

AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE PREPARACIÓN Y DOSIFICACIÓN DE ALMIDÓN PARA LA PLANTA PAPELES Y CORRUGADOS ANDINA S.A

Autor:
Nelson Damián Gómez García

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería, Proyecto curricular de Especialización en informática y automática industrial
Junio 2023

AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE PREPARACIÓN Y DOSIFICACIÓN DE ALMIDÓN PARA LA PLANTA PAPELES Y CORRUGADOS ANDINA S.A

Nelson Damián Gómez García

Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Informática y Automática Industrial

Director:
Luis Fernando Vargas Tamayo

Linea de investigación:
Automatización industrial

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería, Proyecto curricular de Especialización en informática y automática industrial
Junio 2023

*Dedicado a **Mariana Lucía Gómez Vargas**, Que Dios ilumine cada paso que des en tu vida y te llene de sabiduría en cada decisión, cada esfuerzo que haga en esta vida será para tu bienestar, Papá te ama.*

Agradecimientos

Gracias a Dios por la vida y cada instante de ella, a mis padres por estar presentes y apoyarme a lo largo de este largo camino académico, a mi pareja por su fortaleza y determinación, a toda la comunidad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas que me acogió convirtiéndose en mi segundo hogar, Agradezco a todos los docentes que aportaron en mi formación como profesional.

ÍNDICE

Índice de figuras **V**

1. Generalidades **1**
1. Planteamiento de problema 1
2. Justificación 3
3. Objetivos 4
   3.1. General 4
   3.2. Específicos 4

2. Marco referencial **5**
1. Marco teórico 5
   1.1. Producción del papel kraft 5
   1.2. Dispositivos de medición y control 10
   1.3. Métodos de control 19
   1.4. Controladores Lógicos Programables PLC 24
2. Estado del arte 28
   2.1. System Identification of a Temperature Control Process using Open Loop and Closed Loop methods [1] 28
   2.2. LabVIEW based system for PID tuning and implementation for a flow control loopLabVIEW based system for PID tuning and implementation for a flow control loop [2] 29
   2.3. INDUSTRIAL AUTOMATION CONTROL TROUGH PLC AND LABVIEW. [3] 30
   2.4. Production Process Analysis and Improvement of Corrugated Cardboard Industry. [4] 31
   2.5. PLC-based industrial temperature controller with different response times [5] 32

3. Automatización del proceso de preparación y dosificación del almidón **33**
1. Elección de instrumentación y elementos finales de control asociados al proceso 33
   1.1. Instrumentación sistema de preparación de almidón 33
   1.2. Elementos control de llenado 35
   1.3. Instrumentación y control sistema de dosificación 35
2. Identificación del modelo dinámico que representa el sistema térmico . . 37
   2.1. Descripción del sistema 37

2.2. Análisis experimental 37
2.3. Aproximación a sistema de primer orden 38
2.4. Aproximación a sistema de segundo orden 41
3. Diseño y simulación del controlador de temperatura de cocción 42
4. Diseño del sistema de dosificación de almidón 45
4.1. Descripción del sistema de dosificación 45
4.2. Cálculo de dosificación 46
4.3. Identificación del sistema dinámico de dosificación 47
4.4. Diseño del regulador 49
5. Diseño e implementación de programación PLC 50
5.1. Diseño de la ventana general de operación 51
5.2. Implementación de la secuencia de cocción 52
5.3. Implementación del sistema de dosificación del almidón 55
5.4. Implementación de reguladores de temperatura y caudal 57
6. Pruebas de validación de sistema de cocción y dosificación 61
6.1. Validación de regulador de dosificación de almidón 61
6.2. Validación de regulador PI de preparación del almidón 63
6.3. Validación programación PLC 65

Bibliografía **69**

Índice de figuras

1.1. Tiempos perdidos de producción. Elaboración Propia 2

2.1. Diagrama de bloques variador de velocidad [6] 10
2.2. Curva característica velocidad vs torque de un motor [7] 11
2.3. Curva característica de caudal inherente [8] 12
2.4. Partes de una válvula de compuerta [9] 12
2.5. Partes de una válvula de bola [10] 13
2.6. Partes de una válvula de globo [11] 14
2.7. Partes de una válvula de mariposa [10] 14
2.8. Curva Desplazamiento Vs Salida en diferentes potenciómetros [12] 15
2.9. Acondicionamiento de una galga extensiométrica usando puente de Wheatstone [13] 16
2.10. Curva característica de sensores RTD de diferentes materiales [14] 16
2.11. Comparación curva característica de sensores PTC, NTC y RTD [15] . . . 17
2.12. Curva característica Fotorresistores LDR [16] 17
2.13. Esquema de un sensor de proximidad capacitivo [17] 18
2.14. Diagrama de bloques de un sistema en lazo abierto [18] 19
2.15. Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado [18] 20
2.16. (a) Controlador On/Off, (b) Controlador on/off con histéresis [18] 20
2.17. Controlador Proporcional con valores diferentes de K_p [19] 21
2.18. Respuesta temporal sistema aproximado de primer orden con retardo [18] 23
2.19. Diagrama funcional de la CPU de un PLC [20] 25
2.20. Estructura GRAFCET [21] 26
2.21. Ejemplo básico circuito programado en ladder [22] 27
2.22. Mejor ajuste en prueba escalón para modelos FOPD, SOPDT y TOM. [1] 28
2.23. Simulación y comparación de métodos de sintonización. [2] 30
2.24. Resultados del producto final. [3] 31

3.1. Variador de Frecuencia Schneider [23]. 36
3.2. Transmisor de flujo empleado en la dosificación [24]. 36
3.3. Sistema de cocción. Elaboración Propia 37
3.4. Respuesta temporal. Elaboración Propia 38
3.5. Respuesta temporal modelo inicial. Elaboración Propia 39
3.6. Respuesta al escalón al variar τ. Elaboración Propia 40
3.7. Respuesta temporal sistema con retardo. Elaboración Propia 40
3.8. Respuesta de escalón modelo de segundo orden. Elaboración Propia . . . 41
3.9. Parámetros K,L y T Ziegler-Nichols. Elaboración Propia 42

3.10. Regulador Planteado por Ziegler-Nichols. Elaboración Propia 43
3.11. Respuesta de sistema sintonizado con Ziegler-Nichols. Elaboración Propia 43
3.12. Sistema realimentado con regulador teórico. Elaboración Propia 44
3.13. Sistema realimentado con limitación en la acción de control. Elaboración Propia 45
3.14. Sistema de dosificación del almidón cocinado. Elaboración Propia 45
3.15. Curva de reacción sistema de dosificación. Elaboración Propia 48
3.16. Sistema de segundo orden aproximado. Elaboración Propia 48
3.17. Medición de parámetros para sintonización. Elaboración Propia 49
3.18. Simulación regulador PID flujo. Elaboración Propia 50
3.19. Respuesta simulación regulador PID flujo. Elaboración Propia 50
3.20. Diseño de pantalla general del proceso. Elaboración Propia 51
3.21. Diseño HMI preparación almidón. Elaboración Propia 52
3.22. Secuencia de cocción automática. Elaboración Propia 53
3.23. Implementación secuenciador en ladder. Elaboración Propia 54
3.24. Arranque manual y automática válvula CV-102. Elaboración Propia . . . 54
3.25. Diseño HMI dosificación almidón. Elaboración Propia 55
3.26. Lógica de activación Bomba 2. Elaboración Propia 56
3.27. Cálculo de dosificación en Kg/Ton. Elaboración Propia 56
3.28. Asignación de set point manual automático. Elaboración Propia 57
3.29. Lógica regulador de temperatura de cocción PID. Elaboración Propia . . . 58
3.30. Parametrización regulador de temperatura de cocción PID. Elaboración Propia 58
3.31. Lógica regulador de dosificación PID. Elaboración Propia 59
3.32. Configuración regulador de dosificación PID. Elaboración Propia 60
3.33. Pantalla de acceso a configuración de parámetros PID. Elaboración Propia 60
3.34. Pantalla de configuración de parámetros PID. Elaboración Propia 61
3.35. Control PID dosificación de almidón. Elaboración Propia 62
3.36. Comparación entre regulador diseñado e implementado. Elaboración Propia 62
3.37. Respuesta del regulador a cambios de consigna. Elaboración Propia . . . 63
3.38. Respuesta del regulador de temperatura. Elaboración Propia 64
3.39. Respuesta del regulador al aumentar el caudal de vapor. Elaboración Propia 64
3.40. Respuesta del regulador al aumentar el caudal de vapor y la ganancia proporcional. Elaboración Propia 65
3.41. PLC en funcionamiento, ventana general del proceso. Elaboración Propia 66
3.42. PLC en funcionamiento, ventana de preparación. Elaboración Propia . . . 66
3.43. PLC en funcionamiento, ventana de dosificación. Elaboración Propia . . . 67
3.44. PLC en funcionamiento, estado de bloque PID temperatura. Elaboración Propia 67

Capítulo 1

Generalidades

1. Planteamiento de problema

La empresa Papeles y corrugados andina S.A es uno de los lideres de la región en la producción de cajas de cartón corrugado, la elaboración del cartón se hace a partir de la unión de papel LK (linner Kraft) y CM (corrugado medio) de diferentes gramajes dependiendo de las necesidades de resistencia de los clientes, la producción del papel se realiza en 3 grandes etapas: la primera etapa es conocida como preparación de pasta en donde se realiza la transformación de la materia prima (cartón reciclado) en fibra con las características físicas necesarias, la segunda etapa es la formación del papel, en donde se agregan los aditivos necesarios para realizar el enlace entre fibras y se da forma y peso al papel, por último se realiza el secado, en donde se lleva el material desde un contenido de humedad del 94 % hasta el 5 % final.

Uno de los principales aditivos en la formación de papel Kraft en la planta es el almidón de maíz, el cual proporciona un refuerzo de las uniones interfibra de la pulpa de celulosa [25], la correcta preparación y dosificación de éste cumplen un papel fundamental en la calidad del producto final, evaluadas con pruebas de laboratorio (Ensayo por aplastiento de anillo ó Ring-Crush test (RCT) y Ensayo de compresión en el plano de un pápel corrugado medio Concora Medium Test (CMT) [26]) Sin embargo, Actualmente este proceso se realiza en su mayoría de manera manual, basado en la experiencia del operario de producción.

El proceso de cocción de este aditivo debe realizarse de manera exacta en proporciones y procedimientos para lograr que el almidón aporte las propiedades deseadas al papel, sin embargo, esta preparación requiere elevar la temperatura de un gran volumen de mezcla usando vapor saturado, lo que aumenta la exposición del operario a altas temperaturas o posibles quemaduras.

La dosificación ineficiente del almidón y las malas prácticas en la preparación del mismo tienen como consecuencia varios problemas, algunos de ellos son: baja adherencia de las fibras de pulpa en la formación del papel, aumento de los costos en la cadena de producción y bajos indicadores de calidad al final de la línea de producción.

Actualmente la preparación se hace de manera manual, el operario encargado debe agregar la cantidad de almidón (generalmente 4 bultos de 25 Kg) y el agua que considere necesaria para su dilución, posteriormente enciende el agitador y abre una válvula de bola manual conectada a la línea de vapor saturado, el operario debe estar vigilando el calentamiento hasta la temperatura de cocción, procurando que la temperatura nunca supere los 100 °C, temperatura a la cual la mezcla hace ebullición y se expande hasta el punto de regar el almidón (similar al efecto de la leche hirviendo).
Uno de los indicadores más importantes dentro de la compañía para la medición de la productividad es el tiempo perdido (en minutos) durante el mes, como se puede apreciar en la Tabla 1.1 (Extraída de la estadística de la empresa) existen múltiples factores que provocan una parada de la producción, el tiempo mayor hace referencia a piques y reventones los cuales son cortes en el papel producidos por baja resistencia de la unión de las fibras, zonas de mayor humedad o baja calidad de secado, en este proyecto se plantea una mejora que reduzca la cantidad de tiempos perdidos por reventones y piques debidos a la mala formación, el cual es el responsable del 27 % de los minutos perdidos, tomando como referencia el mes de marzo de 2023.

Tomando como base lo mencionado anteriormente se plantea como pregunta de investigación ¿Qué tecnologías de automatización y modelos de control son aplicables y cumplen con los requisitos para aumentar la eficiencia del proceso de preparación de almidón y estandarizar su dosificación tomando como base la velocidad de la máquina y el gramaje del papel en producción?

Tiempo Perdido en producción Marzo 2023	
Concepto	***Tiempo [min]***
Mugre y Lodos	165
Frenado vestiduras	355
Piques y reventones	1298
Corte energia Enel	155
Fallo de operación	744
Daño eléctrico	172
Daño mecánico	1762
Fallas sistema de vacío	120
Total	4771

Tabla 1.1: Tiempo perdido en producción. Elaboración Propia

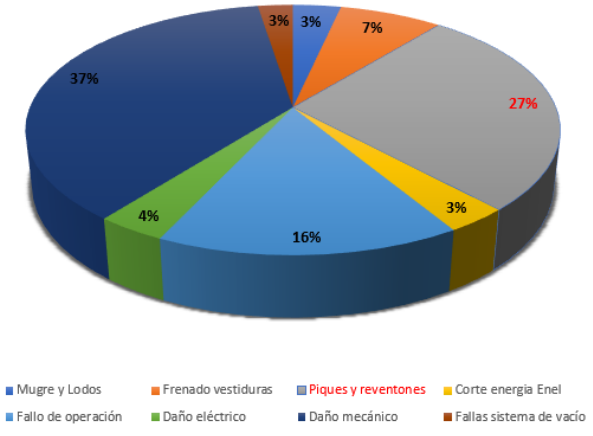


Figura 1.1: Tiempos perdidos de producción. Elaboración Propia

2. Justificación

Investigativa

A lo largo de este proyecto se incursionará en la selección de tecnologías enfocadas a la automatización industrial que sean aplicables a este proceso, además de métodos de identificación de sistemas y técnicas de control.

Académica

Con el planteamiento de este proyecto se busca fortalecer conocimientos en el área de la instrumentación industrial, análisis de sistemas industriales, control y programación PLC, además, aplicarlos de manera práctica mediante un proyecto de automatización enfocado a la industria productora de papel kraft para la fabricación de cartón.

