus valores picos máximos y mínimos distan entre 50% y 60% del valor con respecto al controlador PID, logrando disminuir la elongación y posterior ruptura del material. De igual manera en la gráfica del torque de frenado se muestra que el freno magnético realiza menor esfuerzo cuando se usa el controlador PID Difuso, permitiendo alargar la vida útil de freno e indirectamente ahorro de energía. Por último, en la gráfica del error se observa que el controlador PID arroja un mayor error que el PID Difuso, llegando a superar en 100% en cierto momento en el arranque, esto ayuda a que el controlador genere un menor esfuerzo y recursos de procesamiento. Por lo antes expuesto, el uso del controlador PID difuso se justifica, sin embargo, se encuentra otro controlador PID difuso, modificando los rangos de sus entradas y salidas, además del tipo de salida pasando de triangular a gauss2mf, pero manteniendo las 49 reglas anteriores. Se asumió que era posible mejorar el controlador PID difuso actual porque la diferencia presentada con respecto al controlador PID si bien es notoria, no es lo esperado, por ello se analizó las curvas del error y se observa que el rango  $[-3,-3]$  es muy pequeño, por esa razón se lo aumenta a  $[-50,50]$  que son valores más aproximados a los obtenidos, tratando así de cubrir la mayor cantidad de posibilidades en la que el controlador pueda trabajar. Ver figura 3.4.16 y 3.4.17



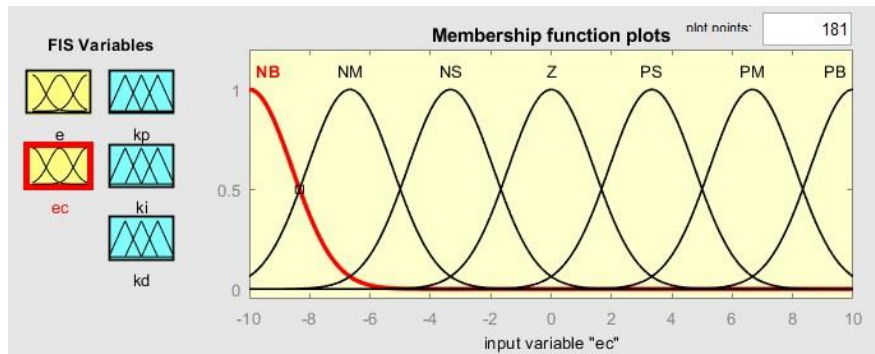


Figura 3.4.16 Funciones de membresía error y derivada del error 2

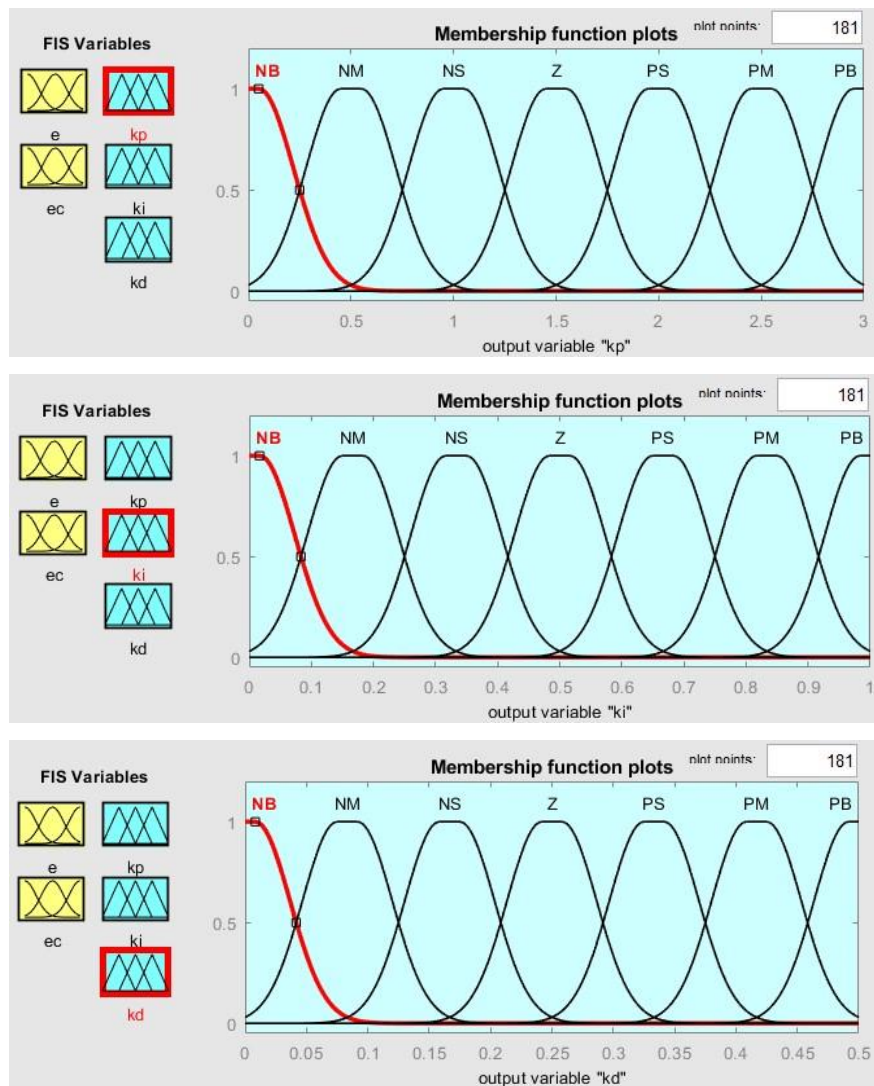
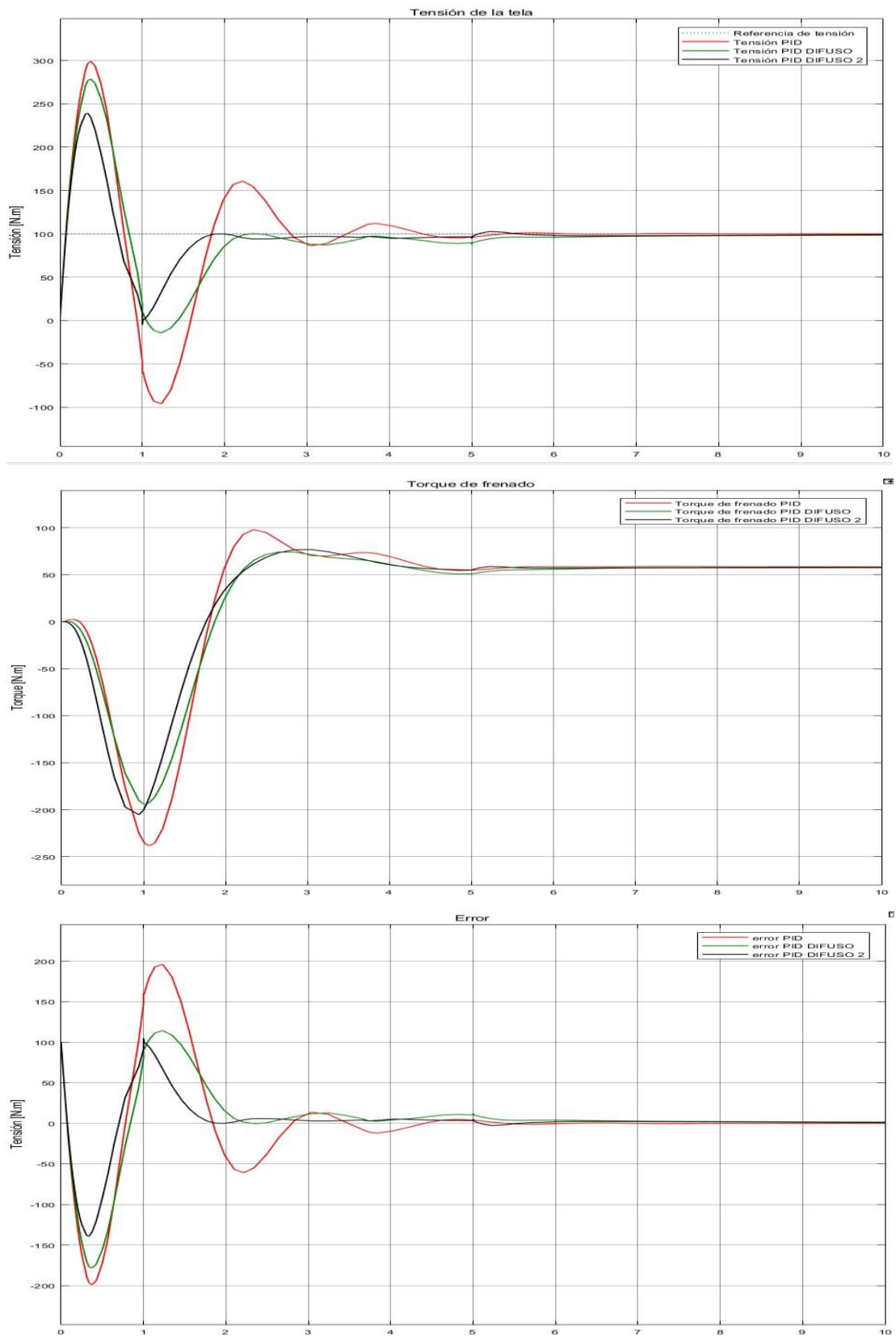


Figura 3.4.17 Funciones de membresía Kp, Ki, Kd 2



**Figura 3.4.18 Respuesta al escalón del sistema desenrolladora con controlador PID difuso 2**

Se observa que con las variaciones realizadas se pudo mejorar la respuesta del sistema a una entrada escalón, siendo este último el controlador el que mejor desempeño muestra, menor sobrenivel porcentual, menor oscilaciones, tanto en la tensión de salida, el torque del freno magnético y el error.

# CAPÍTULO 4

## 4. DISEÑO Y PRUEBAS DE INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA

En el presente capítulo se detallará la configuración de los componentes de automatización para regular de la tensión de la tela en la desbobinadora, empezando por la configuración del PLC que actuaría como controlador PID en el proceso, el enlace OPC para la comunicación entre el PLC y el diagrama de bloques en Simulink, y la configuración de una pantalla táctil para la implementación de una HMI para que los operadores de la planta puedan visualizar el comportamiento de la tensión.

### 4.1 Configuración del sistema

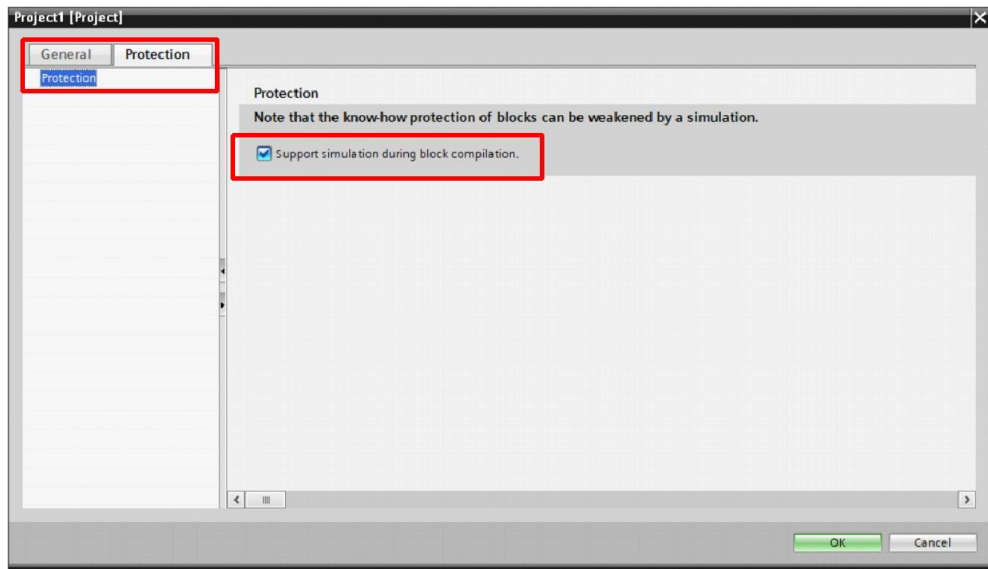
#### 4.1.1 Configuración de la plataforma de programación de PLC

Como primer paso en la plataforma TIA Portal, del fabricante Siemens, se seleccionó un PLC con las siguientes características principales:

- CPU de la familia S7-1500, con N/P 6ES7 516-3AN02-0BA0, cuya versión es la 2.8.
- Posee una pantalla para configuración, una memoria de trabajo de 1 MB para programa y 5 MB para datos.
- Posee dos puertos para comunicación Profinet y un puerto para comunicación Profibus DP.
- Capacidad de comunicarse vía OPC UA.

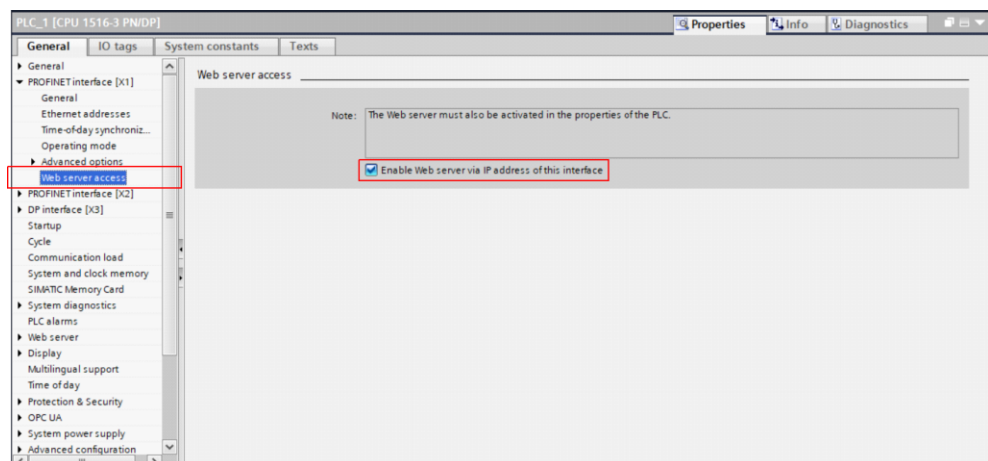
En las propiedades del proyecto creado, llamado “Proyecto1” en nuestro caso, se activó la opción de habilitar capacidad de simulación durante la compilación de bloques, como se indica en la figura 4.1.1. Esta opción se encuentra en la pestaña de protección del proyecto.

Se mantuvieron las características IP que vienen por defecto para el puerto Profinet X1, con una dirección IP 192.168.0.1 con una máscara de subred 255.255.255.0.



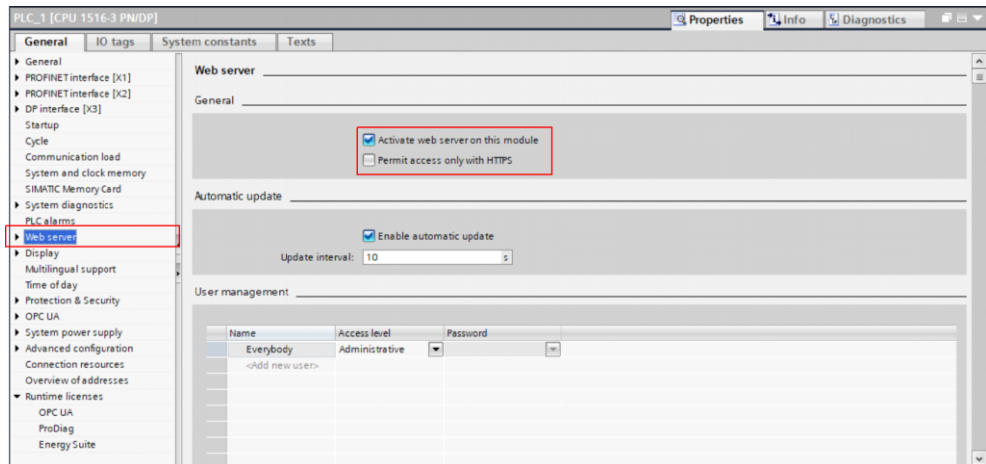
**Figura 4.1.1 Soporte de simulación al compilar bloques en TIA Portal**

Luego se habilitó al servidor Web, vía direccionamiento IP para la interfaz Profinet X1, como se indica en la figura 4.1.2, para monitorizar y administrar la CPU a través de una red.



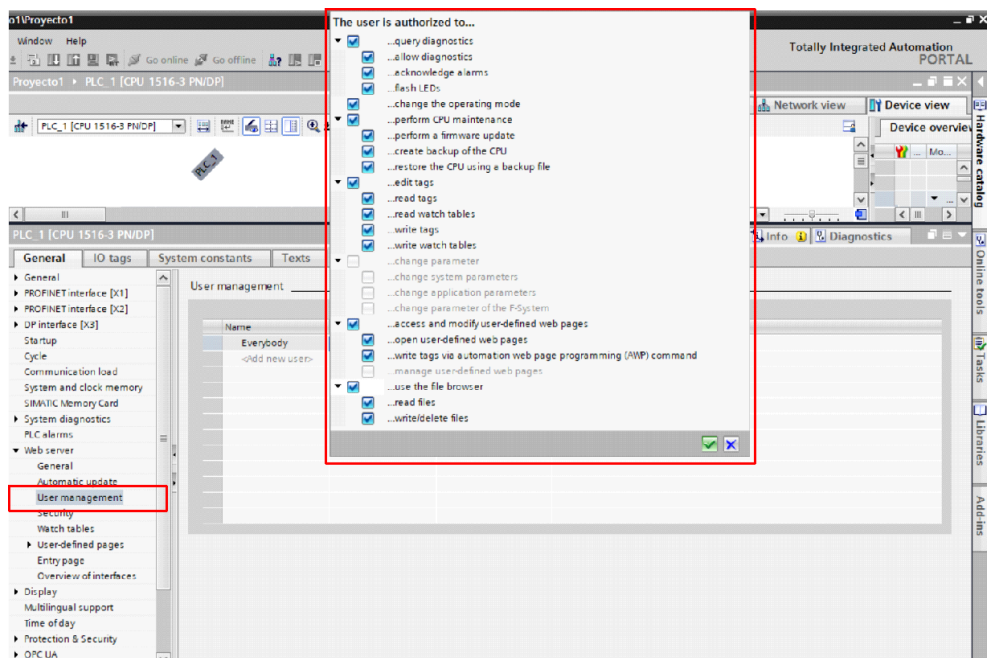
**Figura 4.1.2 Acceso de servidor Web para puerto Profinet X1**

De manera similar, se habilitó la opción de servidor Web, pero en este caso al PLC, y al mismo se deshabilitó el acceso HTTPS, como se indica en la figura 4.1.3, para que no haya un monitoreo por una página Web externa.



**Figura 4.1.3 Activación de servidor Web y acceso HTTPS**

Después en la gestión de usuarios en el PLC, se autorizó el diagnóstico de consultas, cambios en modos de operación, mantenimiento de la CPU, edición de variables del PLC, y sobre todo el acceso Web, como se indica en la figura 4.1.4.

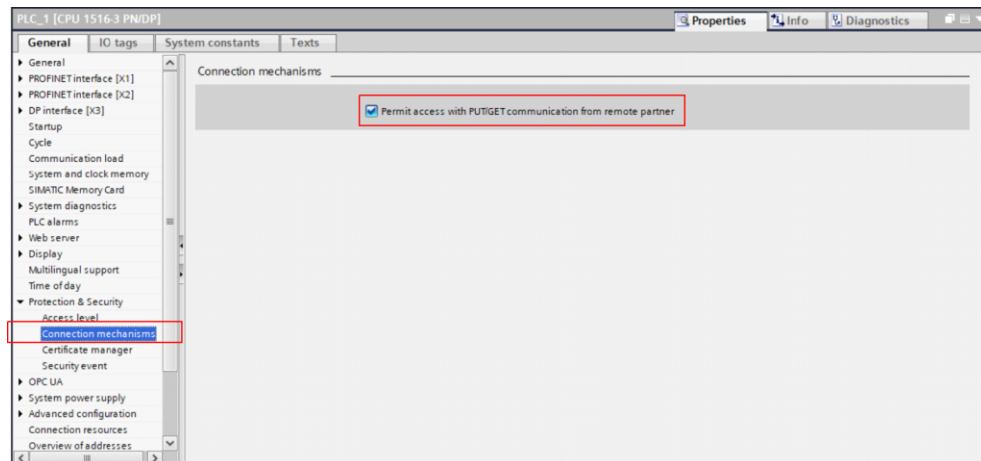


**Figura 4.1.4 Autorización de usuarios en PLC**

Consecuentemente, se habilitó el acceso con comunicación PUTGET desde aplicaciones remotas, para que la comunicación pueda ser realizada por enlaces S7, como se indica

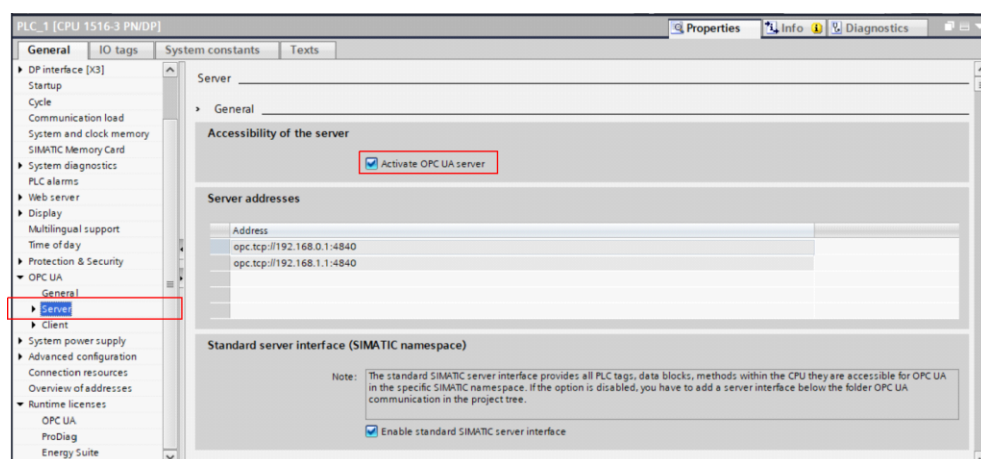


en la figura 4.1.5. Cabe mencionar que la instrucción PUT escribe los datos y la instrucción GET los lee.

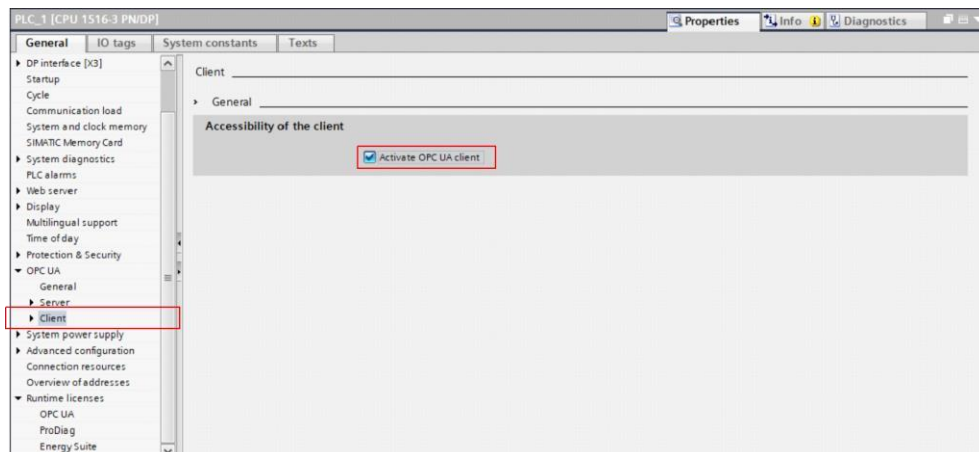


**Figura 4.1.5** Habilitación de acceso de comunicación PUTGET en PLC

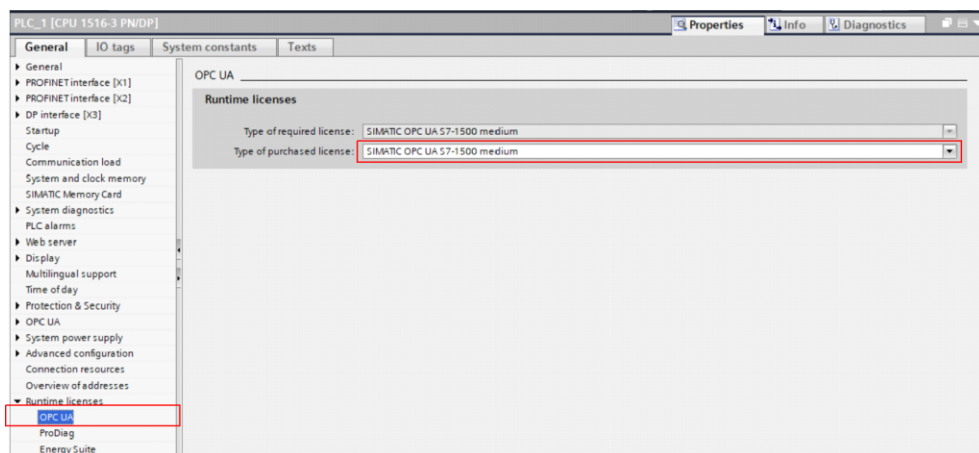
Para que fuera factible la comunicación OPC UA desde el PLC, se debió habilitar las opciones de servidor y cliente de OPC UA, junto con la licencia OPC respectiva, dependiendo de la capacidad del PLC considerado. Esto se puede apreciar en las figuras 4.1.6, 4.1.7 y 4.1.8, y en nuestro caso se necesitó una licencia OPC mediana.