Económica

Como se mencionó en el planteamiento del problema, la mala dosificación y preparación del almidón acarrea pérdidas económicas a la compañía tanto en materia prima (almidón de maíz) como en tiempo de producción (minutos perdidos por mala formación del papel), este proyecto busca aumentar la eficiencia en este proceso con el fin de reducir costos de producción.

Social

Se busca mitigar el riesgo del operario de control procesos, reduciendo al mínimo el tiempo de exposición a energías peligrosas (cualquier tipo de energía en cantidad suficiente para causar lesión a un trabajador) que acarrea este proceso de producción, como lo son: vapor, Agua y aire a alta presión, además, la preparación adecuada de esta mezcla puede disminuir de manera considerable el material de desperdicio producido en este proceso.

Ambiental

Al aplicar métodos de control al sistema de calentamiento de la mezcla (vapor de agua), se puede utilizar de manera eficiente este recurso, disminuyendo la exigencia de la caldera lo que acarrea una menor quema de carbón, mitigando el impacto ambiental de la compañía.

Además, como se mencionó anteriormente, la automatización de este proceso, aumenta la eficiencia en el uso de recursos (agua, vapor, aire comprimido), lo que se traduce en menor gasto energético para su producción o tratamiento.

Personal

El planteamiento de este proyecto busca fortalecer las habilidades del autor en el área de la ingeniería enfocada a la automatización industrial, Buscando impactar de manera positiva la producción de la compañía Papeles y Corrugados Andina S.A

3. Objetivos

3.1. General

Diseñar e implementar un sistema automático de cocción y dosificación del almidón de maíz en la formación del papel kraft, adaptable a las diferentes velocidades de producción de la compañía Papeles y Corrugados Andina S.A.

3.2. Específicos

1. Realizar el estudio y dimensionamiento de los elementos finales de control e instrumentación asociados a la automatización del proceso.

2. Identificar el modelo del sistema dinámico asociado al calentamiento de la mezcla de almidón con vapor.

3. Implementar un controlador de lazo cerrado que reduzca el tiempo de estabilización de la temperatura de cocción.

4. Calcular el caudal eficiente de dosificación de almidón e implementar un controlador de lazo cerrado adaptable a diferentes velocidades de producción.

5. Realizar la programación de la secuencia de cocción y dosificación del almidón en un controlador PLC.

6. Realizar la verificación y validación del prototipo del sistema de automatización implementado.

Capítulo 2

Marco referencial

1. Marco teórico

1.1. Producción del papel kraft

1.1.1. Características de la materia prima usada en la producción de papel kraft

La estructura básica de la pasta y el papel es un entramado de fibras de celulosa (un polisacárido con 600 a 1.000 unidades de sacarosa) unidas mediante enlaces de hidrógeno. Una vez separadas del resto de componentes no celulósicos, mediante el proceso de elaboración de la pasta de papel, estas fibras tienen alta resistencia a la tracción, absorben los aditivos empleados para transformar la pasta en papel y cartón [27].

La principal fuente de fibra para la fabricación de pasta y de papel es la madera de coníferas y de especies arbóreas de hoja caduca. La mayor parte de la pasta se hace de fibra virgen, sin embargo la producción de papel a partir de fibras recicladas es cada vez mayor, El papel reciclado se puede retransformar en pasta en un proceso relativamente suave, que utiliza agua y a veces NaOH (Hidróxido de sodio). Los pequeños trozos de metal y de plástico se separan durante o después de la reconversión en pulpa, utilizando detritus sedimentados, ciclones o centrifugación. [27].

Las fibras de la pasta de papel reciclado son generalmente más cortas, menos flexibles y menos permeables; por consiguiente, no pueden utilizarse en productos de papel de alta calidad, por esta razón algunas papeleras emplean un surtido de diferentes pastas para optimizar la calidad del papel (p. ej., una mezcla de madera dura, madera blanda, kraft, sulfito, pasta mecánica o reciclada)

1.1.2. Fases de procesamiento de la pulpa

1.1.2.1. Preparación de pasta La pasta se prepara en un sistema hidro-desintegrador llamado pulper, donde se mezcla agua con la pulpa de papel.
Al añadir la pulpa de papel proveniente de la madera o de la preparación con papel reciclado, comienza el proceso de disgregación de fibras, primero por el impacto al caer la pulpa, después por el rozamiento de la hélice con la pasta y finalmente por el rozamiento

de las mismas fibras entre sí. Al salir del pulper pasa por un tamiz que impide el paso de fragmentos grandes.

1.1.2.2. Limpieza de la pasta La limpieza de la pasta se realiza con una amplia variedad de equipos que remueven los distintos contaminantes que están presentes en el proceso, esta limpieza se puede realizar por separación de tamaño o de densidad, en los primeros se encuentran los tamices, los cuales pueden ser ranurados o de agujeros, presurizados o no, en estos dispositivos la pulpa es obligada a pasar por el tamiz, rechazando las partículas de tamaños no deseados, por otro lado se tienen los limpiadores centrífugos, en los cuales se eliminan contaminantes de menor densidad (plástico, polímeros, cintas adhesivas, etc) y de mayor densidad (piedras, ganchos, viruta metálica, etc).

Por lo general, en las plantas de producción se emplean todos los mencionados anteriormente de manera progresiva, en donde primero se eliminan los contaminantes gruesos a la salida del pulpeo, luego una etapa de tamizado fino y por último una limpieza centrífuga.

1.1.2.3. Refinación: La refinación es un proceso mecánico que se aplica a las fibras de pulpa, mediante la cual estas logran las características necesarias para la producción de papel y cartón, durante este proceso se producen dos tipos de efectos sobre la fibra: los efectos primarios, que corresponden a la fibrilación externa, fibrilación interna, formación de finos y acortamiento de fibras. Los efectos secundarios, que corresponden a los cambios producidos como consecuencia de los efectos primarios, como por ejemplo flexibilidad, volumen específico y resistencia mecánica.
La refinación disminuye la Drenabilidad de la pulpa, por lo que una pulpa a medida que se refina va presentando un menor freeness (el cual se define como la tasa de drenaje de una suspensión de pulpa diluida y la expresa en términos de pureza). El grado de refino es entonces medido a través del Canadian Standard Freeness (CSF) y de las propiedades de resistencia de hojas formadas con la pulpa refinada [28].

1.1.3. Formación del papel kraft

En esta sección se controlan las características físicas y químicas de la pasta antes de ingresar a la máquina de formación del papel, la dosificación de la química (Agente de retención de solidos, Barredor de carga) y los aglutinantes (almidón, Agente encolador) se realiza en función de los resultados de las pruebas de resistencia del papel realizados en el laboratorio, cada uno de los químicos requiere un tratamiento particular, en el caso del almidón de maíz se debe pasar por un proceso de preparación (cocción) y maduración para que esté listo para su aplicación.

La máquina de formación de papel se encarga de distribuir uniformemente la pulpa con baja consistencia (entre 1 y 3 %) y de extraer el agua. La forma en la que se realiza esta operación definirá que tipo de papel se fabrica y que propiedades físicas tendrá. Para formar la hoja a partir de materiales fibrosos deben realizarse dos funciones esenciales: repartir y crear enlaces.

el agua es indispensable para la formación de enlaces de puente de hidrógeno que confieren al papel sus características. Por otra parte, el establecimiento de estos enlaces necesita de una aproximación de las fibras a distancias muy cercanas. Esta aproximación se obtiene por medio de tensiones interfaciales desarrolladas por el agua y su intensidad es inversamente proporcional a la cuarta potencia del espesor de la capa líquida. Ninguna presión mecánica ejercida desde el exterior permitiría obtener este resultado. El agua, por otra parte, hincha la fibra de celulosa y la plastifica, confiriéndole una flexibilidad necesaria para la formación de la hoja.

La máquina formadora está compuesta de manera general por dos secciones, la caja de entrada y la tela, la caja de entrada es la encargada de distribuir la masa fibrosa en todo el ancho de la maquina, a un flujo con volumen constante (chorro), la calidad del chorro a la salida de la caja de entrada es de una importancia primordial en lo que refiere a la formación de la hoja. El campo de velocidad en el chorro debe ser uniforme, sin corrientes transversales o turbulencia en la que la escala sea demasiado grande en relación a su espesor. Debe ser liso y su velocidad debe ser sensiblemente igual a la de la tela.

El agua es drenada de la pasta en una tela en la que se forma la hoja húmeda. En principio el desgote (Proceso en el cual se drena el agua aplicando presión o extendiéndolo sobre la tela) puede ser por diferentes métodos, filtración o espesado. Cuando toda la pasta ha sido drenada, el desgote remanente se realiza como un proceso de espesado, lo cual significa una progresiva compresión de la red fibrosa. El desgote de los flóculos de fibras que permanecen en la pasta también se realiza mediante el principio de espesado.

1.1.3.1. Prensado: Una vez formada la hoja de papel, la eliminación del agua continúa en la sección de prensado de la máquina de papel. La hoja de papel, todavía con un alto contenido de agua, atraviesa una serie de grandes rodillos de acero que la comprimen, expulsando así una mayor cantidad de agua. La hoja de papel se sujeta a modo de "sándwich" entre capas de fieltro absorbente al pasar por entre los rodillos. Al final de la sección de prensado, el grado de sequedad se sitúa sobre el 40-50 %. La hoja de papel ya puede sostenerse por sí misma.

En la sección de prensado, la hoja es transportada a través de una serie de prensas donde se elimina gran parte del agua y se consolida la hoja (la fibras son forzadas a un contacto íntimo) para facilitar la operación de secado. El prensado húmedo se realiza haciendo pasar la hoja, en contacto con un fieltro, entre dos rodillos. [29]

1.1.3.2. Secado: La sección de secado consta de una serie de cilindros (secadores) calentados mediante vapor saturado, estos se encargan de transferir calor a la hoja de papel por conducción, el vapor que se condensa se drena y se usa en otros procesos, Los cilindros se disponen de modo que contactan primero con un lado del papel y luego con el otro para garantizar su homogénea deshidratación.

1.1.3.3. Calandrado: El papel pasa por una calandria satinadora que consta de una serie de rodillos de acero que presionan ambos lados del papel para alisar las fibras de la

superficie exterior. Al final, el grado de sequedad es del 90-95 %, dependiendo del tipo de producto elaborado.

1.1.4. Propiedades físicas del papel

1.1.4.1. Gramaje: El gramaje o peso base, es la cantidad de fibra en una hoja de papel o de cartón por m^2 y se expresa en términos de peso por unidad de área (g/m^2), le medición de esta magnitud generalmente se realiza en pruebas de laboratorio con ambiente controlado, y durante el proceso con técnicas de transmisión de radiación beta [26].

1.1.4.2. Calibre: El calibre representa la distancia perpendicular entre las caras principales de un papel o cartón, se expresa en unidades de longitud. La determinación de esta magnitud puede llegar a presentar inconvenientes debido a las irregularidades superficiales y a la compresibilidad que puede llegar a tener el papel o cartón [26], sin embargo, en la norma "TAPPI 411"se establece que la medición de esta propiedad en estructuras fibrosas se debe realizar con un micrómetro de peso muerto, al cual se le aplica un peso fijo de $50kPa$ en un área determinada, con una velocidad de carga conocida.

1.1.4.3. Densidad En el caso del papel y el cartón, la densidad puede variar entre 300 y 1000 Kg/m^3. Las diferencias en las propiedades mecánicas del papel en este intervalo de densidades son considerables. La posibilidad en la industria del papel de controlar esta magnitud está relacionada con el control de calidad del producto terminado, ya que esta magnitud se ve influenciada de manera considerable por el tipo de fibra, y por las variables de producción en el lote como: la separación de la fibra, la refinación, la presión en el prensado, el secado y el calandrado. Se calcula como el gramaje divido por el espesor promedio de una hoja (t) o de una pila de hojas de papel , $\rho = w/t[kg/m^3]$.

1.1.4.4. Contenido de Humedad: El contenido de humedad es una magnitud que representa la cantidad de agua físicamente absorbida en la estructura del papel, y se obtiene como un porcentaje del peso del material seco. La medición de esta magnitud según la norma "TAPPI 412"se determina por la diferencia entre el peso del papel con unas condiciones de temperatura y humedad relativa constantes y el peso del papel, obtenido cuando este se seca a $105 \pm 2°C$ hasta peso constante.

Cuando el papel entra en contacto con el agua, o materiales húmedos, se rompen enlaces de hidrógeno entre las fibras y son reemplazados por enlaces de hidrógeno con el agua, por esta razón, la resistencia mecánica de una hoja de papel disminuye de manera proporcional al aumento de humedad.

1.1.4.5. Capacidad de absorción de agua Esta propiedad se determina debido a que se presentan situaciones en las cuales el papel entra en contacto con el agua, esto puede suceder de forma controlada (como cuando se aplican adhesivos de base de agua o recubrimientos) o de una forma no planeada (debido al ambiente, o a los productos que se almacenen).

La capacidad de absorción de agua en el papel se puede reducir de dos maneras: con recubrimiento de las fibras, agregando un material repelente al agua en la etapa de preparación de pasta, o usando un recubrimiento externo luego de la producción. El método más simple y efectivo para medir la capacidad de absorción de agua de una superficie plana es usando el método de Cobb, el cual se encuentra especificado en las normas "TAPPI T441", en donde se debe considerar el peso del agua absorbida después de un tiempo de exposición al agua en un área determinada.

1.1.5. Pruebas de resistencia mecánica

Existen diferentes estándares y protocolos para evaluar la resistencia mecánica a compresión del papel y el cartón, entre ellos las normas: “TAPPI 818”, “TAPPI 824”, “TAPPI 826”, “ISO 122192”, entre otras. Estos métodos de ensayo que se emplean para medir la resistencia a la compresión de cartones lisos y corrugados tienen una amplia dependencia del dispositivo de ensayo, las dimensiones de la pieza sometida, y del método de preparación de la pieza y el instrumento del ensayo. La mayoría de pruebas se realiza con una tira de ensayo de 12.7 mm de ancho y 152 mm de largo, algunos de estos ensayos son:

1.1.5.1. Ensayo de compresión de la tira corta (SCT) En este método, la muestra de papel se coloca entre dos mordazas con una longitud libre de sujeción de 0.7 mm, cuando las mordazas se acercan entre sí, se reduce la longitud y se incrementan los esfuerzos en la muestra; dado que la muestra es corta en relación a su espesor, la relación de esbeltez es baja y se impide el alabeo, en consecuencia, el colapso se produce debido únicamente a la compresión de las fibras, este ensayo permite cuantificar la resistencia interna a la compresión del papel.