**Figura 4.1.6** Activación de servidor OPC UA en PLC



**Figura 4.1.7 Activación de cliente OPC UA en PLC**



**Figura 4.1.8 Selección de licencia OPC UA para PLC**

Para la creación del programa se siguieron los siguientes pasos:

- Se implementó un bloque de organización, de interrupción cíclica, con un tiempo de interrupción de 10 ms llamado “Cyclic10ms”. Este valor de tiempo fue equivalente al tiempo de muestreo de simulación en Simulink y el tiempo de muestro para el controlador PID del PLC.
- Se implementó una base de datos llamada “Global”, donde se consideró una estructura que contiene el valor de consigna de tensión de la tela, un porcentaje de salida, la habilitación de salida y el modo de operación del controlador PID, como se puede apreciar en la figura 4.1.9. Como valores iniciales se consideraron una consigna de 100 N, y un modo de operación de 3 lo cual define que el controlador PID operará en modo automático.

	Name	Data type	Start value	Retain
1	Static			<input type="checkbox"/>
2	unwindingControllerSfunction	Struct		<input type="checkbox"/>
3	tensionSetpoint	Int	100	<input type="checkbox"/>
4	manualOutputPercentage	Int	0	<input type="checkbox"/>
5	manualOutputEnable	Bool	false	<input type="checkbox"/>
6	operatingMode	Int	3	<input type="checkbox"/>

**Figura 4.1.9 Creación de estructura para controlador PID**

- En variables del PLC, se definieron las E/S que fueron intercambiadas vía comunicación OPC correspondientes a la tensión de entrada al controlador y la acción de controlador, que sería la corriente de campo. El nombre de estas variables, sus tipos de datos y direcciones se indican en la figura 4.1.10.

PLC tags				
	Name	Tag table	Data type	Address
1	inputTensionSFunc	Default tag table	Real	%ID0
2	outputCurrentSFunc	Default tag table	Real	%QD0
3	<Add new>			

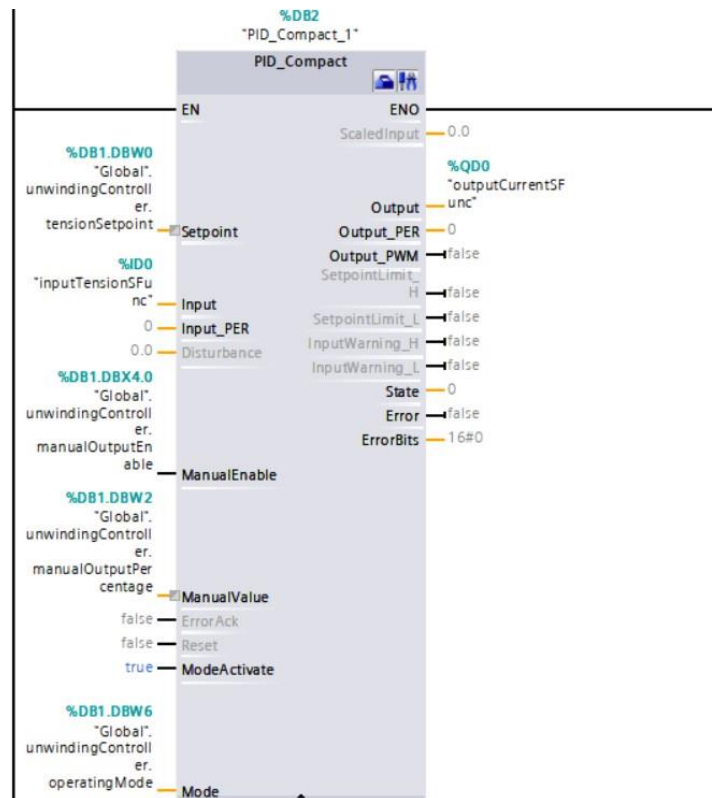
**Figura 4.1.10 Variables del PLC**

- Dentro del bloque “Cyclic10ms”, se implementó el bloque del controlador PID llamado “PID\_Compact” con sus interconexiones detalladas en la figura 4.1.11. Este bloque se crea con su propia base de datos y fue adaptado de acuerdo al siguiente algoritmo:

$$y = K_P \left( be \right) + \frac{1}{T_D} \int e dt + c e$$

Donde  $y$  es la salida,  $e$  es el error entre la consigna y la tensión de la tela,  $K_P$ ,  $T_i$  y  $T_D$  son los parámetros genéricos de todo controlador PID,  $b$  y  $c$  son ponderaciones

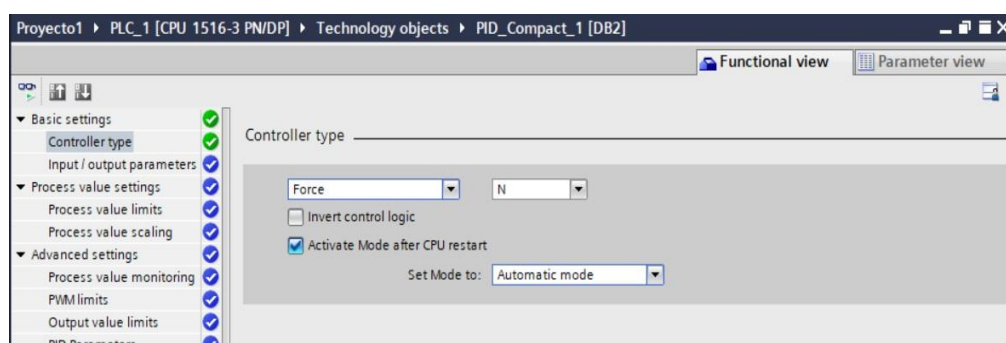
de la acción proporcional y derivativa respectivamente, y  $a$  es un coeficiente para un retraso derivativo.



**Figura 4.1.11 Bloque PID\_Compact con señales de E/S**

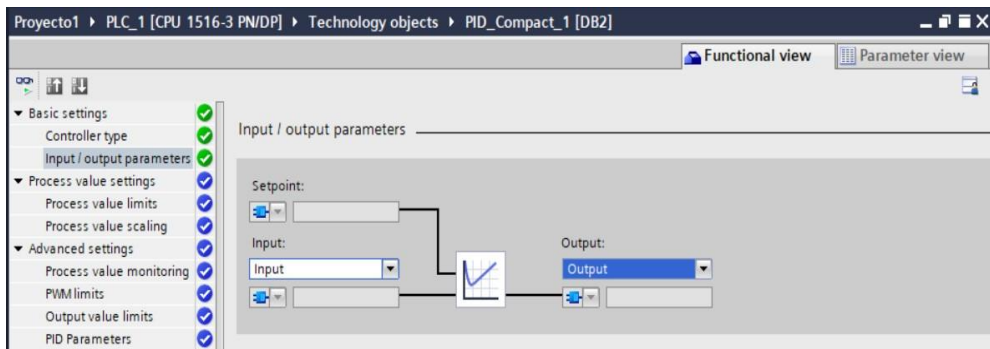
Luego de configurar el programa del PLC, se indican los pasos seguidos para la configuración del controlador PID:

- En nuestro caso, el controlador PID comparará la tensión de la tela, por lo que esta variable corresponde a una media de fuerza, cuyas unidades son N, y se seleccionó esta variable dentro de este bloque tal como se indica en la figura 4.1.12.



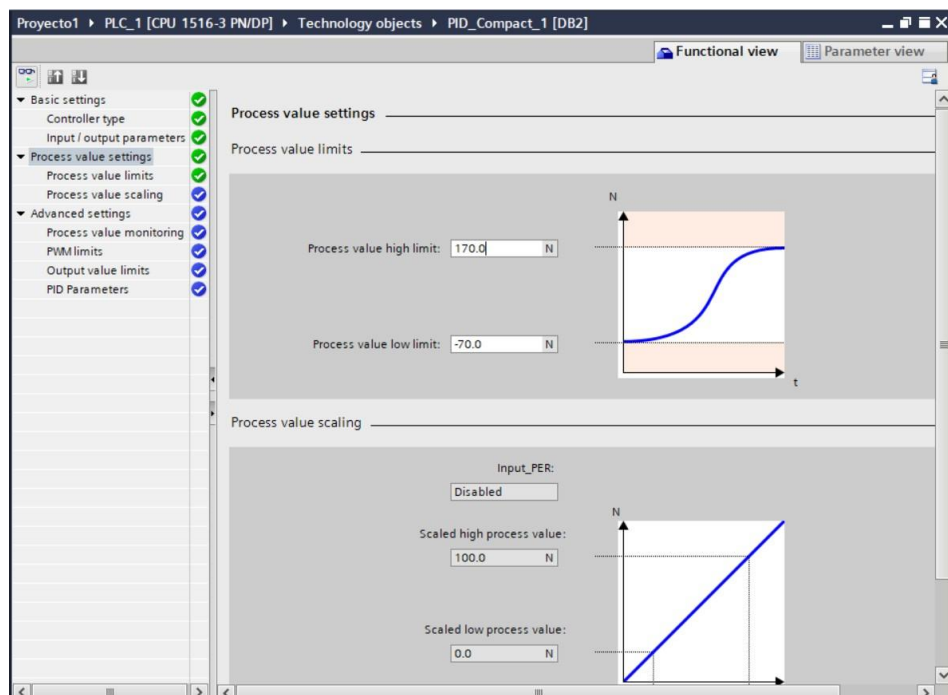
**Figura 4.1.12 Tipo de controlador PID**

- Las variables E/S del PLC, como tales, fueron seleccionaron como parámetros de E/S, como se indica en la figura 4.1.13. En la práctica es factible seleccionar estas variables escaladas cuando se utilizan transductores.



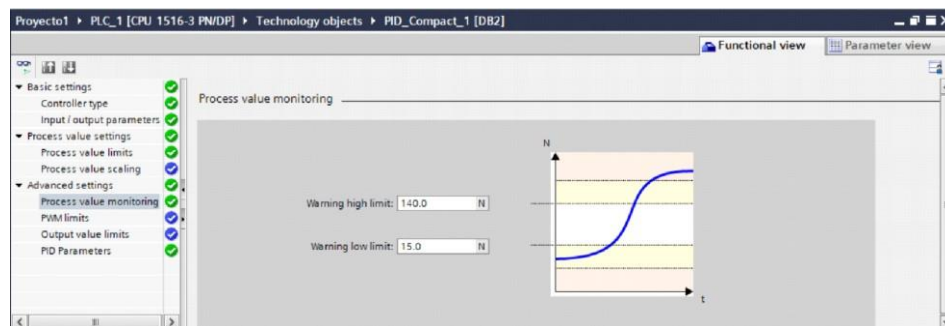
**Figura 4.1.13 Parámetros de E/S de controlador PID**

- Se establecieron los valores límites de proceso indicados en la figura 4.1.14, y como se mencionó previamente es posible establecer estos valores con escalamiento, pero no es aplicable en nuestro caso.



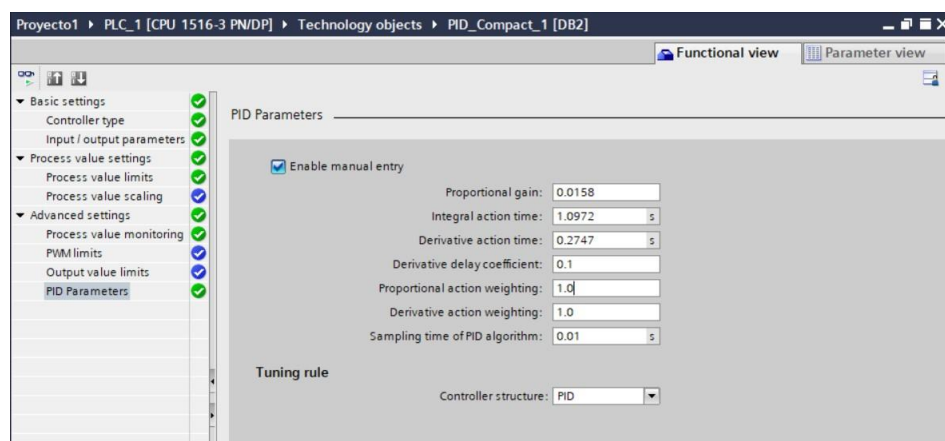
**Figura 4.1.14 Límites de proceso en controlador PID**

- Como buena práctica por parte de los operarios de la planta, se establecieron los valores de monitoreo del proceso. Estos valores de alarma de tensión alta y baja, se indican en la figura 4.1.15.



**Figura 4.1.15 Alarmas de proceso en controlador PID**

- Los parámetros del controlador PID se indican en la figura 4.1.16, donde los cálculos de las constantes  $K_P$ ,  $T_i$  y  $T_D$  serán indicados en la sección 4.1.3, los valores de ponderaciones se han escogido adecuadamente, y el tiempo de muestreo es el mismo de la interrupción cíclica, es decir 10 ms.



**Figura 4.1.16 Parámetros de controlador PID**

Para establecer el enlace OPC, se necesitó configurar al PLC un direccionamiento IP similarmente a un dispositivo real, y fue por este motivo se utilizó la herramienta PLCSIM Advanced, del fabricante Siemens. Esta herramienta es capaz de soportar

OPC UA y un servidor Web, además de que puede simular múltiples instancias a diferencia de la plataforma clásica PLCSIM, aunque solo funciona con PLCs de la familia S7-1500.

Se consideró una instancia que simuló al PLC, llamada "PLC\_1" y con su direccionamiento IP equivalente al del puerto Profinet X1. Fue importante activar el puerto virtual llamado "PLCSIM Virtual Ethernet Adapter" y al cargar el programa, la plataforma TIA Portal automáticamente asignó una dirección IP a este puerto virtual, siendo esta 192.168.0.41.

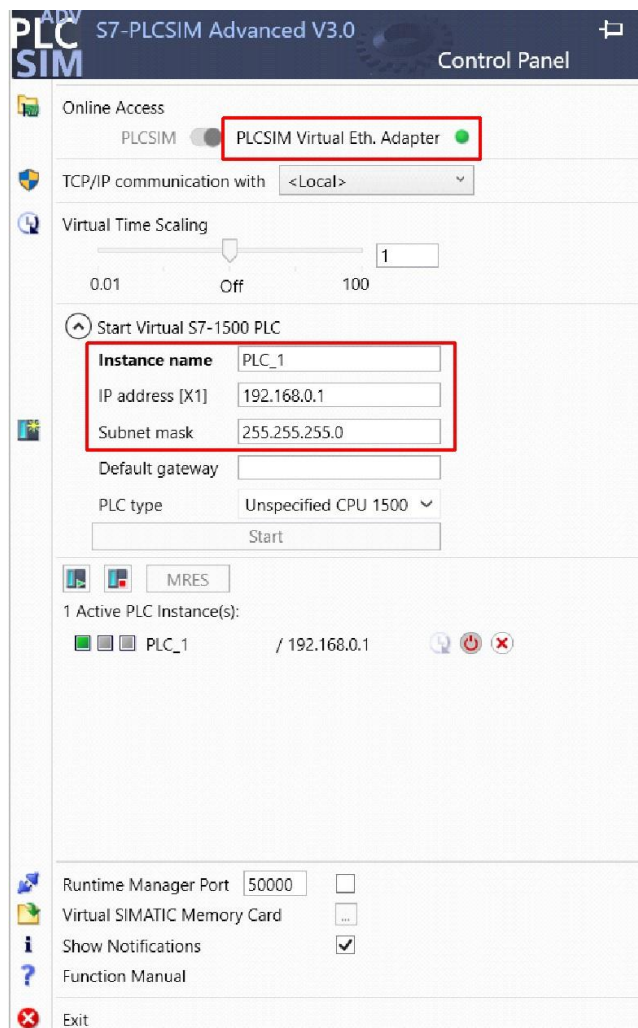
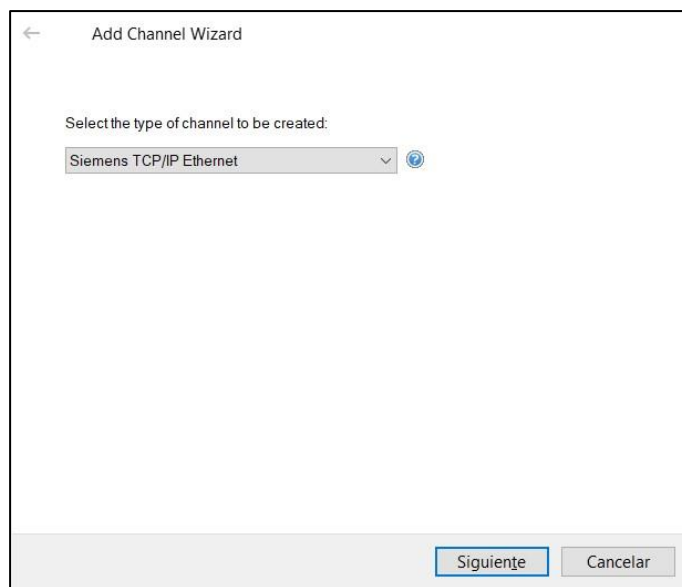


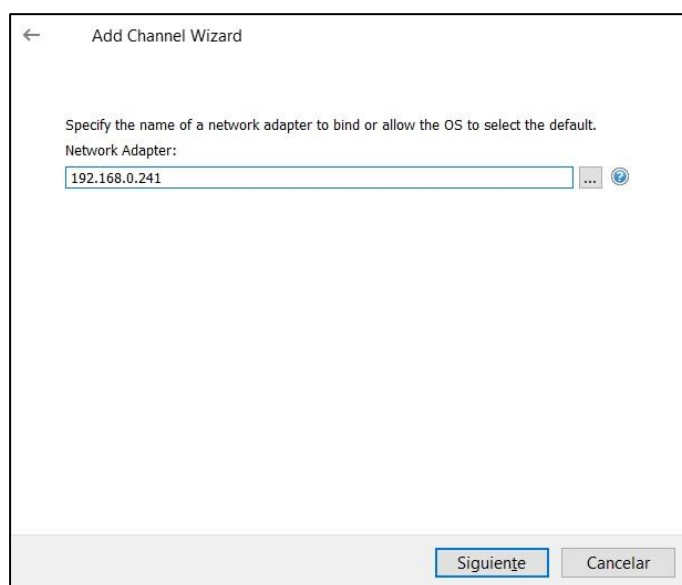
Figura 4.1.17 Pantalla de PLCSIM con instancia PLC\_1

#### 4.1.2 Configuración de la plataforma para enlace OPC

Para la creación del canal OPC, fue utilizada la plataforma KEPServerEx, dónde se creó un canal llamado "S71500 OPC" estableciendo principalmente el tipo de canal TCP/IP para el enlace y la dirección IP del puerto virtual. Estas características se indican en las figuras 4.1.18 y 4.1.19.



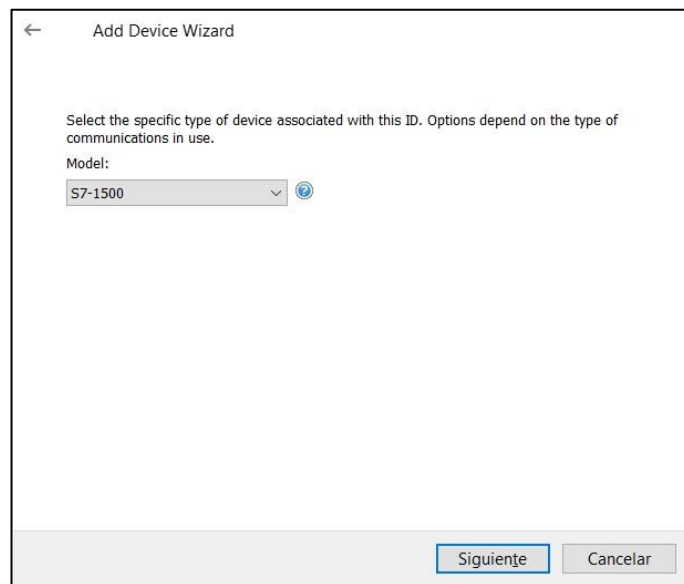
**Figura 4.1.18 Tipo de canal para enlace OPC**



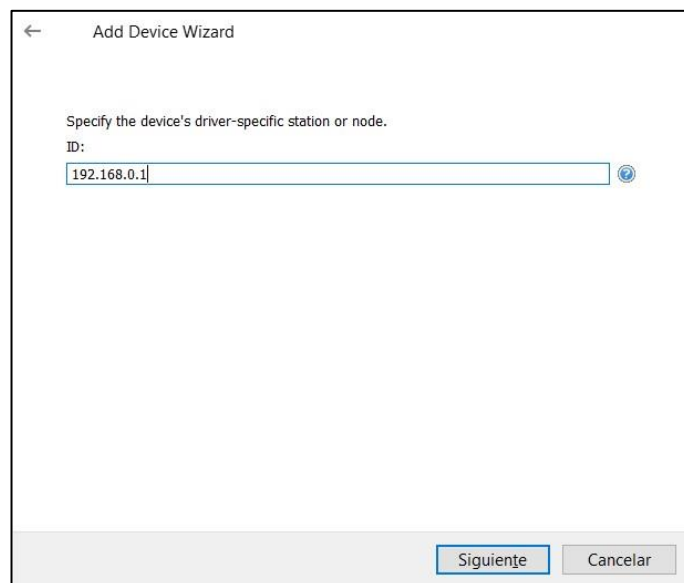
**Figura 4.1.19 Dirección IP de canal para enlace OPC**



Luego se creó un dispositivo correspondiente al PLC, llamado "PLC\_1", donde se considera principalmente el tipo de PLC, siendo este S7-1500, y la dirección IP de la instancia creada en el PLCSIM Advanced, como se ve en las figuras 4.1.20 y 4.1.21. Es importante que, al crear el canal y el dispositivo, se dejó por defecto los demás datos solicitados por el asistente.

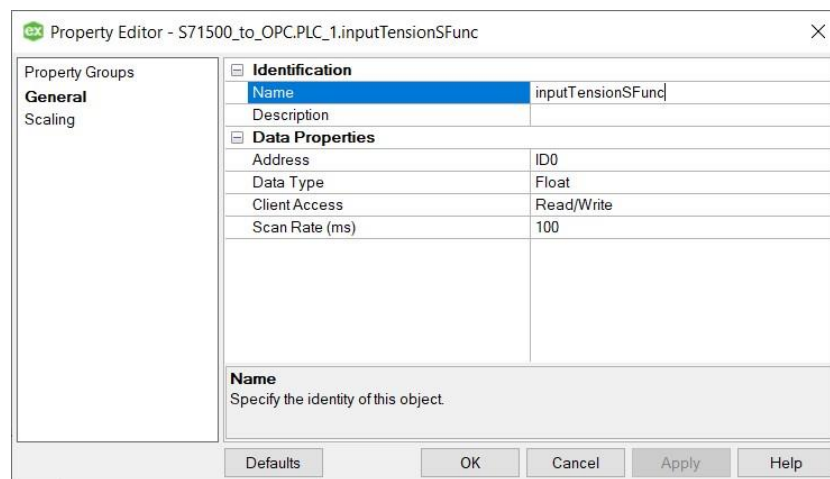


**Figura 4.1.20 Tipo de dispositivo para enlace OPC**

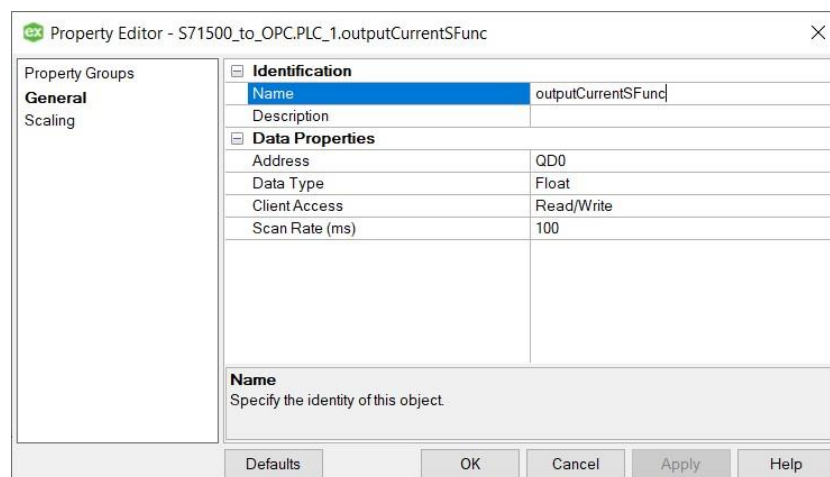


**Figura 4.1.21 Dirección IP de dispositivo para enlace OPC**

Dentro del dispositivo, se crearon las variables de E/S para el intercambio de señales de la comunicación OPC, siendo éstas las E/S del PLC, donde fue importante que el nombre de estas variables y sus respectivas direcciones sean las mismas que se tuvieron en la plataforma TIA Portal, tal como se puede apreciarse en las figuras 4.1.22 y 4.1.23. El tipo de dato considerado fue "Float" porque es compatible con variables reales, e incluso con sus números de bits.