1.1.5.2. Ensayo de compresión de la tira recta (CLT) Esta técnica permite determinar la resistencia a compresión de papeles no corrugados (liners); para realizar el ensayo, la muestra se sujeta de manera vertical con un sujetador, sin embargo esta técnica presenta el inconveniente de que el borde superior de la prueba de ensayo permanece libre contra el plato superior, ocasionando que la muestra se doble en el borde.

1.1.5.3. Ensayo por aplastamiento de anillo (RCT) Esta técnica mide la resistencia a compresión en canto de papeles con un espesor comprendido entre 0.27 y 0.5 mm. Para realizar esta prueba se coloca la muestra en forma de anillo sobre un porta muestra ubicado entre los dos platos del equipo, luego el plato superior se acerca al plato inferior a una velocidad específica, hasta que la muestra colapsa, resultando un nivel de fuerza que se denomina nivel de aplastamiento del anillo.

1.1.5.4. Método cóncora de aplastamiento lateral (CCT) Esta técnica se emplea para la caracterización a compresión de los papeles a corrugar. Este método involucra la ondulación de la muestra en un ondulador de laboratorio, tras lo cual se sujeta verticalmente en un porta muestra que tiene el mismo perfil que los rodillos del ondulador, sin embargo esta técnica presenta el inconveniente de que la resistencia a compresión del material puede verse afectada por el calentamiento y el moldeado en el ondulador.

1.1.5.5. Ensayo de compresión en el plano de un papel corrugado medio (CMT)

Esta técnica permite determinar la resistencia a la compresión de una hoja corrugada de papel CM cuando se le aplica una fuerza perpendicular al plano del corrugado, esta prueba sirve además para determinar la magnitud de un factor usado para el cálculo de la resistencia a la compresión de los cartones corrugados.

1.2. Dispositivos de medición y control

1.2.1. Variadores de velocidad VDF

Definición Un variador de frecuencia es un sistema compuesto por circuitos electrónicos, que permite el control de velocidad de un motor eléctrico de corriente alterna, a través de la variación de la frecuencia y el voltaje, en la Figura 2.1 se puede apreciar el diagrama de bloques general de un variador de velocidad.

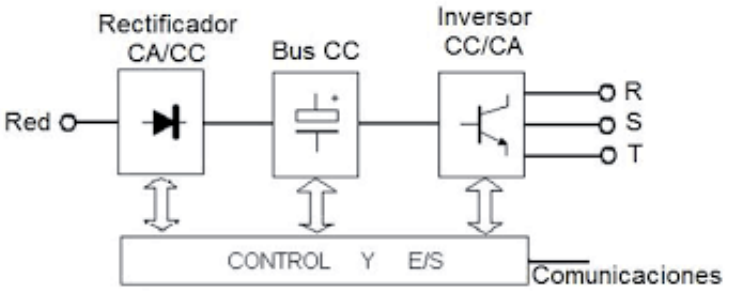


Figura 2.1: Diagrama de bloques variador de velocidad [6]

Como se puede apreciar en la Figura 2.1, el funcionamiento general se compone de 3 bloques principales, el primero es de **Rectificación**, en esta fase la señal trifásica de entrada ingresa a un rectificador trifásico que puede ser controlado/semi-controlado/no controlado, esto depende del fabricante, a la salida de este bloque se obtiene una señal únicamente positiva, con un rizado.

El segundo bloque **tensión de bus CC** representa la conversión a corriente continua, en este paso, la señal con rizado de la sección anterior se le aplica un filtro pasabajos, con el fin de obtener una señal continua con un bajo rizado, la selectividad del filtro depende de la magnitud de los condensadores utilizados.

En el tercer bloque **Inversor** se realiza la conversión de corriente continua a alterna, esto se hace controlando la activación de transistores de potencia en la señal continua, con el fin de tener una señal PWM, en la cual el ciclo útil varía de manera senoidal, con la frecuencia y amplitud deseada

En el bloque de **Control Y E/S** se realiza el control de comunicaciones, el control de disparo de los transistores de acuerdo a la configuración y el método de control aplicado (en lazo abierto, lazo cerrado), también se realiza el control de activación del puente rectificador, y las entradas y salidas analógicas y digitales del dispositivo. En la Figura

2.2 se observa la relación entre el par motor (torque), y la velocidad de un motor trifásico asíncrono.

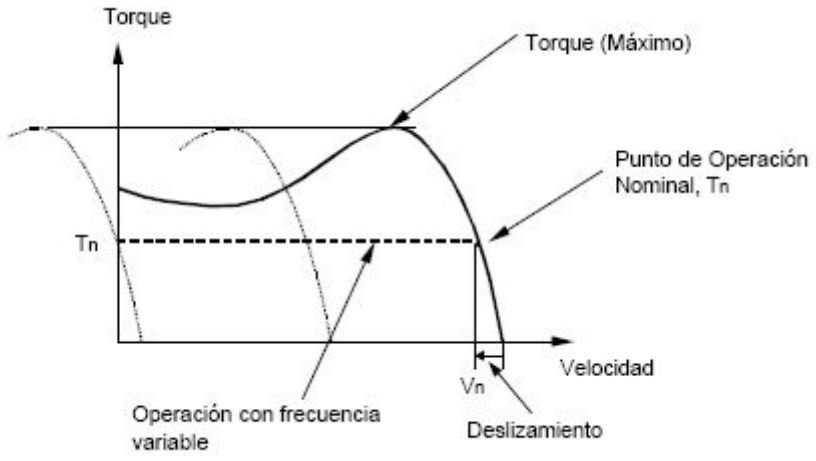


Figura 2.2: Curva característica velocidad vs torque de un motor [7]

Según la Gráfica 2.2 se puede apreciar qué:

1. Si se reduce la frecuencia, es necesario reducir la tensión o de lo contrario el flujo magnético será demasiado elevado y el motor se saturará, por este motivo se hace necesario controlar la tensión también.

2. Si se eleva la frecuencia por encima del valor nominal del motor, se necesitará ´más tensión para mantener el flujo magnético, usualmente esto no se puede realizar por la limitación de la fuente de alimentación, por esa razón, a una velocidad mayor a la nominal se tendrá menor torque disponible, esto es útil para aplicaciones en las cuales se requiera altas velocidades pero bajo torque, como por ejemplo una sierra de corte.

1.2.2. Válvulas de control

Una válvula se puede definir como un aparato mecánico con el cual se puede controlar el caudal de un fluido [30], mediante el movimiento de una pieza que cierra y obstruye de forma parcial o total el paso del fluido.

La característica de un fluido incompresible fluyendo en condiciones de presión diferencial constante a través de la válvula se denomina **Característica de caudal inherente** [30] y se representa usualmente en un gráfico en el cual el eje coordenado x es la apertura del obturador y en el eje y, el porcentaje de caudal máximo bajo presión diferencial constante, las curvas características más comunes se pueden apreciar en la Figura 2.3, en el cual se puede apreciar el comportamiento de las válvulas isoporcentauales, lineales y de apertura rápida.

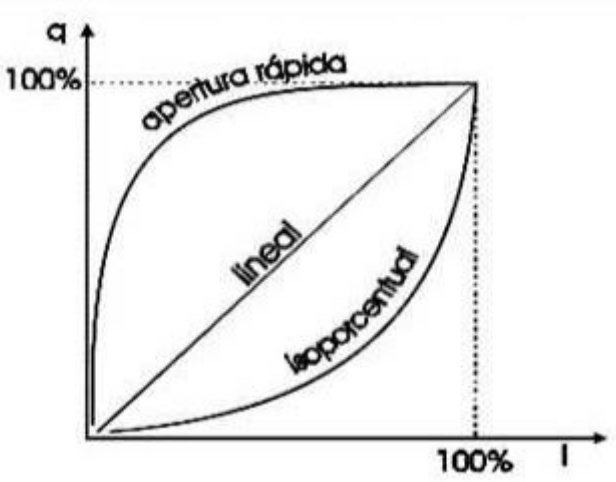


Figura 2.3: Curva característica de caudal inherente [8]

Como se pude apreciar en la Figura 2.3, las válvulas de apertura rápida no son útiles para la regulación de flujos debido a que la mayor parte de la variación del caudal se realiza en el primer tercio de apertura de la válvula, por esta razón es más común verlas en aplicaciones de alivio y sistemas de control todo-nada (on/off). Los cuerpos de válvulas de control más comunes en el mercado son:

1.2.2.1. Válvula de compuerta: Posee un cuerpo totalmente encerrado con un disco o una puerta rectangular, la cual se mueve de forma perpendicular al caudal, la válvula de compuerta es ideal cuando se requiere circulación interrumpida y poca caída de presión, además de baja resistencia a la circulación, sin embargo, algunas de sus desventajas son: control deficiente de la circulación, gran cantidad de fuerza para accionarla, erosión del asiento y disco.

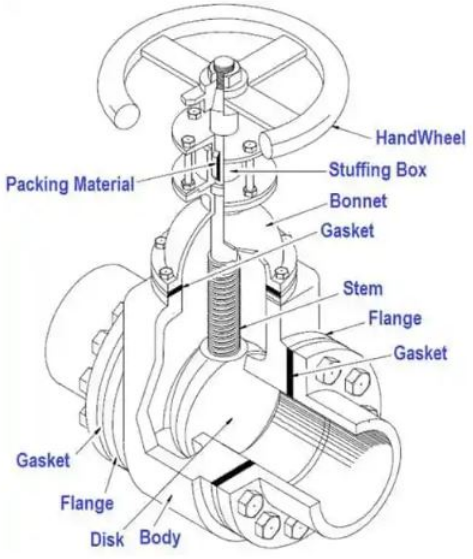
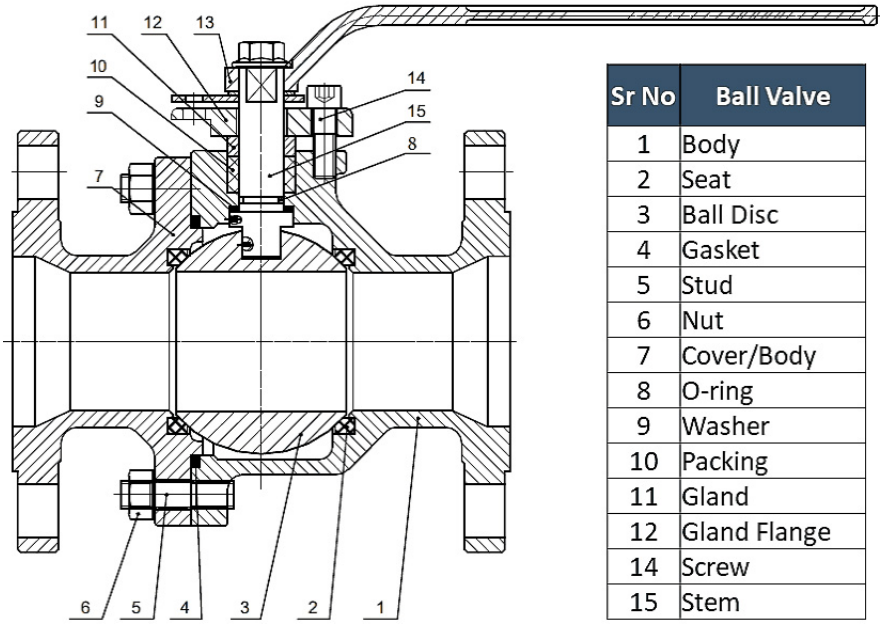


Figura 2.4: Partes de una válvula de compuerta [9]

1.2.2.2. Válvula de bola o esfera: Es usada principalmente para cortar, distribuir y cambiar la dirección del flujo medio en la tubería, la cavidad del cuerpo de la válvula completamente igual proporciona un canal de flujo directo con poca resistencia para el fluido, la mayoría de las válvulas de bola son de acción rápida [10], requieren un giro de 90° del eje para operar la válvula, en caso de una válvula de gran tamaño se puede emplear un reductor operado con engranajes para disminuir la fuerza aplicada, algunas de las desventajas de su uso son: mala regulación de flujo, susceptibles al desgaste del asiento y las juntas, debido a su apertura y cierre rápido pueden generar golpe de ariete, en aplicaciones con alto porcentaje de solidos, estos pueden asentarse generando fallos en la válvula.



Sr No	Ball Valve
1	Body
2	Seat
3	Ball Disc
4	Gasket
5	Stud
6	Nut
7	Cover/Body
8	O-ring
9	Washer
10	Packing
11	Gland
12	Gland Flange
14	Screw
15	Stem

Figura 2.5: Partes de una válvula de bola [10]

1.2.2.3. Válvula de globo: Es un tipo de válvula de movimiento lineal, se utiliza para iniciar, detener o regular un fluido. Durante la apertura y el cierre de la válvula de globo, el disco se mueve perpendicularmente al asiento (Gráfica 2.6), este movimiento crea el espacio anular entre el disco y el anillo de asiento que se cierra gradualmente a medida que se va cerrando la válvula, debido a esto, este tipo de válvula tiene una muy buena regulación del caudal, se pueden construir de manera en que el disco se cierre en la misma dirección del flujo o en contra, esto con el fin de aprovechar la energía del fluido para ejecutar un cierre o apertura de manera rápida respectivamente [11]. algunas de sus ventajas son: valida para uso frecuente, poco desgaste del asiento y el disco, operación más rápida que la válvula de compuerta por su carrera más corta, son excelentes para regular el caudal si se usa un actuador automático.