**Figura 4.1.22 Creación de variable de entrada para enlace OPC**



**Figura 4.1.23 Creación de variable de salida para enlace OPC**

### 4.1.3 Sintonización del sistema de control

Un controlador embebido en un PLC se considera de tipo digital, es por este motivo que en el diagrama de bloques en Simulink, mostrado en la Figura 3.4.6, se ha

adicionado un ZOH con el fin de retener los valores de tensión de la tela logrando así discretizar la señal. Adicionalmente, se ha reemplazado el bloque correspondiente al Controlador PID, con los bloques Write/Read para el enlace OPC.

Considerando la función de transferencia  $Gp(s)$ , y discretizándola a un tiempo de muestreo  $T_s = 10\text{ms}$ , se han calculado las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  utilizando la herramienta *pidtune* de MATLAB, y a partir de estas se obtuvieron los tiempos de acción integral y derivativo para el bloque *PID\_Compact\_1*. Los parámetros hallados y calculados para este bloque se indican en la tabla 4.1.1, justificando los valores de configuración indicados en la sección anterior.

Parámetro	Valor
Constante proporcional	0.0518
Constante integral	0.0144
Constante derivativa	0.00434
Tiempo de acción integral	1.0972
Tiempo de acción derivativo	0.2747

**Tabla 4.1.1 Parámetros de controlador digital**

## 4.2 Configuración de interfaz hombre máquina

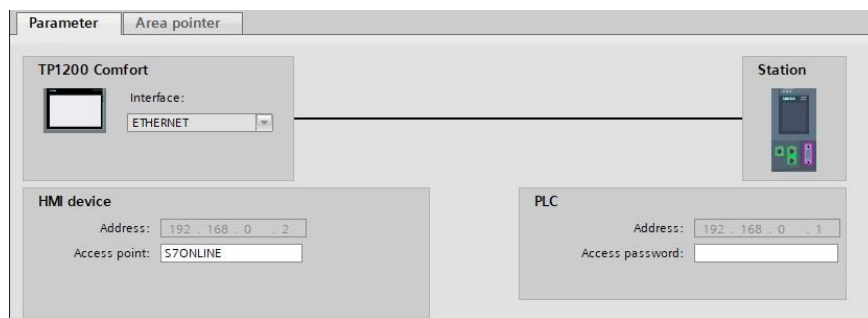
### 4.2.1 Programación del HMI

Una vez configurada la programación del PLC y al ser verificado el enlace OPC, se procedió a la configuración de una HMI con la ayuda de una pantalla táctil con las siguientes características:

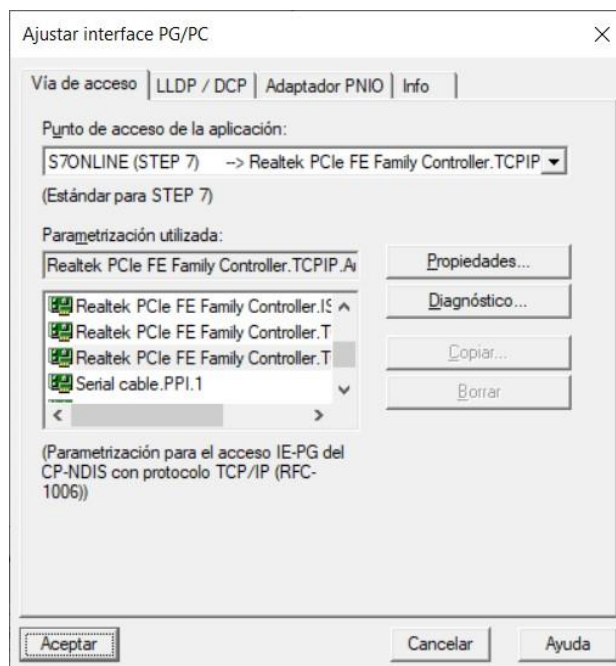
- Pantalla TP1200 Comfort, cuyo N/P es 6AV2 124-0MC01-0XA0, con una versión 2.8.
- Tamaño de 12.1", con 1280x800 pixeles y 16M de colores.
- Un puerto de comunicación Profinet y un puerto Profibus DP.

Se consideró que la HMI sea parte del segmento de la red IP del PLC, por lo tanto, su dirección IP fue 192.168.0.2 con una máscara de subred 255.255.255.0.

Se realizó el enlace Profinet entre el PLC y la HMI de forma simulada, mediante un enlace S7ONLINE con el puerto Ethernet propio de la computadora de trabajo, que contenga segmento "TCP Auto". Los detalles de este enlace se muestran en la figura 4.2.1, y el ajuste de la interfaz PG/PE para que sea factible se muestra en la figura 4.2.2.



**Figura 4.2.1 Conexión Profinet entre PLC y HMI**



**Figura 4.2.2 Ajuste de interface PG/PC para comunicación S7ONLINE**

Luego de haber realizado esta configuración de HMI, se diseñó un bosquejo para la pantalla raíz, que puede apreciarse en la figura 4.2.3, y el mismo que contiene:

- Un visor de tendencias para apreciar el comportamiento de la consigna de tensión, y la tensión actual.
- Un texto para verificar la tensión de la tela actual y un cuadro de texto para que el usuario pueda establecer un valor de consigna de tensión.
- No se muestran fechas ni botones de avisos en la pantalla porque en el visor de tendencias ya se tienen estos datos.
- No se ha considerado mostrar la tendencia referente a la corriente de campo debido a que tiene valores muy pequeños en comparación a la atención.

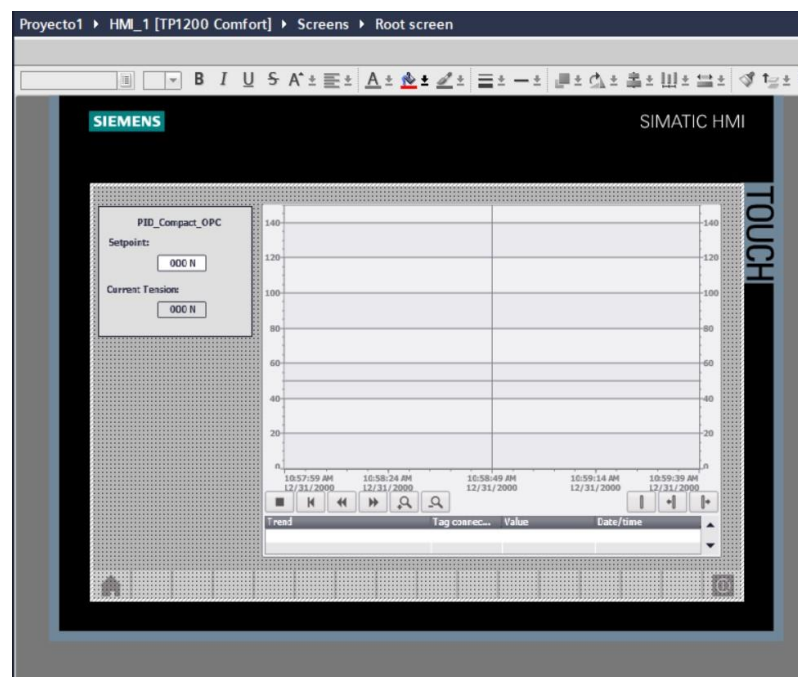


Figura 4.2.3 Pantalla HMI diseñada

#### 4.2.2 Establecimiento de niveles de alarma

Cómo se había mencionado previamente, en la configuración del controlador PID del PLC, de acuerdo a la experiencia de los operadores de la planta se consideraron los valores de 15 N y 140 N como niveles de alarma baja y alta de tensión. Estos valores se establecen en el rango de la variable de tensión “inputTensionSFunc” que se encuentra en la tabla de variables HMI.

#### 4.3 Gráficas de consignas de tensión

Previamente a la visualización las gráficas del comportamiento de la tensión de la tela junto con su consigna, se ejecutó lo siguiente:

- El enlace OPC para que los valores y comunicaciones de las variables E/S de interés sean verificadas. Esto se realizó con el uso de la herramienta "Quick Client" propia del Kepserverex.
- El diagrama de bloques implementado en Simulink que contiene los bloques OPC Read, OPC Write y el proceso de la desbobinadora.
- La comunicación del PLC con el PLCSIM Advanced, siendo esta ejecución la más importante.

Luego de estos pasos, se procedió a la simulación de la pantalla HMI con la plataforma "Simatic WinCC Runtime Advanced", del fabricante Siemens. Es importante destacar que se escogió una pantalla del tipo Comfort porque son compatibles con el simulador en cuestión, y también con PLCSIM Advanced.

Posteriormente se realizaron algunas pruebas de simulación:

1. Inicialmente, con una consigna de 100 N, desde un valor inicial nulo, se obtuvo el comportamiento de la tensión mostrado en la figura 4.3.1. con un OS muy elevado. Cabe mencionar que también se puede apreciar la hora y fecha de los cambios de tensión en el visor de tendencias.
2. Luego de 25 s, se disminuyó la consigna a 90 N y se obtuvo el comportamiento de tensión mostrado en la figura 4.3.2.
3. Después de 45 s, se disminuyó nuevamente la consigna a 80 N, y se obtuvo el comportamiento de atención mostrado en la figura 4.3.3.
4. Finalmente se restauró el valor de la consigna a 100 N y se obtuvo el comportamiento de tensión mostrado en la figura 4.3.4, indicando que se tuvo un OS 0.8 veces menor que es la primera prueba.