Sr No	Globe Valve
1	Body
2	Bonnet
3	Disc
4	Disc nut
5	Body seat ring
6	Stem
7	Back seat
8	Gland follower
9	Gland flange
10	Yoke nut
11	Handwheel
12	Handwheel nut
13	Stud bolts
14	nuts
15	Stud bolts
16	nuts
17	Bonnet gasket
18	Packing

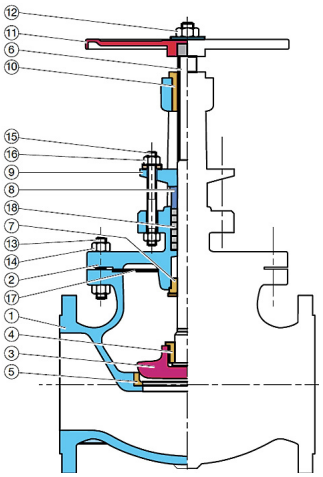


Figura 2.6: Partes de una válvula de globo [11]

1.2.2.4. Válvulas de mariposa: Una válvula de mariposa es una válvula de movimiento giratorio de un cuarto de vuelta que se utiliza para iniciar, detener o regular el flujo. Las válvulas de mariposa son de apertura y cierre rápido. Se requiere un movimiento de 90° para abrir o cerrar completamente este tipo de válvula, son adecuadas para aplicaciones que requieran grandes magnitudes, debido a su diseño compacto y liviano, tienen poca pérdida de carga, y los costos de mantenimiento son bajos en comparación con otro tipo de válvula [10], sin embargo, no son útiles para la regulación de flujo, además existe la posibilidad de cavitación y estrangulamiento ya que el disco siempre está en medio del flujo.



Figura 2.7: Partes de una válvula de mariposa [10]

En la industria, es común encontrar válvulas manuales y automáticas, en las cuales el cuerpo y el modo de funcionamiento es idéntico, y lo único que cambia es el **actuador**, este

puede ser neumático, eléctrico o hidráulico, siendo los dos primeros los usados con mayor frecuencia, aproximadamente el $90\,\%$ son neumáticos, estos actuadores se componen de un diafragma, un vástago y un resorte, lo que se busca en los actuadores neumáticos es que de acuerdo a una presión de entrada se obtenga una determinada posición en el vástago. De manera estándar se usa una presión de 3 a 15 Psi, esto se logra ajustando el área del diafragma y la constante del resorte, de tal manera que un cambio de 15 psi, produzca un desplazamiento en el vástago del $100\,\%$ de la carrera

1.2.3. Sensores Resistivos

Los sensores son dispositivos capaces de detectar el cambio en una variable física, dicha variable puede ser: calor, movimiento, humedad, presión, deformación, entre muchas otras variables, en la salida generalmente se tiene una variación en una magnitud eléctrica (resistencia, inductancia, capacitancia), de la cual, luego de un acondicionamiento de señal, se obtiene una señal de voltaje o corriente, en el rango de valores que se desee.

Los sensores resistivos son aquellos cuyo principio físico de funcionamiento, es la variación de la resistencia eléctrica a un cambio en la variable de entrada, los más comunes son:

1.2.3.1. Potenciómetros En estos la resistencia es función del desplazamiento de un elemento móvil, los potenciómetros pueden ser lineales, logarítmicos, antilogarítmicos, senoidales, etc, En la Figura 2.8, se puede apreciar el comportamiento de la salida con cambios en la entrada.

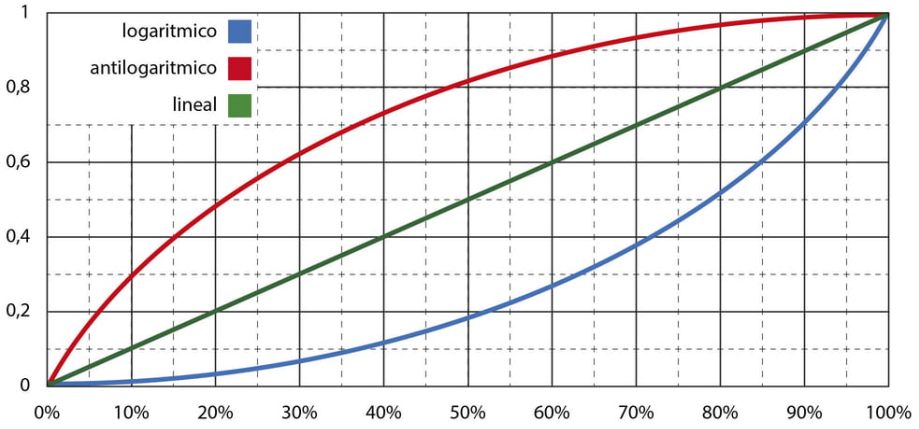


Figura 2.8: Curva Desplazamiento Vs Salida en diferentes potenciómetros [12]

1.2.3.2. Galgas extensiométricas Estas funcionan bajo el principio de piezorresistividad, en el cual, la resistencia de un material varía cuando se le somete a un esfuerzo mecánico que los deforma, la deformación que se puede producir en la galga no debe estar fuera del régimen elástico, por esta razón no se debe exceder el 1 % de la longitud de la galga [13], comercialmente es común ver las galgas extensiométricas en celdas de carga,

que son dispositivos que acondicionan la señal, un ejemplo de esto se puede apreciar en la Figura 2.9, en donde se hace el acondicionamiento con un puente de Wheatstone y se usa una galga de compensación para eliminar el error producido por la temperatura.

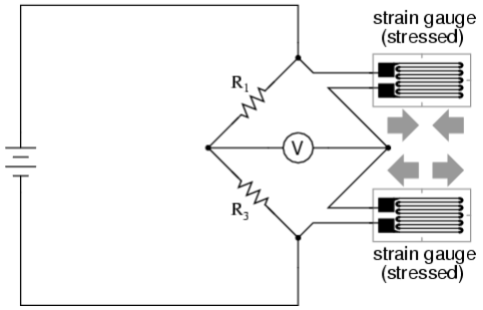


Figura 2.9: Acondicionamiento de una galga extensiométrica usando puente de Wheatstone [13]

1.2.3.3. Sensores de temperatura RTD Son sensores que cambian su resistencia eléctrica con variaciones en la temperatura, generalmente se construyen de platino, níquel o cobre, ya que estos materiales tienen un coeficiente de temperatura positivo, esto quiere decir que con un aumento de temperatura se produce un aumento de la resistencia, el material del que se elaboren dichos RTDs dependerá de las necesidades de la aplicación (resistencia a la corrosión, rango de funcionamiento, linealidad, etc), en el sector industrial, el sensor más habitual de este tipo es el construido en platino (PT*X*, en donde *X* es el valor de resistencia a 0 °C), en la Figura 2.10 se puede apreciar la curva característica para 3 sensores comunes de Platino, Níquel y Cobre.

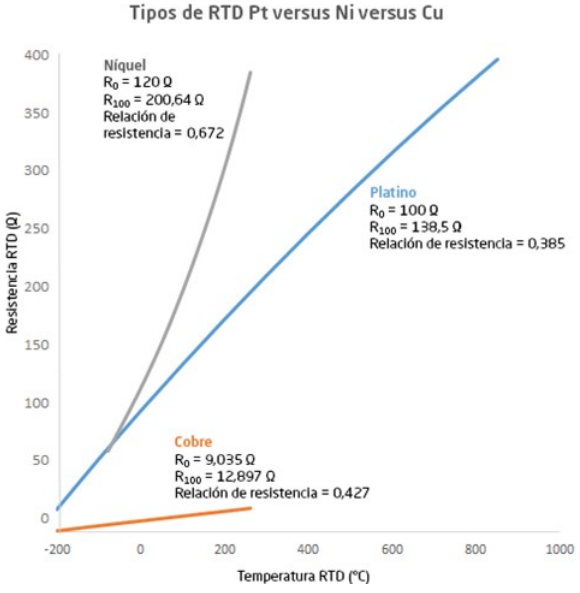


Figura 2.10: Curva característica de sensores RTD de diferentes materiales [14]

1.2.3.4. Termistores Son dispositivos semiconductores cuya resistencia varía fuertemente con la temperatura (de manera no lineal), si su variación es positiva se conocen como PTC, por el contrario si su resistencia disminuye con la temperatura, son NTC, al tener una elevada sensibilidad al cambio de temperatura hace que el termistor resulte muy adecuado para mediciones precisas de temperatura en rangos pequeños, usándose ampliamente para aplicaciones de control y compensación, en la Figura 2.11 se puede apreciar la curva característica de los termistores PTC y NTC comparados con los RTD.

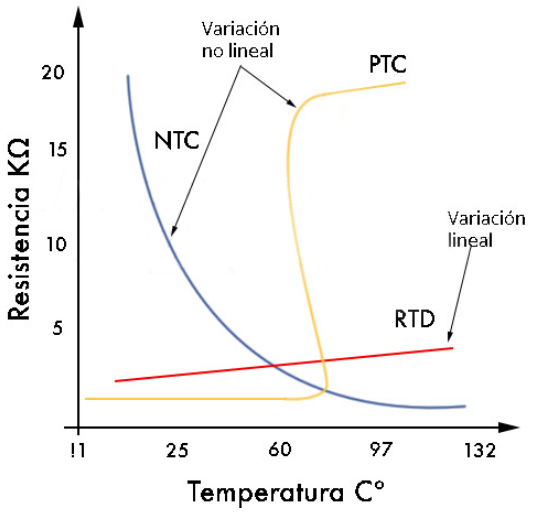


Figura 2.11: Comparación curva característica de sensores PTC, NTC y RTD [15]

1.2.3.5. Fotorresistores LDR Los LDR o resistencias dependientes de la luz, son sensores resistivos basados en semiconductores empleados para medida y detección de radiación electromagnética, en este tipo de sensor, cuando la luz incide en su superficie en forma de radiación aplica energía que libera electrones del material volviéndolo más conductor, por esta razón cuanto mayor sea la luz que incide al cuerpo del sensor menor será su resistencia.

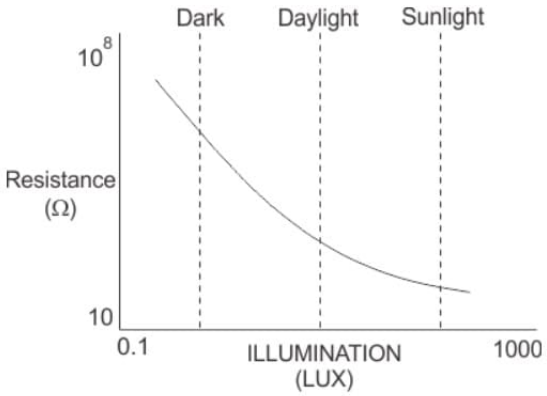


Figura 2.12: Curva característica Fotorresistores LDR [16]

1.2.4. Sensores capacitivos

Son aquellos en los cuales un cambio en la variable física se ve reflejado en un cambio en la capacitancia de un elemento, estos cambios se pueden provocar modificando de alguna manera las variables que afectan la capacitancia, algunos ejemplos del cambio en estas variables son:

1. Variación en la constante dieléctrica moviendo el material dieléctrico que se encuentra entre las placas paralelas, esto produce un cambio lineal en la capacitancia.
2. Variación en la distancia de separación de las placas paralelas, esto produce un cambio inversamente proporcional en la capacitancia.
3. Sensores capacitivos de tres placas en los que se varía la posición de la placa del medio, al acercarse a una de las placas fijas, se aleja de la otra, produciendo un cambio de capacitancia contrario, esta técnica es común en sensores de presión y acelerómetros.

1.2.4.1. Sensores capacitivos de proximidad: Este tipo de sensores no está diseñado para entregar una señal continua de la distancia, sino que simplemente se activa ante la presencia cercana de un objeto, esto se logra usando un capacitor cuya capacitancia se ve afectada cuando un objeto entra dentro del campo magnético que este genera [17], esto es posible siempre que el objeto que se acerque tenga una constante dieléctrica superior al aire, por esta razón son capaces de detectar objetos metálicos y no-metálicos. El capacitor que forma el sensor está conectado a un circuito resonante, de forma que al aumentar la capacitancia, el circuito entra en resonancia y este pasa por una etapa de acondicionamiento en la cual se define el nivel de disparo en el que la señal cambia de nivel para indicar la presencia de un objeto, como se aprecia en la Figura 2.13.

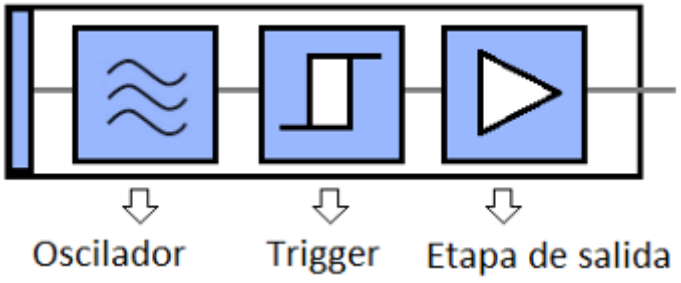


Figura 2.13: Esquema de un sensor de proximidad capacitivo [17]

1.2.5. Sensores inductivos:

Los sensores inductivos son aquellos en los que la variable de medida produce un cambio de inductancia en el dispositivo sensor, sin embargo, estos son menos habituales que los sensores capacitivos ya que los inductores presentan menos parámetros variables que los capacitores, los sensores más comunes de tipo inductivo son:

1.2.5.1. VDT (Linear variable differential transformer) Es un transformador de nucleo abierto y tres devanados, un primario y dos secundarios. Produce un cambio de amplitud de salida proporcional al desplazamiento en una zona muy amplia, aunque no es capaz de identificar el signo.

1.2.5.2. Sensores de proximidad inductivos Su principio se basa en el de la inducción electromagnética. La bobina hace parte de un circuito resonante, cuando un objeto metálico entra en contacto con el campo magnético alterno generado por la bobina se inducen corrientes de Foucault en el objeto, estas a su vez generan un campo electromagnético que produce un decremento en la inductancia de la bobina y en la amplitud de las oscilaciones del circuito resonante. Así, cuando un objeto metálico se acerca al sensor, las oscilaciones se reducen y el sensor cambia de estado, el modelo de estos sensores es similar al de un sensor capacitivo (Figura 2.13)

1.3. Métodos de control

1.3.1. Control de lazo abierto y lazo cerrado

1.3.1.1. Control de lazo abierto: Son sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la entrada, dicho de otra manera, en estos sistemas, no se mide la salida ni se realimenta el sistema con la salida para compararla con la entrada. En este tipo de controladores a cada entrada le corresponde una condición de operación fija, como resultado de esto, la precisión del sistema depende de la calibración, en la práctica, este método de control solamente se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y no hay perturbaciones internas ni externas, es común verlo en sistemas que operen con base en el tiempo (secuencias temporizadas) [18].