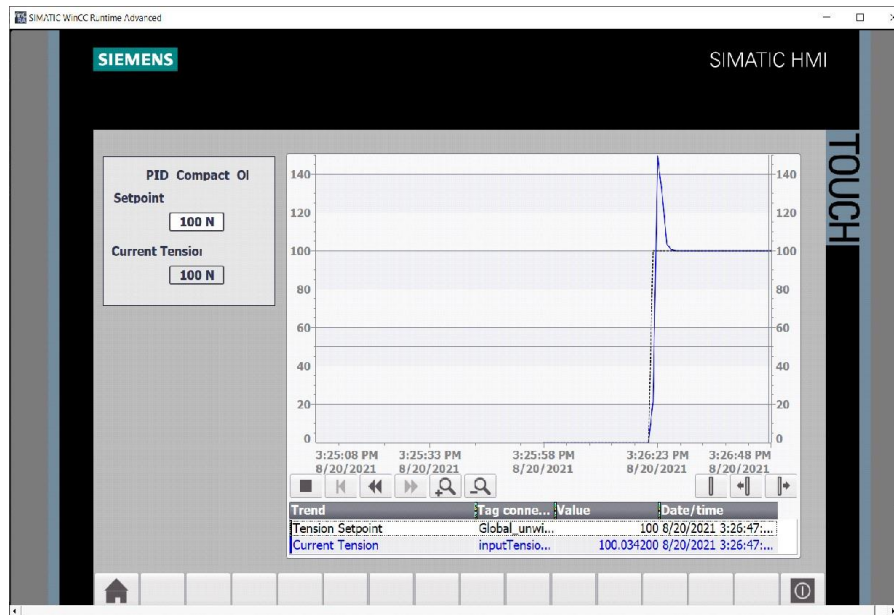


Figura 4.3.1 Prueba simulada de HMI con consigna de 100 N

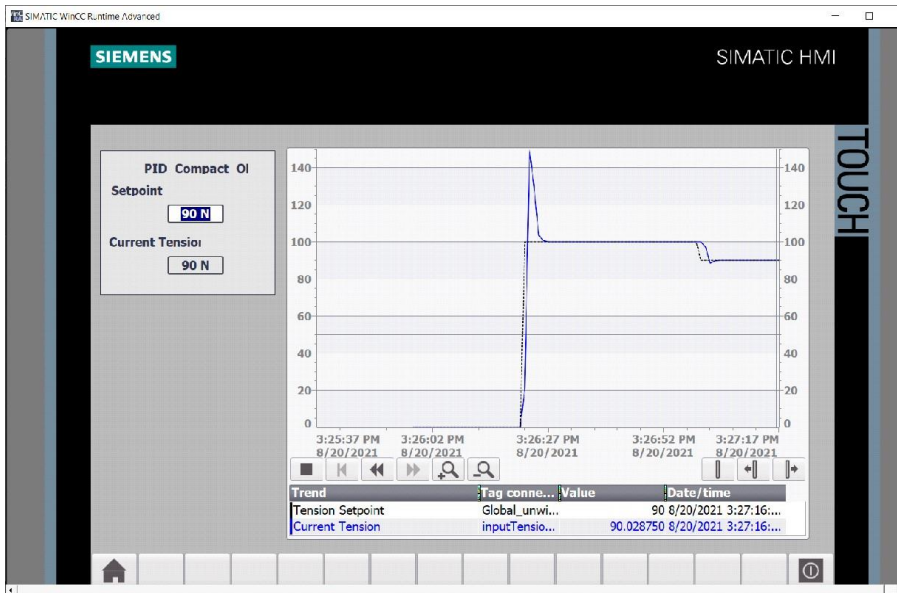
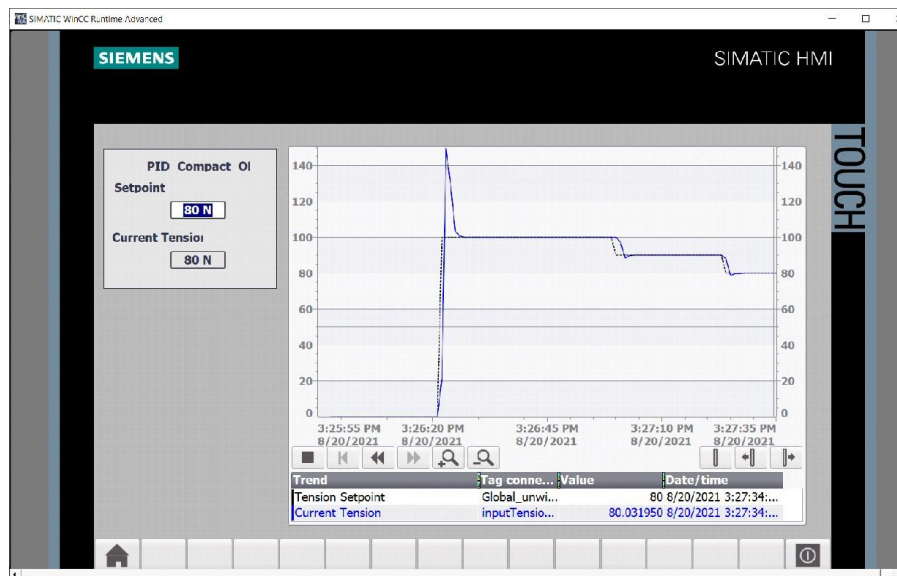
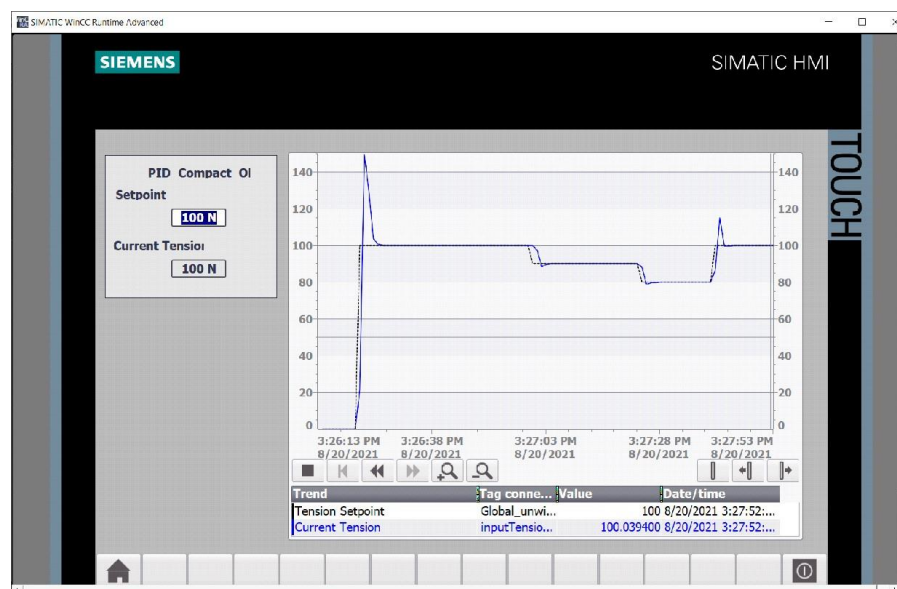


Figura 4.3.2 Prueba simulada de HMI con consigna de 90 N



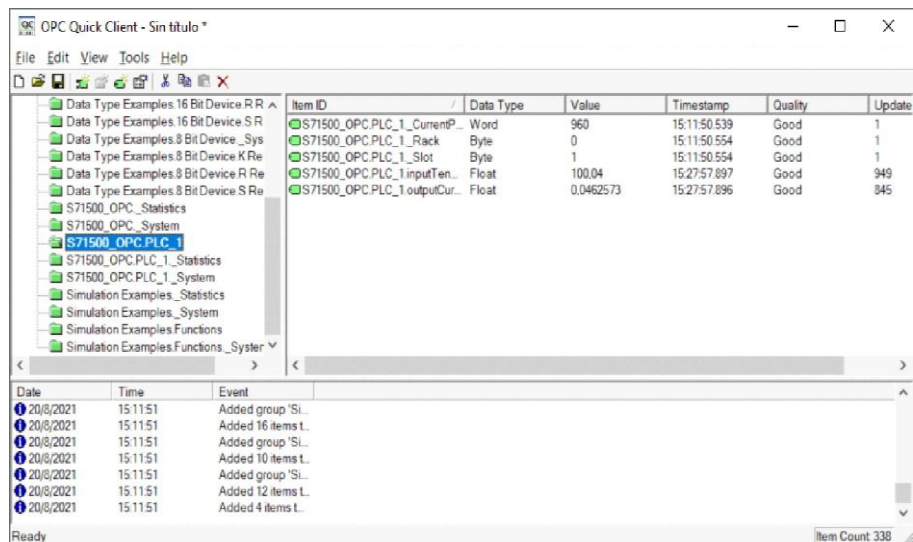
**Figura 4.3.3 Prueba simulada de HMI con consigna de 80 N**



**Figura 4.3.4 Prueba simulada de HMI nuevamente con consigna de 100 N**

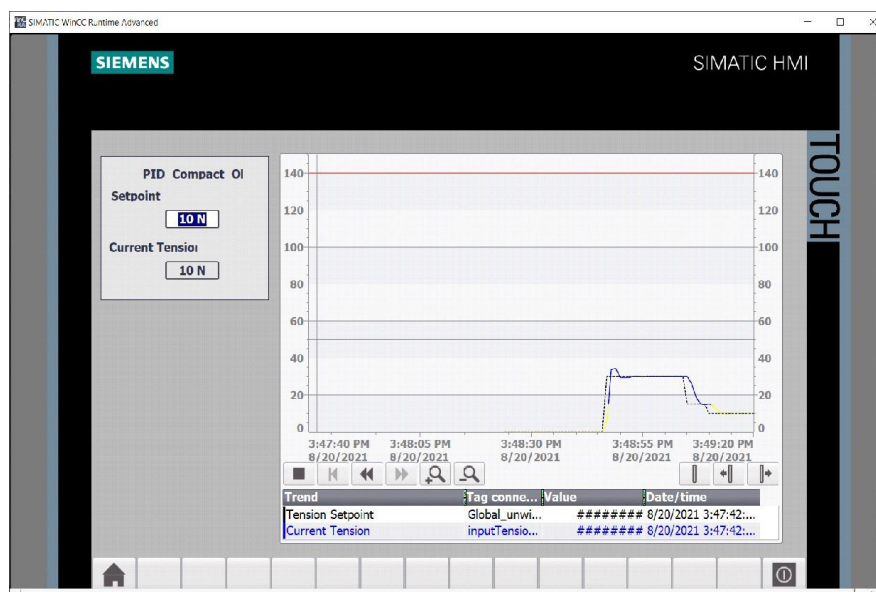
Adicionalmente se presenta la figura 4.3.4 para la verificación del enlace OPC dónde se muestran el valor de las variables E/S con su calidad de comunicación, y también se puede visualizar el Rack y el Slot que ocupa el PLC S7-1500 para posibles temas de mantenimiento.





**Figura 4.3.5 Variables E/S de enlace OPC**

Para la verificación de los niveles de alarma de tensión de la tela se realizó el ajuste del rango de tensión, que fue indicado en la sección 4.2.2, y además se habilitó la opción de mostrar las rectas de estos valores límites. Se realizaron dos pruebas donde inicialmente una consigna de 30 N, se la disminuyó a 15 N luego de 25 s, y se aumentó a 145 N luego de 25 s más, obteniendo los resultados mostrados en las figuras 4.3.6 y 4.3.7 que muestran un cambio de colores cuándo la tensión pasa estos límites. No obstante, cabe mencionar que cuando la tensión está exactamente en los valores límites, su tendencia no cambia de color.



**Figura 4.3.6 Prueba simulada de HMI (tensión en nivel bajo)**

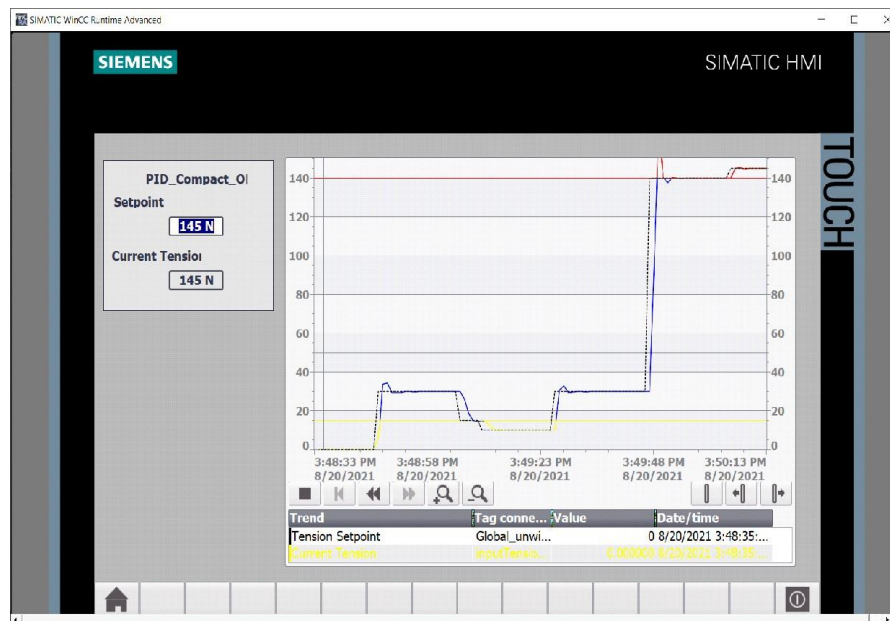


Figura 4.3.7 Prueba simulada de HMI (tensión en nivel alto)

## CAPÍTULO 5

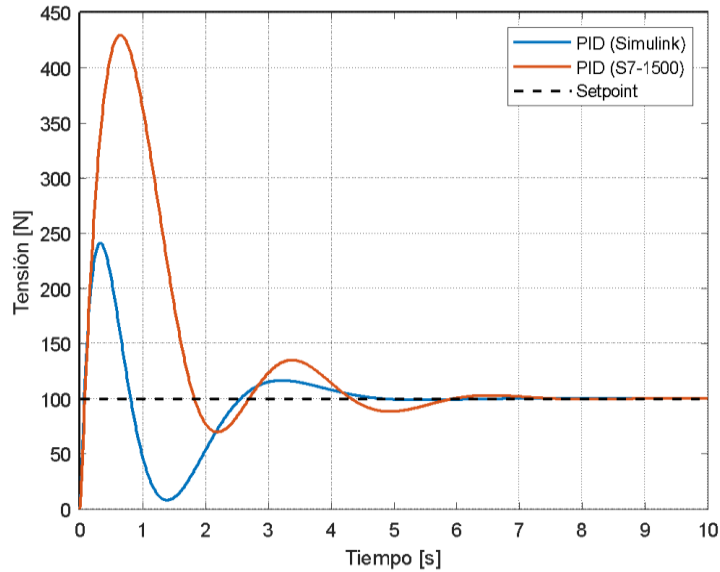
### 5. ANÁLISIS COMPARATIVOS DE RESULTADOS

En este capítulo se mostrará la comparación los resultados con los controladores clásicos para la tensión de la tela en la desbobinadora, luego se compararán los resultados con los controladores adaptativos basados en técnicas difusas, y posteriormente para cada tipo de control, se realizará un análisis con el fin de mejorar el consumo de materia prima de nuestro sistema.

#### 5.1 Análisis comparativo del desempeño de controladores PID

En la figura 5.1.1 se puede apreciar que al emplear un control PID clásico, implementado en Simulink, la tensión en la tela tiene inicialmente un  $OS = 240\%$  y un  $T_{ss} = 4.2$  s aproximadamente, mientras que al emplear el control desde el PLC S7-1500, se tiene un  $OS = 429.33\%$  y también un  $T_{ss} = 4.2$  s.

La comparación entre ambos controladores PID se muestra en la tabla 5.1.1

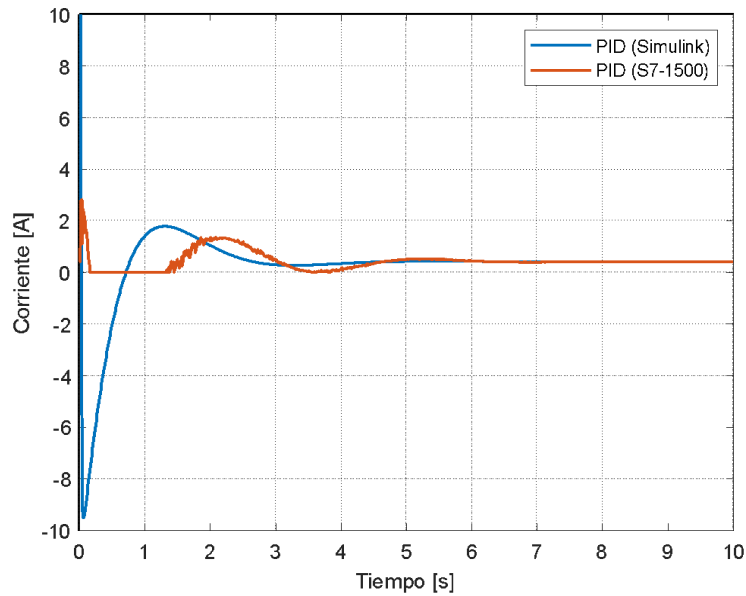


**Figura 5.1.1 Tensión en la tela de desbobinadora (control clásico)**

Respuesta del sistema	PID Simulink	PID S7-1500
Sobrenivel porcentual (%)	240	429,33
Tiempo de estabilización (s)	4,2	4,2

**Tabla 5.1.1 Comparativa de respuesta de tensión con controladores PID**

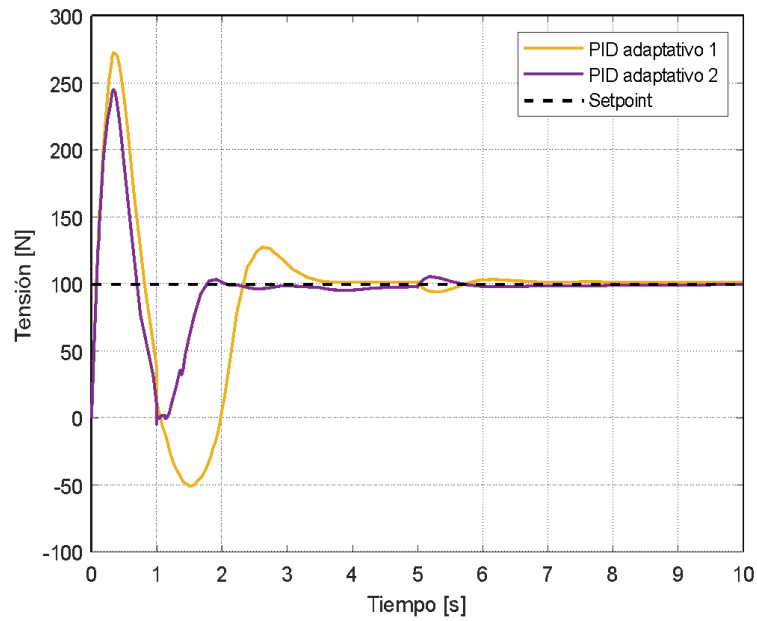
Adicionalmente se muestran las acciones de ambos controladores PID en la figura 5.1.2 donde se aprecia que con el control PID implementado en Simulink tiene un mayor esfuerzo con un sobrepico que es 1.37 veces mayor.



**Figura 5.1.2 Corriente de campo en motor DC de desbobinadora (control clásico)**

## 5.2 Análisis comparativo del desempeño de controladores adaptativos

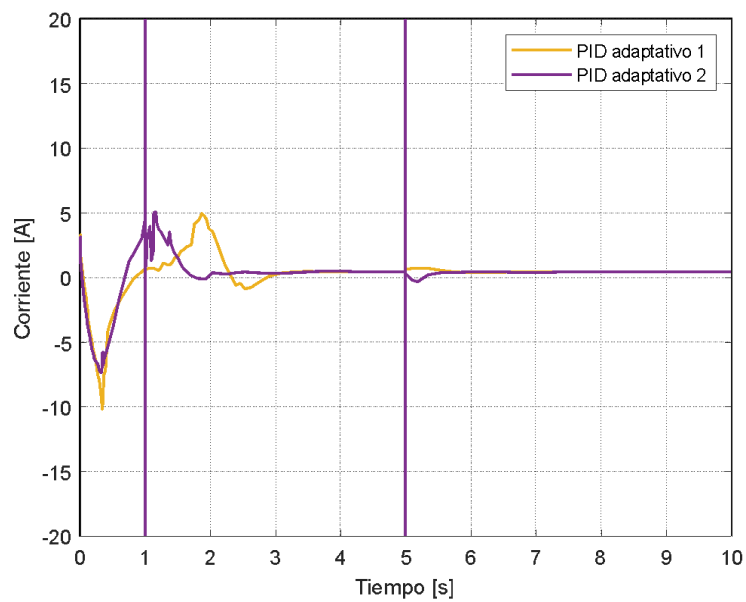
De manera similar a la sección anterior, se analizará el comportamiento de la tensión de la tela cuando se emplean controladores adaptativos. En la figura 5.2.1 se puede apreciar que, al emplear el primer control adaptativo, se tiene inicialmente un  $OS = 272.65\%$  y un  $T_{ss} = 3.3$  s aproximadamente, mientras que con el segundo control adaptativo se tiene un  $OS = 244.62\%$  y un  $T_{ss} = 1.9$  s. Adicionalmente se muestran las acciones de cada controlador en la figura 5.2.2, donde se puede apreciar que con el segundo controlador adaptativo el esfuerzo más rápido ya que con el primer controlador se presenta un tiempo muerto de 0.8 s, al cabo de 0.6 s.



**Figura 5.2.1 Tensión en la tela de desbobinadora (control adaptativo)**

Respuesta del sistema	PID Difuso 1	PID Difuso 2
Sobrenivel porcentual (%)	272,65	244,62
Tiempo de estabilización (s)	3,3	1,9

**Tabla 5.2.1 Comparativa de respuesta de tensión con controladores PID Difuso**



**Figura 5.2.2 Corriente de campo en motor DC de desbobinadora (control adaptativo)**

### **5.3 Estimaciones de consumo de materia prima y desperdicios para ambos escenarios**

La materia prima que se utiliza para la fabricación de pañales está dividida de la siguiente manera:

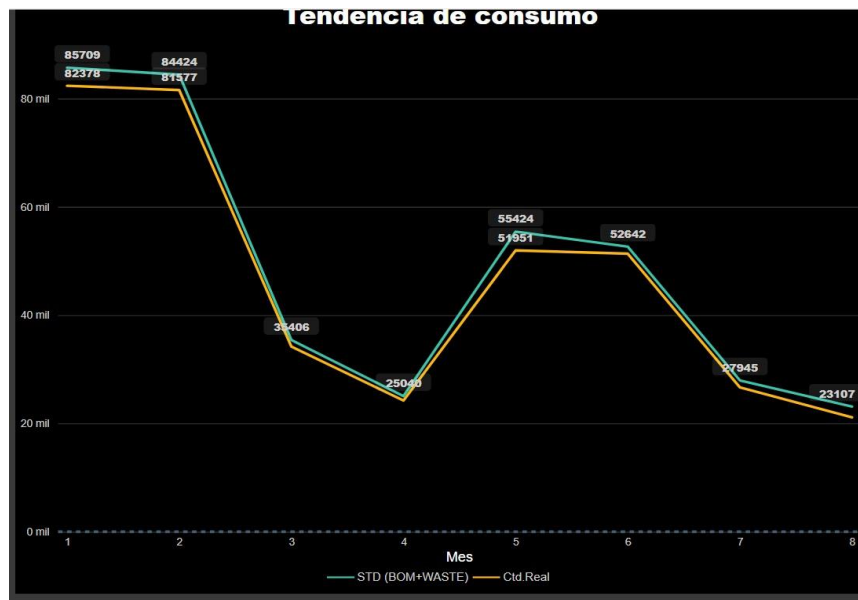
- Tela de absorción de líquidos
- Tela de cubierta interna
- Tela de cubierta externa
- Tela central
- Sap (super absorbente)

Siendo la tela central, superabsorbente y la tela barrera las más costosas en el proceso productivo.

El estándar del costo de producir 1000 pañales tiene un valor de \$42.00 en materia prima de los 3 materiales mencionados anteriormente solo en estos se usa el 80% del costo del pañal.

Es por este motivo que el correcto control de la tensión del material ayudará a reducir el desperdicio de la máquina y mejorar la optimización de las materias primas.

El enfoque del presente trabajo es actuar sobre estos materiales, ya que los tres materiales trabajan con el mismo sistema de control de tensión y nuestro impacto en la mejora será directamente sobre ellos.



**Figura 5.3.1 Consumo de materia prima tela barrera**

En la Figura 5.3.1 se observan dos curvas, la naranja que es el costo de producción, y la verde que es el costo del consumo más el desperdicio, para todos los meses se muestra que el costo del consumo más el desperdicio está por encima del costo de producción, lo que impacta en el precio final del producto, justificando la implementación del proyecto para reducir el desperdicio de materia prima.

Reduciendo el desperdicio, sobre el consumo de las materias primas y las paradas de mantenimiento se consiguen pasar de \$507.600 de consumo en materias primas a \$220.570 generando un ahorro de \$287.028 anuales en la línea de producción por lo que la implementación del proyecto es viable y mejorará de manera considerable el uso de estas materias primas.

Esta información es tomada de la base de datos del controlador de producción de la planta de Kimberly Clark Ecuador en el año 2021.

La eficacia de la máquina pasaría de tener un incremento en máquina de 3.7 toneladas/hora mes, pasando de una eficacia de 60.7% a 68.7%.

Descripción	Toneladas mensuales Ton/h	OEEE (eficacia %)
-------------	------------------------------	-------------------

<b>Actual</b>	28,00	60,7
<b>Proyectado</b>	31,70	68,72

**Tabla 5.3.1 Consumo de materias primas por mes**

Descripción	Escenario base	Escenario actual	Escenario proyectado (misma inversión, mayor producción)	Escenario proyectado (menor inversión, igual producción)
<b>Cantidad de pañales</b>	1.000,00	6.000.000,00	6.792.857,14	6.000.000,00
<b>Costo de producción</b>	\$42,00	\$252.000,00	\$252.000,00	\$222.586,75
<b>Costo de materia prima (80% de costo de producción)</b>	\$33,60	<b>\$201.600,00</b>	\$201.600,00	<b>\$178.069,40</b>

**Tabla 5.3.2 Cálculo de la eficiencia y producción**

<b>Ahorro mensual</b>	<b>\$23.530,60</b>
<b>Ahorro anual</b>	<b>\$282.367,19</b>

**Tabla 5.3.3 Cálculo del ahorro en materia prima**

## **CAPÍTULO 6**

### **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **6.1 Conclusiones**

Luego de haber evaluado el diseño y simulaciones de nuestro sistema de control, las conclusiones más relevantes son:



- Al comparar los cuatro controladores mencionados previamente, se logró demostrar que cual brinda un mejor desempeño es el segundo controlador adaptativo, ya que se obtuvo un menor sobre nivel porcentual y la estabilización de la tensión de la tela fue más rápida.
- Se obtuvo una buena parte del modelo con la herramienta *iddata* de Matlab, que aplica técnicas de identificación de sistemas a partir de los datos de la curva característica.
- En caso de realizar alguna implementación práctica, el controlador PID diseñado en este proyecto utilizando el PLC, aun no siendo el mejor de los controladores encontrados, brinda un buen resultado como se pudo apreciar en la sección de sus pruebas con la HMI, recordando que el controlador fuzzy aún no es aplicable en los controladores lógicos programables.