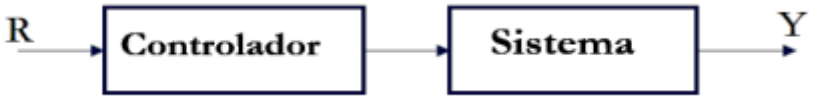


Figura 2.14: Diagrama de bloques de un sistema en lazo abierto [18]

1.3.1.2. Control de lazo cerrado: Un sistema que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina sistema de control realimentado o sistema de control en lazo cerrado, en estos sistemas se alimenta al controlador con la señal de error de actuación (que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación), con el fin de llevar la salida del sistema a un valor deseado, en comparación con el sistema de lazo abierto, en este caso el sistema pierde sensibilidad a las perturbaciones externas y a las variaciones internas del sistema, sin embargo, para su implementación se requiere de una mayor cantidad de componentes, generalmente el dispositivo de realimentación (Sensor, transmisor) es de un alto costo. [18].

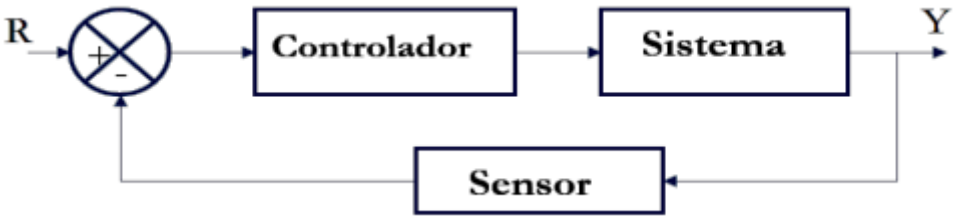


Figura 2.15: Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado [18]

1.3.2. Tipos de controladores

1.3.2.1. Control de dos posiciones o de encendido y apagado (on/off): En un sistema de control de dos posiciones, el elemento de actuación sólo tiene dos posiciones fijas, en la mayoría de casos, encendido y apagado. El control On/Off es relativamente simple y de bajo costo, razón por la cual es altamente usado en sistemas de control domésticos e industriales.

Suponiendo que la señal de salida del controlador es $u(t)$ y que la señal de error es $e(t)$. En el control de dos posiciones, la señal $u(t)$ permanece en dos valores (encendido o apagado) dependiendo de si la señal de error es positiva o negativa, como se puede apreciar en la ecuación 2.1.

$$\begin{aligned} u(t) &= 0 \quad \text{si} \quad e(t) < 0 \\ u(t) &= 1 \quad si \quad e(t) > 0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Es común que los controladores de dos posiciones sean dispositivos eléctricos, siendo usada ampliamente la válvula operada por solenoides, o controladores neumáticos de alta ganancia.

En estos casos generalmente se usan controladores con una ventana de histéresis, esto con el fin de hacer que la salida del controlador conserve su valor presente hasta que la señal de error se haya desplazado hasta los límites de la ventana de histéresis, se usa con el fin de disminuir la frecuencia de operación del mecanismo de encendido y apagado, esto se puede apreciar en la gráfica 2.17.

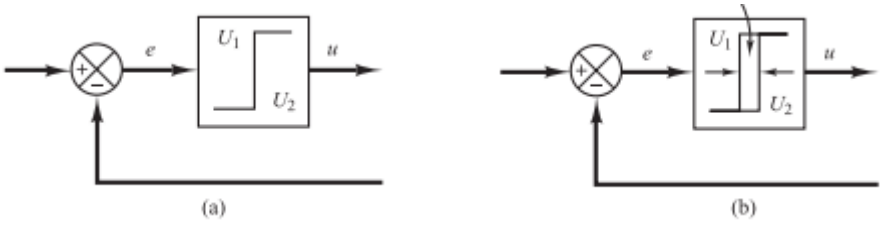


Figura 2.16: (a) Controlador On/Off, (b) Controlador on/off con histéresis [18]

1.3.2.2. Acción de control Proporcional: Es la forma más simple de control continuo en lazo cerrado, el control proporcional minimiza la fluctuación en la variable de

proceso, pero no siempre lleva el sistema al set point deseado. Este control proporciona una respuesta más rápida que la mayoría de los otros controladores, sin embargo, no garantiza que el sistema llegará al valor deseado en estado estacionario, a esto se le llama error de posición, dicho error se puede minimizar combinando el control proporcional con un control integral o derivativo (PI ó PD), la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es: $u(t) = K_p e(t)$.

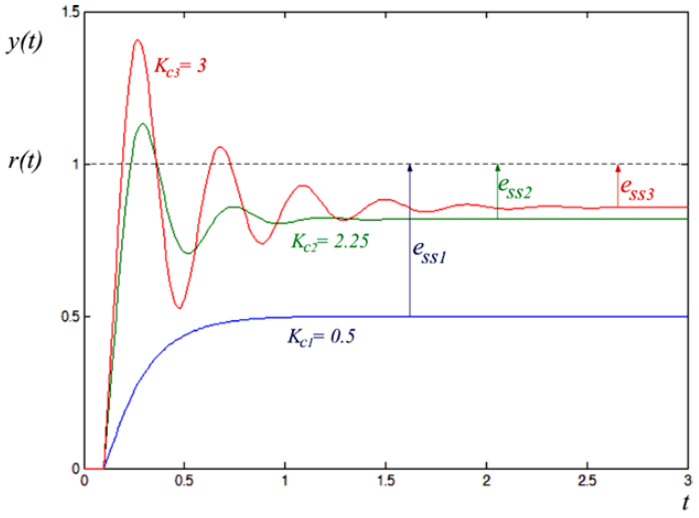


Figura 2.17: Controlador Proporcional con valores diferentes de K_p [19]

1.3.2.3. Acción de control Integral: El control integral, se usa por que es capaz de eliminar el error de posición, los controladores I son mucho mas lentos en su tiempo de respuesta que los controladores P, uno de los principales problemas del controlador I es que responden a errores pasados acumulados [18], lo que puede llevar a volver inestable el sistema. el valor de la salida del controlador $u(t)$ se cambia a razón proporcional a la señal de error, como se muestra en la Ecuación 2.2.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t)\, dt \tag{2.2}$$

Acción de control Derivativo: A diferencia de los controles solo P y solo I, el control D es una forma de control de avance, anticipa las condiciones del proceso analizando el cambio en el error. Funciona para minimizar el cambio de error, manteniendo así el sistema en una configuración consistente. El principal beneficio de los controladores derivativos es resistir el cambio en el sistema, sin embargo, a diferencia de los controladores proporcionales e integrales, los controladores derivativos no guían el sistema a un estado estacionario, debido a esto, su implementación sólo es posible en conjunto con controladores I o P.

1.3.2.4. Acción de control proporcional-integral PI: El control PI proporciona un tiempo de respuesta más rápido que el control solo I, debido a la acción proporcional. El

control PI impide que el sistema fluctúe, y elimina el error de posición visto en el control solo P, la acción de control de un controlador proporcional-integral, se define mediante

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t)\, dt \tag{2.3}$$

Como se puede apreciar en la ecuación 2.4, el control proporcional está en acción únicamente cuando el sistema está en el set point, el error es igual a cero y el primer termino de la ecuación se anula, en este caso, el sistema está siendo controlado solamente por el controlador integral.

1.3.2.5. Acción de control Proporcional-Derivativo PD: El control PD es una combinación de control de avance y retroalimentación, ya que opera tanto en las condiciones actuales del proceso como en las condiciones del proceso predichas. El control PD contiene la amortiguación del control proporcional y el control de la fluctuación y la predicción del error del controlador derivativo, esta acción de control se define mediante

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \tag{2.4}$$

el controlador PD también se puede ver como una combinación de las ecuaciones de control solo P y solo D. En este control, el propósito del control solo D es predecir el error para aumentar la estabilidad del sistema de bucle cerrado. El control PD no se usa comúnmente debido a la falta del término integral. Sin el término integral, no se minimiza el error en el funcionamiento en estado estacionario

1.3.3. Controlador PID

Es la combinación de la acción del control proporcional, derivativo e integral, esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales, tiempo de respuesta más rápido debido al control Proporcional, error de posición 0 del control integral y la predicción de perturbaciones midiendo el cambio de error que agrega el control derivativo, la ecuación de un controlador de acción combinada está dada por

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t)\, dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \tag{2.5}$$

El controlador PID no puede usarse en sistemas con demasiado ruido debido a la componente derivativa, aunque el controlador PID parece ser el controlador más adecuado, también es el controlador más caro [18]. Por lo tanto, no se utiliza a menos que el proceso requiera la precisión y estabilidad proporcionada por el controlador PID.

1.3.4. Sintonización del PID método de Ziegler-Nichols

Si una planta es tan compleja que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un método analítico para el diseño de un controlador PID, en este caso se debe

recurrir a procedimientos experimentales para la sintonización del controlador PID.

Las reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar el PID (hallar el valor de K_p, T_i y T_d) se basan en la respuesta al escalón experimental y el valor de K_p crítico con un control proporcional en lazo cerrado, a pesar de que con esta metodología se obtiene una solución al sistema, en algunos casos se necesitará una serie de ajustes finos hasta obtener el resultado deseado, hay dos métodos de sintonización de Ziegler-Nichols, mencionados a continuación.

1.3.4.1. Primer método En el primer método, se obtiene la respuesta de la planta a un escalón unitario de manera experimental, en el caso de que el sistema no tenga polos dominantes complejos conjugados ni integradores, la respuesta tendrá forma de "S", similar a una respuesta de primer orden con constante de tiempo T y un retardo L.

El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea $c(t) = K$ [18], en la Figura 2.18 se ilustra gráficamente la forma de hallar el valor de T y L.

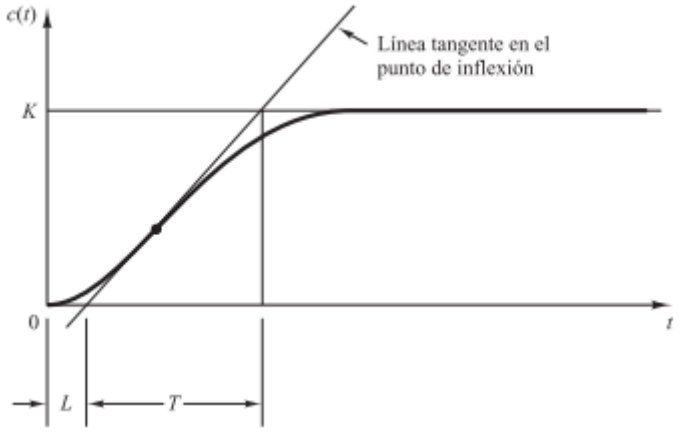


Figura 2.18: Respuesta temporal sistema aproximado de primer orden con retardo [18]

Para ese caso específico se pueden calcular los valores de las constantes $K_p, T_i y T_d$ como se puede apreciar en la Tabla 2.1.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0{,}9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0{,}3}$	0
PID	$1{,}2\frac{T}{L}$	2L	0.5L

Tabla 2.1: Valores de K_p, T_i, T_d para sistemas con comportamiento de S

El controlador PID obtenido por este método, tiene una función de transferencia $G_c(s)$, con ceros dobles en $s = -1/L$, un polo en el origen y una ganancia 0.6T.

$$G_c(s) = 0{,}6T\frac{(s+1/L)^2}{s}$$

1.3.4.2. Segundo método para este método se usa un control proporcional, en donde K_p se incrementa desde 0 hasta obtener un sistema oscilatorio permanente, a este valor de K_p se le conoce como K_{cr} o crítico, Luego se mide el periodo de oscilación (P_{cr} y se obtienen los valores con los datos de la tabla 2.2. Si para cualquier valor de K_p el sistema no se vuelve oscilatorio este método no es aplicable.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0{,}5K_{cr}$	∞	0
PI	$0{,}45K_{cr}$	$\frac{1}{1{,}2}P_{cr}$	0
PID	$0{,}6K_{cr}$	$0{,}5P_{cr}$	$0{,}5P_{cr}$

Tabla 2.2: Valores de K_p, T_i, T_d para sistemas con comportamiento de S

En este caso la función de transferencia obtenida tiene 1 polo en el origen, dos ceros repetidos en $s = -4/P_{cr}$ y una ganancia de $0{,}075K_{cr}P_{cr}$

$$G_c(s) = 0{,}075K_{cr}P_{cr}\frac{(s+4/P_{cr})^2}{s}$$

Estas reglas de sintonización son ampliamente utilizadas en sistemas de control de procesos que no se conoce con precisión su dinámica, Para sistemas en donde se conoce su función de transferencia de manera analítica existen otros métodos gráficos y analíticos además de los planteados acá.

1.4. Controladores Lógicos Programables PLC

1.4.1. Estructura del Controlador lógico programable

Un controlador lógico programable es una máquina electrónica programable diseñada para ser utilizada en ambientes industriales (Hostiles), utiliza una memoria programable para el almacenamiento interno de las instrucciones de control, para implementar soluciones específicas en el área de los circuitos lógicos combinacionales, secuenciales y de control continuo, a través de salidas y entradas digitales y analógicas.

Algunos de los componentes más relevantes dentro de la estructura dentro de un PLC son:

1.4.1.1. Memoria/CPU Se pueden clasificar de acuerdo a su capacidad y la velocidad de procesamiento, destinada a consultar el estado de las entradas, analizar el programa cargado previamente y cambiar el estado de las salidas, el tiempo de lectura del programa

es del orden de milisegundos (generalmente 150) y depende del número y tipo de instrucciones.

El bloque funcional de un PLC se compone de Fuente de alimentación, que provee la energía al dispositivo, la ALU (Unidad aritmética lógica), Acumuladores para guardar los resultados de la ALU, banderas como indicadores de resultado, Contador del programa que realiza la lectura de instrucciones, Decodificador de las instrucciones y generador de señales de control, la pila para priorizar instrucciones, evitando saltos en el programa, el monitor del sistema, que almacena la información del estado de la CPU y la ejecución del programa, La memoria del programa y memoria de datos, los buses de comunicación, conversores ADC y DAC y la interfaz de entrada y salida que comunica al PLC con el entorno, en la Figura 2.19 se puede apreciar el diagrama funcional de la CPU de un PLC.

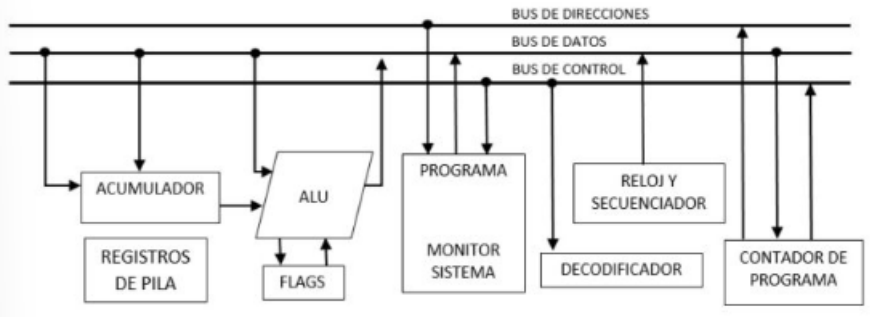


Figura 2.19: Diagrama funcional de la CPU de un PLC [20]

1.4.1.2. Rack o chasis del PLC Generalmente, en las industrias, se pueden encontrar dos tipos de sistemas de PLC, el plc monolítico o fijo, en el cual el número de entradas y salidas viene fijo en un solo dispositivo que agrupa todos los componentes necesarios para el funcionamiento del PLC, y los PLC modulares, los cuales el Hardware no viene pre-fijado por el fabricante y se puede modificar la cantidad de entradas y salidas y su tipo, según la necesidad del proyecto y su escalabilidad, sin embargo, el número de tarjetas o módulos en ocasiones está limitado por el tamaño del rack.

El rack sirve como columna vertebral del sistema PLC modular, manteniendo todos los módulos interconectados a la CPU y la fuente de alimentación, el rack sincroniza tanto la señal de alimentación como de comunicación de todos los módulos.

1.4.1.3. Módulos de expansión Los módulos de expansión de plc permiten ampliar el número de entradas y salidas que este posee, cuando su capacidad no cumple con los requerimientos de la aplicación a automatizar, existen diferentes tipos de módulos de expansión por ejemplo:

1. **Módulos de entradas:** Permite aumentar el número de entradas ya sea digitales, analógicas o entradas especiales como entradas AC, sensores de temperatura RTD, Termocuplas, también puede tener diferente tipo de entrada analógica, en corriente (4-20mA, 0-20mA), en voltaje (0-10V, 0-5V)

2. **Módulos de salidas:** Agrega al PLC un número determinado de salidas que pueden ser, analógicas (en voltaje o corriente como se mencionó anteriormente), Digitales, y algunas especiales, como de tipo relé.

3. **Módulos mixtos** Este tipo de módulo tiene combinación de entradas y salidas, generalmente son del mismo tipo.

4. **Módulo de comunicaciones:** Permite al PLC comunicarse con distintos dispositivos (Variadores de velocidad, transmisores, entre otros), con los diferentes protocolos de red como: Modbus RTU, Profibus, CanOPEN, TCP/IP, Profinet, Ethernet/ip

1.4.2. Lenguajes de programación

1.4.2.1. GRAFCET Es un Diagrama funcional en el que se describe un proceso a automatizar, esta descripción considera que el proceso a automatizar y el autómata forman un único sistema [21]. Se indican las acciones (estados) que se realizan sobre el proceso, así como lo necesario para desencadenar esas acciones, GRAFCET está compuesto por un conjunto de símbolos normalizados, **Las Etapas**, **Las Transiciones y las Lineas de evolución**.

La etapa es el elemento básico en el cual el automatismo realiza acciones sobre el proceso, cada etapa se representa por un cuadrado con un numero en su interior (etiqueta), las etapas en las que se posiciona el sistema por primera vez se simbolizan con un cuadrado con línea doble, el proceso se puede dividir en macroetapas, que luego se dividen en acciones más pequeñas.

Las transiciones recogen las condiciones necesarias para que se detenga una etapa y pueda activarse la siguiente, las transiciones tienen asociadas receptividades que son expresiones lógicas que se evalúan a partir de variables externas e internas.
Las lineas de evolución muestran el camino que sigue el diagrama, generalmente van orientadas hacia abajo, en caso de que indiquen un retorno hacia arriba, debe haber una flecha que lo indique, en la Figura 2.20 se puede apreciar un ejemplo básico de un diagrama GRAFCET.

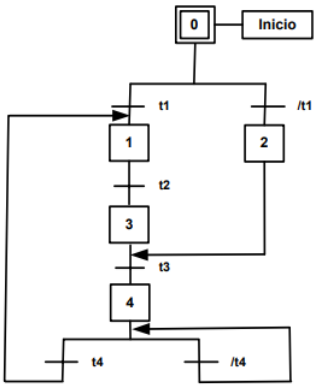


Figura 2.20: Estructura GRAFCET [21]

1.4.2.2. LADDER El diagrama de escalera o ladder es un lenguaje de programación gráfico muy popular en los PLC debido a que está basado en esquemas eléctricos de control clásicos, lo que hizo fácil su adopción.

Ladder es uno de los lenguajes para PLC's estandarizados en IEC 61131-3, en ladder la energía se desplaza de izquierda a derecha [22], en lugar de arriba hacia abajo como en los esquemas eléctricos, en los circuitos típicos las señales de activación (entradas) se encuentran en la parte izquierda, mientras que las bobinas o salidas se encuentran en la parte derecha.

Este es el lenguaje de programación ideal a la hora de desarrollar o implementar circuitos combinacionales, por su facilidad para expresar funciones de tipo booleano, en este lenguaje están definidos los contactos NO, NC, bobinas, contadores, temporizadores, funciones aritméticas, comparadores, entre muchas otras.

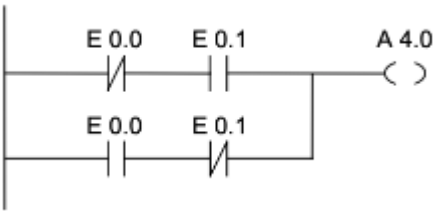


Figura 2.21: Ejemplo básico circuito programado en ladder [22]

1.4.2.3. Diagrama de bloques funcionales FBD Es una representación paso a paso de un flujo funcional que ayuda a simplificar los procesos de trabajo y a crear una mejor comprensión de los mismos, el diagrama de bloques de funciones es un lenguaje de programación de orientación gráfica. Funciona con una lista de redes en la que cada red contiene una estructura gráfica de cuadros y líneas de conexión que representa una expresión lógica o aritmética, la llamada de un bloque de funciones, un salto o una instrucción de retorno [31].

FBD proviene del campo del procesamiento de la señal y su utilización es conveniente cuando no hay ciclos pero existen, sin embargo, varias ramas en el programa a crear. Se trata de un lenguaje de alto nivel que permite resumir funciones básicas en bloques de modo que el usuario solo se preocupa por una programación funcional de su rutina. De este modo, es ideal para usuarios que no tengan habilidades avanzadas en programación y para aquellos procesos de baja complejidad [32]

2. Estado del arte

2.1. System Identification of a Temperature Control Process using Open Loop and Closed Loop methods [1]

En este documento elaborado en el año 2018, los autores realizan el modelamiento de un sistema de control de temperatura usando un calentador de placa única y un ventilador, basados únicamente en los datos de entrada y salida (modelo de caja negra), la identificación del sistema de lazo abierto lo realizaron con tres pruebas, respuesta al escalón, respuesta a rampa y PRBS (señal binaria pseudoaletoria) y la identificación del sistema en lazo cerrado se realizó de manera directa, además diseñaron controladores: PI, PID y control de colocación de polos 2DOF.

La planta a identificar usada consta de un sistema de única salida con dos entradas, las entradas corresponden al calentador que actúa como variable manipulada y el ventilador que actúa como perturbador, el sensor usado para detectar la temperatura fue un AD590 y el control se realizó con un microcontrolador ATMega16.

2.1.1. Identificación del sistema en lazo abierto

Se aplicó al sistema diferentes tipos de señales de entrada y obtuvieron los datos de corriente y temperatura del calentador, utilizaron la herramienta de identificación de sistemas de matlab, realizaron la aproximación a sistema de primer (FOPDT), segundo (SOPDT) y tercer orden (TOM), los resultados de la respuesta al escalón de estos sistemas se puede apreciar en la Figura 2.22.

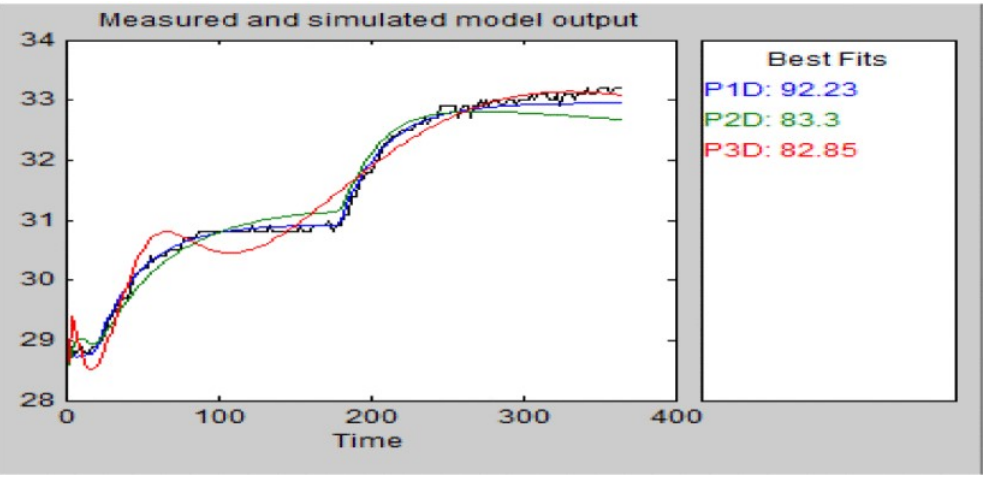


Figura 2.22: Mejor ajuste en prueba escalón para modelos FOPD, SOPDT y TOM. [1]

En la siguiente prueba se aplicó una entrada rampa de pendiente 0.1 para mil muestras, se llegó a un sistema de primer orden, en la prueba PRBS, que es una señal de encendido y apagado de duración y frecuencia aleatorias con el fin de capturar la dinámica del sistema y analizar el peor caso de rendimiento de la planta, para este realizó el modelamiento en tiempo discreto con 4 modelos distintos (OE, BJ, ARMAX, ARX), realizaron

la autocorrelación y la relación cruzada y encontraron que todos los modelos obtenidos se encuentran dentro del nivel de confianza obtenido (99) por lo que concluyeron que todos estos modelos son válidos.

2.1.2. Identificación en lazo cerrado

en el documento se menciona la metodología para realizar la identificación del sistema en lazo cerrado usando el método directo, para la identificación en lazo cerrado usaron tres controladores (PI, PID y controlador de colocación de polos 2DOF).
Para el caso del controlador PI usaron la sintonización con el método de Good gain, identificaron modelos de primer y segundo orden cuyo mejor ajuste fue de 86 y 83 % respectivamente, para el controlador PID se ajustó usando el método de Ziegler-Nichols, en donde los rendimientos que se obtuvieron son: para un modelo ARMAX del 87 %, 83 % para para el modelo de error de salida, 66 % y 77 % para los modelos de primer y segundo orden respectivamente, en cuanto a la función de autocorrelación y correlación cruzada se encuentran dentro del intervalo de confianza, por tanto se pueden considerar modelos válidos. Por último usan el controlador de colocación de polos 2DOF en este caso los modelos de primer y segundo orden obtuvieron un rendimiento de 52 % y 65 % respectivamente, sensiblemente menor a los resultados obtenidos con otros modelos.

En este trabajo se mostró diferentes métodos y resultados de identificar un sistema de temperatura en lazo abierto y cerrado y los rendimientos de cada uno.

2.2. LabVIEW based system for PID tuning and implementation for a flow control loopLabVIEW based system for PID tuning and implementation for a flow control loop [2]

El enfoque de este trabajo es identificar el modelo del sistema para un lazo de control de flujo e implementar un controlador PID en Matlab para estudio y simulación y en LabVIEW para experimentar en tiempo real, además realizaron una comparación entre los métodos de Ziegler-Nichols, Cohen Coon y Controlador de modelo interno para la sintonización del controlador PID.

El sistema que se usó en este caso fue una planta compuesta por un regulador, convertidor de corriente a presión, válvula de control neumático, rotámetro y el medidor de flujo con una salida de 4 a 20 mA, la identificación del sistema se realizó en el identificador de sistemas de Matlab, en el cual obtuvieron un modelo de primer orden con retardo.

Usaron los 3 modelos de sintonización Ziegler-Nichols, Cohen-Coon y controlador de modelo interno, con los cuales encontraron diferentes valores de K_c, T_i, T_D y realizaron la comparación con la repuesta de escalón, los resultados se encuentran en la Figura 2.23.

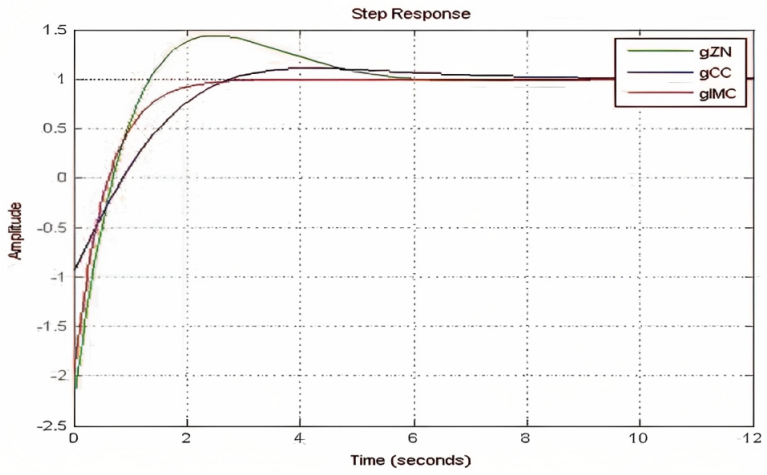


Figura 2.23: Simulación y comparación de métodos de sintonización. [2]

La simulación y los resultados experimentales muestran que el tiempo de establecimiento para IMC es mucho menor que los métodos de ajuste ZN y CC. Los resultados experimentales y de simulación de que el método de sintonización IMC-PID no tiene sobreimpulso, pero ZN y CC tienen un sobreimpulso máximo de 43,7 % y 10,9 %, respectivamente, en el estudio de simulación y los resultados experimentales muestran que ZN tiene un sobreimpulso de 59 % y CC tiene un sobreimpulso de 15 %. El lazo de control de flujo bajo estudio está bien controlado si se utiliza el método de sintonización IMC para la sintonización PID.