## 6.2 Recomendaciones

- Como trabajo futuro de este proyecto se pueden implementar recetas dentro de la HMI, como por ejemplo las velocidades y tensiones predefinidas que se necesiten para la demanda y característica de ciertas telas.
- Se insiste en mantener establecidos, o fijos, los parámetros del modelo de la desbobinadora para realizar el control de tensión de la tela, ya que caso contrario se debería emplear un control de tipo multivariable o hasta otro tipo de control adaptativo ya que se tendría un modelo variable.
- Para futuros trabajos se recomienda utilizar la herramienta *ident*, que es propia de Matlab, ya que tiene mejores capacidades de identificación e incluso los modelos hallados con esta herramienta pueden ser validados ante perturbaciones severas o ruidos.
- Si es recomendable realizar una implementación de este sistema de control ya que con el PLC escogido se obtuvieron buenos resultados, y también se requerirían otros transductores tales como un tensiómetro y

una etapa basada en tiristores, junto con un acondicionamiento de salida analógica proveniente del PLC.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Counts, A. Weisbrod, and S. Yin, "Common Diaper Ingredient Questions: Modern Disposable Diaper Materials Are Safe and Extensively Tested," *Clinical Pediatrics*, vol. 56, no. 5\_suppl, May 2017, doi: 10.1177/0009922817706998.
- [2] K. Kosemund, H. Schlatter, J. L. Ochsenhirt, E. L. Krause, D. S. Marsman, and G. N. Erasala, "Safety evaluation of superabsorbent baby diapers," *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, vol. 53, no. 2, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.yrtph.2008.10.005.
- [3] K. Balasubramanian, R. Jeyakumar, R. Ramamoorthi, R. Sivasubramanian, and N. Ramachandran, "Enhancement of conventional baby diaper making machine process using Programmable Logic Controller," *PAIDEUMA JOURNAL*, vol. XIII, no. I, 2020.
- [4] P. R. Raul and P. R. Pagilla, "Design and implementation of adaptive PI control schemes for web tension control in roll-to-roll (R2R) manufacturing," *ISA Transactions*, vol. 56, May 2015, doi: 10.1016/j.isatra.2014.11.020.
- [5] B. Moore and J. Franger, "Web Handling Best Practices Español," Sep. 2020.
- [6] A. I. M. Ramos, "Comparación de métodos de sintonización de un controlador PID para procesos industriales," *UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA*, 2018.
- [7] A. CREUS SOLE, "INSTRUMENTACION INDUSTRIAL/ANTONIO, CREUS SOLE."
- [8] K. M. Passino, S. Yurkovich, and M. Reinfrank, *Fuzzy control*, vol. 42. Citeseer, 1998.
- [9] H. Sánchez, "Diseño de control de tensión para cinta side panel máquina limadora #3 Tecnosur," 2006.
- [10] MITSUBISHI ELECTRIC, "TENSION CONTROLLER ELECTROMAGNETIC CLUTCH/BRAKE TENSION CONTROLLER GENERAL CATALOGUE," 2018.

- [11] M. Yang and S. Zhang, "The research of tension control system in web press based on the fuzzy adaptive PID controller," Jun. 2014. doi: 10.1109/ICIEA.2014.6931349.
- [12] R. C. Dorf, R. H. Bishop, S. D. Canto, R. D. Canto, and S. Dormido, *Sistemas de control moderno*. Pearson Educación, 2005.
- [13] J. A. Á. Salazar and J. A. L. Pulgarín, "Control de velocidad angular constante basado en un sistema splitter pi en una desenrolladora de papel," *Revista Politécnica*, vol. 10, no. 18, pp. 115–122, 2014.
- [14] J. L. Liu, S. K. Wang, and J. Z. Wang, "The Experimental Research of Magnetic Powder Brake Loading Characteristic in Rotary System," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 130–134, Oct. 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.130134.3237.
- [15] MITSUBISHI ELECTRIC, "TENSION CONTROLLER ELECTROMAGNETIC CLUTCH/BRAKE TENSION CONTROLLER GENERAL CATALOGUE," 2018.
- [16] MITSUBISHI ELECTRIC, "TENSION CONTROLLER ELECTROMAGNETIC CLUTCH/BRAKE TENSION CONTROLLER GENERAL CATALOGUE," 2018.

## ANEXOS

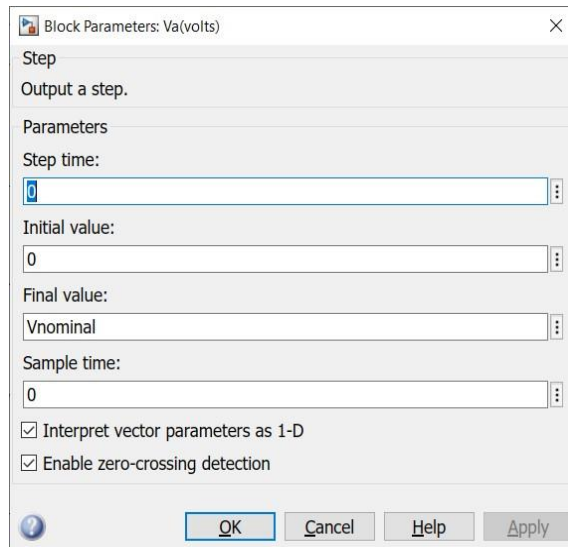
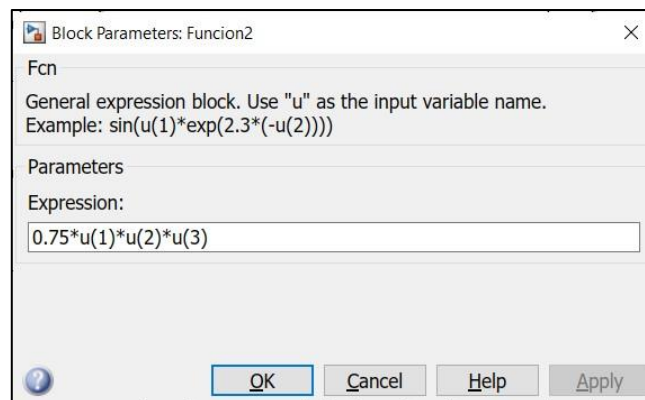
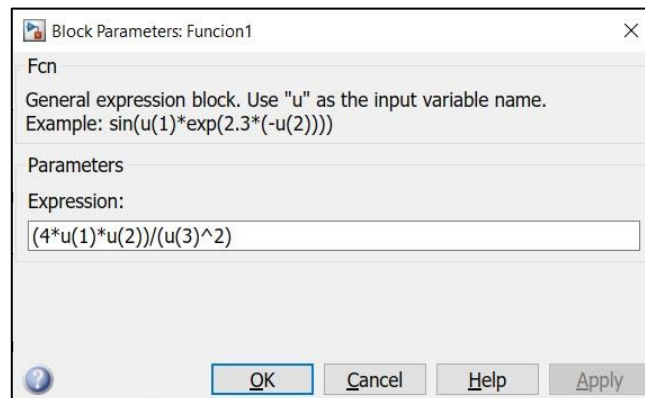
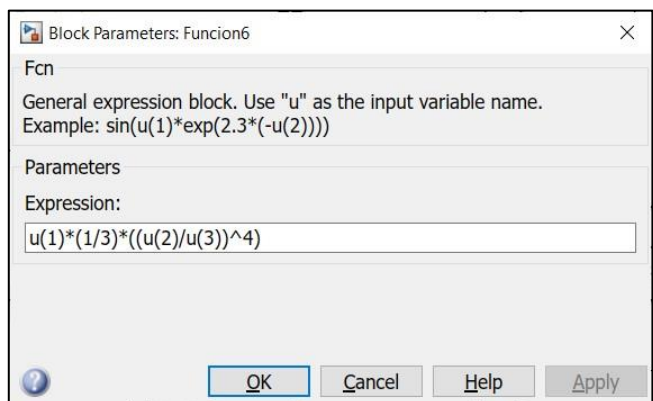
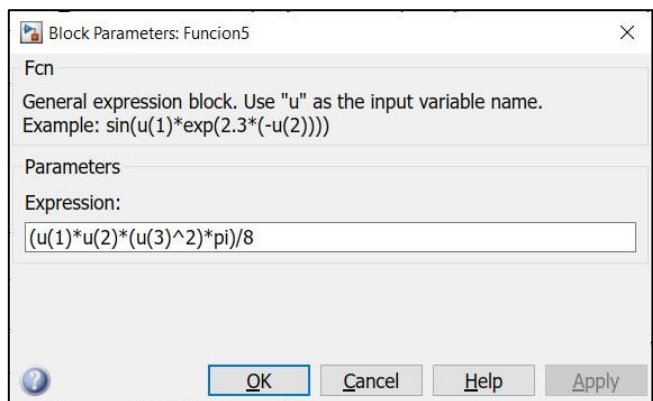
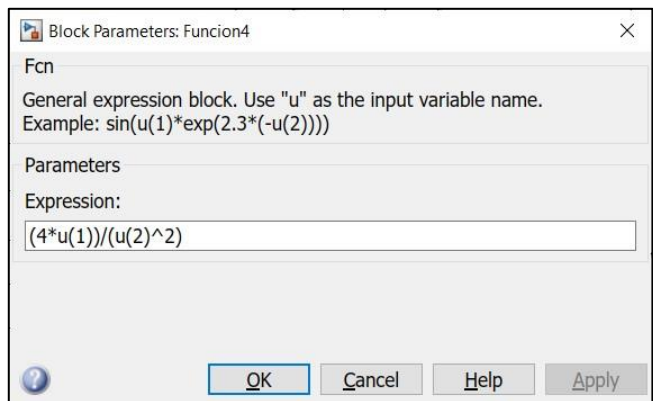
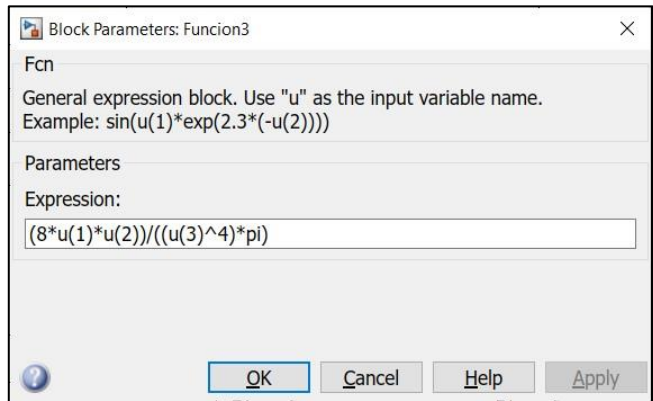
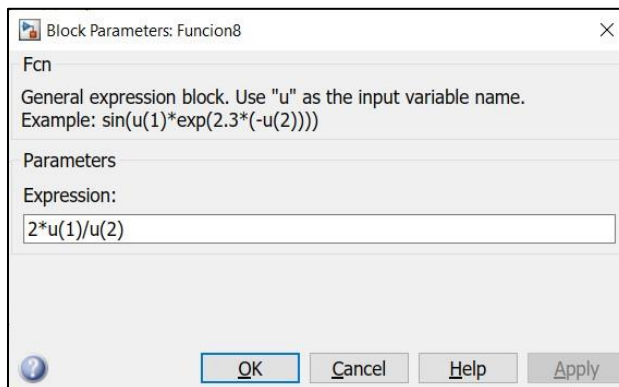
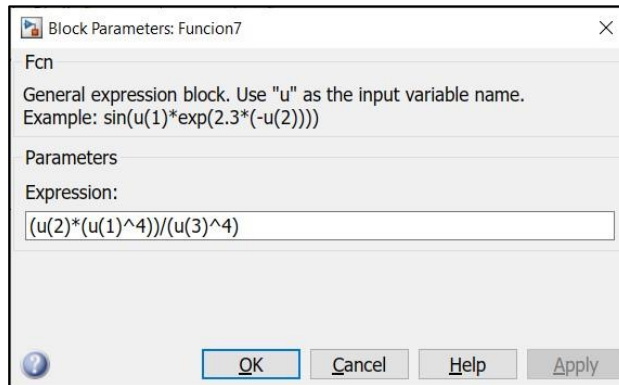


Figura anexos 1 Parámetros step para motor DC







**Figura anexos 2 Funciones utilizadas para la simulación de la desenrolladora**