2.3. INDUSTRIAL AUTOMATION CONTROL TROUGH PLC AND LABVIEW. [3]

Este documento se enfoca en la automatización de un sistema industrial a través de una serie de herramientas como PLC, Lab VIEW e Internet. En el sistema propuesto, el método de control PLC se implementa mediante el uso de PLC Fatek. La solución planificada para la automatización industrial se logra mediante la implementación de un sistema de control y monitoreo en tiempo real que está interconectado con un PLC de bajo costo (FATEK) y el software de adquisición perfecto LABVIEW para automatización y optimización de costos para un sistema de fabricación industrial típico. El principal objetivo de este estudio es mezclar polvo de piedra caliza y agua caliente a través de un enfoque automatizado con el fin de minimizar el riesgo para la salud de los trabajadores y la ocurrencia de accidentes. El sistema diseñado es capaz de mantener el nivel del agua y la temperatura de cuatro tipos de tanques diferentes mediante el control automático del encendido y apagado del equipo de mezcla y calentamiento adjunto. El sistema ofrece un enfoque más conveniente y eficiente para la transición de las industrias manufactureras de manuales a automatizadas.

En este artículo diseñan un sistema de automatización industrial para controlar los parámetros como el nivel y la temperatura y que se controlan simultáneamente. Para la estructura del prototipo utilizaron una tabla de madera que contiene una plataforma y cuatro tanques diferentes en los cuales se controla el nivel de fluido, la temperatura y la mezcla-

dora a través de un PLC comandado por LabVIEW como HMI. Además, este documento se centra en una solución para la automatización industrial haciendo que el sistema sea más eficiente, innovador y rentable.

Como resultado final, los autores muestran la interfaz HMI elaborada en LabVIEW (se muestra en la Figura 2.24) y las fases de funcionamiento del proceso programado, en las conclusiones hablan de las ventajas de reemplazar los relés, interruptores y demás dispositivos discretos a un PLC y de diseñar en LabVIEW el HMI, también hablan de la disminución de tiempos de producción, costos de materia prima y costos de producción.

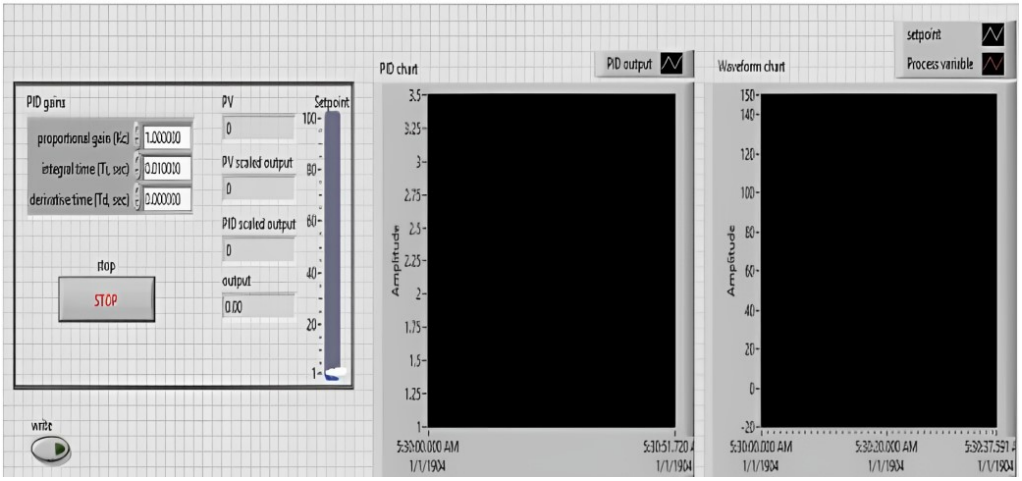


Figura 2.24: Resultados del producto final. [3]

2.4. Production Process Analysis and Improvement of Corrugated Cardboard Industry. [4]

Este trabajo se desarrolló en una empresa industrial de cartón corrugado, El análisis de este trabajo se basó bajo la metodología PDCA (Plan, Do, Check, Act) desarrollada así: En primer lugar, se analizó el estado inicial de la producción mediante la toma de datos en ambas líneas existentes y se concluyó que se estaba utilizando una gran variabilidad de los parámetros en el proceso para trabajos similares. Se identificaron los principales problemas en el proceso y se concluyó que los planos alabeados y desprendidos eran los principales motivos de preocupación. Se implementó un conjunto de medidas para reducir estas incidencias. Se implementaron gráficas de control a la cola de almidón y mediante el análisis de estas gráficas y diagramas de causa-efecto se implementaron varios cambios al circuito de la cola de almidón y a su propia receta. Se redujo la presión de vapor de la caldera de 12 bar, (que correspondía a una temperatura para el grupo de olas de unos 190°C estas altas temperaturas provocaban que el agua presente en el pegamento de almidón se evaporara y condujera a su cristalización) a 8 bar y se implementó una tabla de temperaturas con respecto a cada pisapapeles.

Detectaron que la viscosidad de la mezcla aumentaba durante la noche, y también durante el fin de semana, lo que provocó numerosos problemas en el arranque, por lo que fue necesario, llevar la mezcla a un silo de almacenamiento, donde debía agitarse cada 15

minutos, durante 5 minutos, además recubrieron el silo con un aislante térmico con el fin de mantener la mezcla a $30 \pm 1C$ a cualquier hora del día.

Los resultados obtenidos muestran que el porcentaje de residuos en el sector se redujo desde valores que oscilan entre el 9 y el 12 % hasta valores en torno al 4 %. En cuanto al consumo de cola de almidón, bajó de 11 g/m2 a 8 g/m 2 . El consumo de energía, a saber, gas, mostró un ahorro del 9 %, con este estudió se logró estandarizar el proceso en esta planta de producción para la preparación del pegante a base de almidón, el autor plantea como trabajos futuros realizar estudios que permitan la modernización de las líneas de producción e implementar metodologías que mejoren la organización no solo de este sector sino de toda la planta, como la metodología 5S y SMED.

2.5. PLC-based industrial temperature controller with different response times [5]

Este trabajo presenta un control de temperatura de hornos industriales implementado en un PLC siemens S7-300, Se consideran dos plantas. La primera planta era un pequeño horno industrial de aluminio de tamaño 1,5 cm × 5 cm y que absorbía 60 W de calor. La segunda planta era un gran horno industrial de $0{,}125m^3$ de capacidad, capaz de disipar 1500 W de calor, ambos experimentos fueron probados con el mismo bloque de comandos del PLC, primero se aplicó el método de sintonización de PID de Cohen-Coon y se obtuvieron los parámetros del controlador para cada planta y se mantuvieron estos valores a lo largo del experimento, primero se ejecutó la prueba de lazo abierto para la planta pequeña en donde la señal se satura a $90C$, en lazo cerrado el PV experimenta un sobreimpulso del 25 % antes de igualar el SV con un tiempo de estabilización de 120 s, Luego se agregó un generador de pulsos al controlador PID, en este caso el sobrepaso máximo disminuyó al 10 % y el tiempo de establecimiento se redujo a 30 s, lo que representa una disminución del 300 %, esto se debe al hecho de que los generadores de impulsos realizan un mejor seguimiento de los cambios en el punto de referencia, lo que minimiza los efectos de las subidas del integrador y las patadas derivadas.

La prueba con el sistema en lazo abierta muestra una tendencia exponencial creciente que no se satura a diferencia de la planta pequeña, en lazo cerrado se evidencia que tras el cambio de paso, el PV experimenta un sobreimpulso del 45 % antes de igualar el SV con un tiempo de estabilización de 30 min, luego se implementó una zonificación de control al controlador PID de lazo cerrado de tal manera que el controlador PID solo está en acción cuando el PV está dentro de un cierto límite, en este caso $\pm$ 2 °C del SV. Para este caso obtuvieron un sobreimpulso del 20 % en PV en comparación con el 45 % para el caso de ausencia de configuración de zonificación de control. Se encontró que el tiempo de asentamiento para el caso de zonificación de control fue de 16 minutos, lo que representa una disminución del 87,5 % en el tiempo de asentamiento. Estas mejoras significativas en el rendimiento se atribuyen al hecho de que el controlador PID de zonificación de control realiza un seguimiento de las compensaciones de temperatura mejor que un controlador PID de circuito cerrado normal, lo que minimiza el efecto de los cambios en el punto de ajuste, el autor llegó a la conclusión de que los resultados muestran que un enfoque de control PID personalizado es adecuado para controlar grandes calentadores industriales.

Capítulo 3

Automatización del proceso de preparación y dosificación del almidón

1. Elección de instrumentación y elementos finales de control asociados al proceso

1.1. Instrumentación sistema de preparación de almidón

El proceso de preparación del almidón consta de un control de temperatura, y el control de llenado del tanque de cocción, para realizar estos procesos se realiza la siguiente selección

1.1.1. Selección de válvula para el control de temperatura

El control del calentamiento de la mezcla se realiza a través de una tubería conectada a la línea principal de vapor proveniente de la caldera, el vapor de esta tubería se encuentra a una presión de entre 115-130 Psig, las tuberías a esta presión se encuentran entre 170 y 180 °C, el diámetro es de 2" o dn 50 en el sistema internacional.

Las consideraciones a tener en cuenta en este sistema de calentamiento son:

1. El calentamiento de la mezcla en condiciones normales con la válvula que regula el caudal de vapor a la entrada del sistema en un 50 % es de aproximadamente 3600s, lo que indica que es un sistema lento, en el cual no se presentarán cambios instantáneos de temperatura.

2. Al ser una tubería de un diámetro considerable con una alta presión, no es conveniente realizar cambios instantáneos de presión debido al golpe de ariete que se puede presentar.

3. Los cambios en la válvula de regulación en la entrada modifican las condiciones del sistema, se puede hacer más lenta o más rápida la cocción dependiendo de la necesidad de producción.

4. Se realizan al rededor de 4 cocciones por turno de producción de 8 horas, eso quiere decir aproximadamente una cocción cada 2 horas.

Teniendo en cuenta las consideraciones y aprovechando el material disponible dentro del inventario de repuestos usados, se realizó la siguiente comparación.

Tipo de válvula	**Globo**	**Bola ranurada**	**Solenoide**
Tipo de Acción	Proporcional	Proporcional	On/Off
Respuesta	Lineal	Equiporcentual	Todo o Nada
Regulación de caudal	Bueno	Regular	Malo
Aplicaciones comúnes	Gases, vapor	Fluidos con bajo porcentaje de solidos	Líquidos, Gases
Desventaja	Costo elevado de mantenimiento	Baja capacidad de regulación de flujo	Golpe de ariete

Tabla 3.1: Tabla de comparación de válvulas para control de vapor

Usando como base los datos de la Tabla 1.1.1 se decide instalar una válvula proporcional de globo, dándole peso a su respuesta lineal, y buena capacidad para controlar caudal en líquidos y gases, se descarta la idea de realizar un control On/Off con una válvula solenoide debido a la presión de la línea y la posibilidad de dañar los elementos del sistema por el golpe de ariete producido.

1.1.2. Selección de sensor de temperatura

En cuanto al Sensor/transmisor Usado para la medición de la temperatura se toman en cuenta las siguientes consideraciones.

1. La cocción del almidón se realiza a una temperatura de entre 70 °C y 85 °C, y la temperatura mínima a la que trabaja el sensor es la temperatura ambiente la cual puede estar entre 0 °C y 20 °C, en Sesquilé, Cundinamarca, Colombia.

2. La lectura de temperatura se realiza en un PLC el cual dispone de entradas analógicas en voltaje 0-10V o corriente 0-20 mA, 4-20mA, sin embargo se cuenta con un transmisor universal, PR 4116, el cual admite señales de sensores de temperatura tipo RTD (Platino, Niquel, Cobre), Termopar tipo J,K,T,A.

3. La electrónica del sensor debe estar bien protegida, ya que debe ser sometido a un ambiente industrial agresivo, por tanto debe tener un alto grado de resistencia al polvo, la humedad y la corrosión.

En la Tabla 3.2 se puede apreciar la comparativa que se realiza en cuanto a los posibles sensores de temperatura a instalar en el proceso.

Tipo de sensor	***Rango de funcionamiento***	***Material***	***Instalación***	***Precio***	***Protección***	***Disponibilidad***
PT100	-25 °C a 250 °C	Acero Inox 316	Termopozo	58 €	IP54	4 semanas
Termopar K	0 °C a 1200 °C	Acero Inox 304	Termopozo	92 €	IP54	3 semanas
Termopar J	0 °C a 800 °C	Acero Inox 304	Termopozo	80 €	IP55	inmediata
Termopar T	-200 °C a 300 °C	Acero Inox 316	Termopozo	60 €	IP56	inmediata

Tabla 3.2: Comparativa sensores de temperatura

Como se puede apreciar en la Tabla 3.2, Todos los sensores cumplen con el rango requerido, sin embargo La termocupla tipo T y el sensor RTD PT100 son los que mejor cumplen este item, Todos los sensores tienen una construcción en Acero Inoxidable con protección IP 54 o superior, lo cual los hace resistentes a la humedad y al ambiente industrial al que están sometidos, en cuento al precio, no hay diferencia significativa entre el PT100 y la termocupla tipo T, sin embargo, Dandole prioridad al tiempo de ejecución del proyecto, se decide usar la termocupla tipo T, al tener disponibilidad de entrega inmediata además de cumplir con todos los requerimientos del proyecto.

1.2. Elementos control de llenado

Para el control de llenado se usa la válvula solenoide disponible en el inventario de repuestos de la empresa mencionado en la Tabla 1.1.1, teniendo en cuenta que para este caso, al ser una tubería que no está sometida a un fluido a alta presión no se produce golpe de ariete en los cambios de estado de la válvula.

El control de nivel al no ser crítico conocer su valor exacto dentro del proceso , no es necesario instalar un medidor de nivel continuo, basta con instalar indicadores para el nivel máximo de llenado y el nivel mínimo, esto con el fin de no trabajar el sistema sin mezcla o de evitar reboses en el tanque.

1.3. Instrumentación y control sistema de dosificación

El sistema de dosificación consiste en un control de lazo cerrado en el que la acción de control se realiza con un variador de velocidad y la medición de flujo con un transmisor de caudal, al ya poseerlos y estar instalados con anterioridad no se realiza selección, sin embargo, a continuación se especifican las características técnicas de estos instrumentos.

1.3.1. Variador de velocidad

El variador de velocidad disponible para realizar el control de la bomba de dosificación es uno de la marca schneider, modelo ATV312HU22N4, igual al apreciado en la Figura 3.1, para lograr el correcto funcionamiento del equipo fue necesario realizar la parametrización del mismo, ingresando los datos nominales del motor, para realizar el control desde el PLC fue necesario asignar una entrada digital a la señal de Arraque/Parada y una señal analógica de corriente para la variación de la referencia, en este caso se configuró la entrada de 4-20 mA.

Las características técnicas de este variador de velocidad son: potencia de salida de hasta 3 Hp, Tensión de entrada de 380-500Vac (440Vac en este caso), corriente de línea 7.8 A a 440 V, rango de velocidades de 1-50 Hz, 6 entradas de control digitales y 3 analógicas, 2 salidas tipo relé y una salida analógica.



Figura 3.1: Variador de Frecuencia Schneider [23].

1.3.2. Transmisor de caudal

El transmisor de caudal usado es del fabricante METERN, y el modelo MTLD-0025-S-M-F-1-1-2-A1, el principio de medición es através del campo electromagnético, esto quiere decir que no hay partes móviles dentro del sensor, la velocidad del fluido (mezcla de agua con almidón, eléctricamente conductivos) generan una diferencia de tensión directamente proporcional a la velocidad del fluido que pasa a través del sensor, este tipo de sensor es ideal para la aplicación ya que requiere de poco mantenimiento, y al usar agua sin destilar, el fluido tiene una buena conductividad eléctrica.

Este sensor posee las siguientes características técnicas, rango de 0.8 a 8.8 m^3/h, repetitibilidad de 0.2 %, una exactitud de $\pm 0{,}5\,\%$ del rango ($0.04 m^3/h$), el mínimo de conductividad eléctrica para garantizar su funcionamiento es de 5.0 $\mu\Omega/cm$ fabricado en Acero SS316L, la señal de control a la salida es de 4-20 mA.

En la última calibración del instrumento, se evidenció un error de exactitud de 0.33 % y un error de repetitibilidad de 0.128 %, lo que indica que se encuentra calibrado dentro de los parámetros del fabricante, en la Figura 3.2 se puede apreciar el transmisor de caudal empleado en la aplicación.



Figura 3.2: Transmisor de flujo empleado en la dosificación [24].

2. Identificación del modelo dinámico que representa el sistema térmico

2.1. Descripción del sistema

El sistema de cocción del almidón está compuesto por un tanque en acero inoxidable tapado, conectado a este tanque se encuentra una tubería de entrada de agua clarificada controlada por una válvula solenoide de 2 pulgadas, y una tubería de vapor conectada a la red principal proveniente de la caldera, el vaciado del tanque se hace por gravedad con una válvula localizada en el fondo del tanque, la agitación de la mezcla se hace con un motor-agitador instalado en la parte superior del tanque, el esquema gráfico del sistema se puede apreciar en la Figura 3.3.

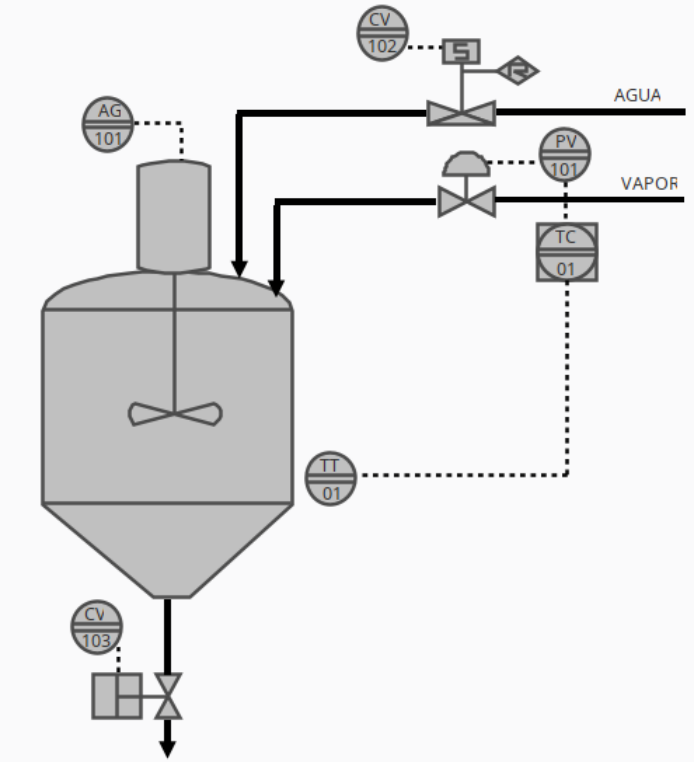


Figura 3.3: Sistema de cocción. Elaboración Propia

2.2. Análisis experimental

Para la identificación del sistema térmico se realizó la técnica de análisis de la curva de reacción, esto quiere decir que se aplicó una entrada acotada constante (entrada escalón) al sistema en lazo abierto y se analizó su respuesta temporal, esto con el fin de analizar el sistema como un modelo de caja negra, en el cual, no se toma en cuenta el modelamiento matemático del sistema, de tal manera que se aproxime a un modelo que represente de buena manera el comportamiento de la planta.

La respuesta temporal del sistema térmico se puede apreciar en la Figura 3.4, esta figura

representa los datos adquiridos en dos experimentos realizados en diferentes días aplicando la misma entrada, que en este caso fue del 43.75 % del recorrido de la válvula proporcional tipo globo, acá se puede notar que en los dos casos se tiene un comportamiento similar a un sistema de primer orden, con un pequeño retardo, esto en la primera fase del calentamiento, luego de esto se evidencia un cambio de comportamiento en el sistema, esto debido al cambio en las propiedades físicas y químicas que sufre el almidón de maíz en su cocción, esto se produce entre aproximadamente 70 y 75 $°C$ en este tipo de almidón.

También se puede apreciar que las condiciones iniciales del sistema obedecen a la temperatura ambiente, para simplicidad del modelamiento, se asumirá que esta temperatura es de 0 $°C$. Al igual que la mayoría de sistemas térmicos, esta planta es demasiado lenta, lo que facilita su regulación.

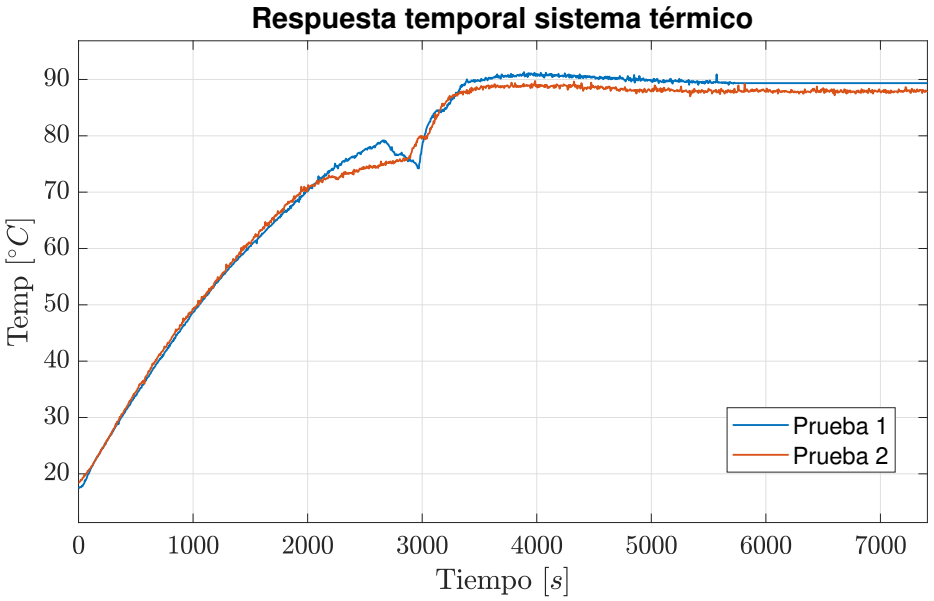


Figura 3.4: Respuesta temporal. Elaboración Propia

2.3. Aproximación a sistema de primer orden

Teniendo en cuenta el comportamiento de este sistema, se decide aproximar el sistema a uno primer orden con un retardo de la forma que se expresa en la ecuación 3.1, se tiene en cuenta el valor de estado estacionario, y el comportamiento temporal del sistema en el instante antes de la cocción o gelatinización, ya que después de este punto el sistema cambia su comportamiento.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \tag{3.1}$$

En donde K es la ganancia de lazo abierto, τ la constante de tiempo del sistema y θ el retardo. Se puede apreciar que el sistema se estabiliza en $90°C$, se aproxima el valor de τ sabiendo que el sistema supera el 99 % de su valor final en cinco constantes de tiempo.

$$5\tau = 3350$$

$$\tau = 670$$

El retardo (tiempo de reacción a la entrada) se puede evidenciar en la curva de reacción, para este caso es de $40s$. Por último se realiza el cálculo de la ganancia de lazo abierto, para esto se tiene en cuenta la entrada aplicada que en este caso fue de 43.75 % de la capacidad del caudal de la válvula usada y del valor de estado estable (restando la temperatura ambiente), como se puede apreciar en la Ecuación 3.2.

$$K = \frac{43{,}75 * 72°C}{100} = 31{,}5 \tag{3.2}$$

De esta manera obtenemos una función de transferencia aproximada que representa el comportamiento del sistema térmico planteado en este documento, como se muestra en la ecuación 3.3.

$$G(s) = \frac{31{,}5}{670s + 1} e^{-40s} \tag{3.3}$$

El sistema obtenido se muestra en la Figura 3.5, sin embargo, a simple vista se puede apreciar que este modelo es mucho más rápido que el sistema original, por esta razón, se fue cambiando la constante temporal, de tal manera que el sistema sea más aproximado que la planta física (dando mayor importancia a la zona lineal), como se muestra en la Figura 3.6.

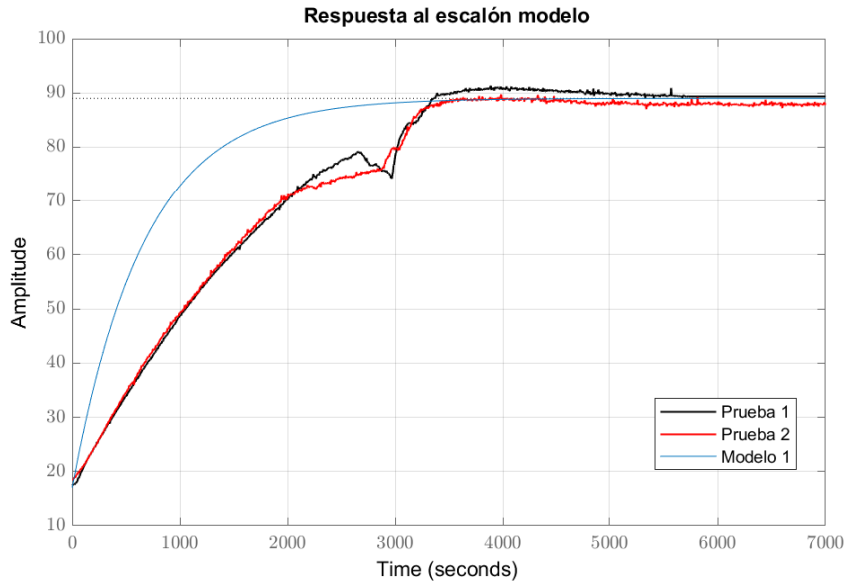


Figura 3.5: Respuesta temporal modelo inicial. Elaboración Propia

Se puede ver que el sistema que para τ entre 1350 y 1750 tienen una respuesta mucho más aproximada para temperaturas menores a 70 $°C$ que el sistema planteado anteriormente, se decide escoge el modelo de $\tau = 1350$ ya que es el que con menor tiempo de estado estacionario representa la respuesta temporal de la planta.

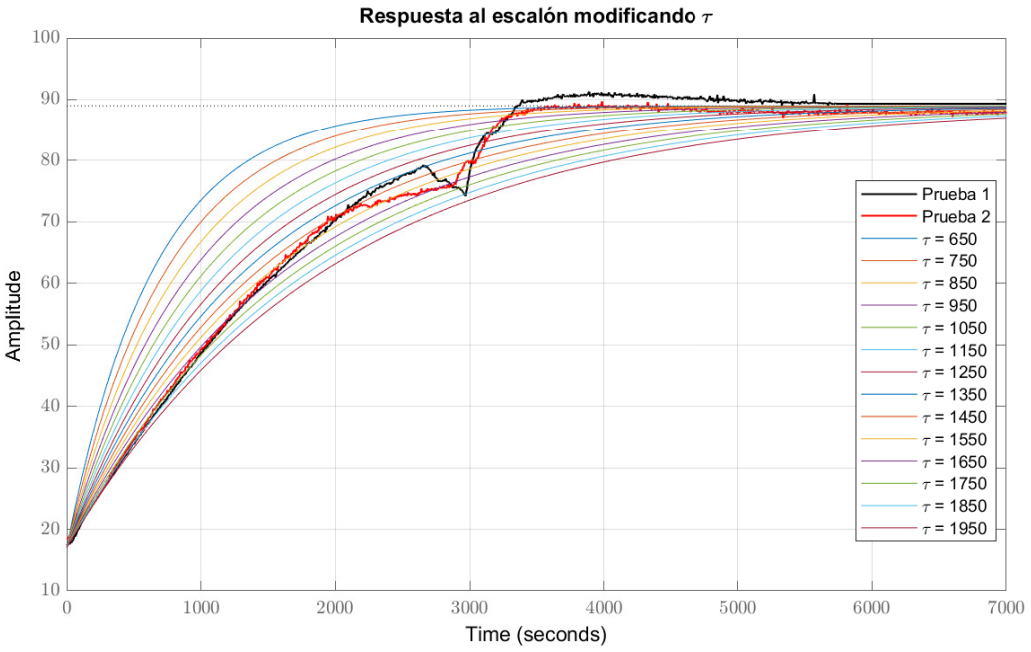


Figura 3.6: Respuesta al escalón al variar τ. Elaboración Propia

En la Figura 3.7 se puede apreciar el sistema de primer orden con retardo de 60 segundos que se va a usar para representar la planta y diseñar el regulador correspondiente

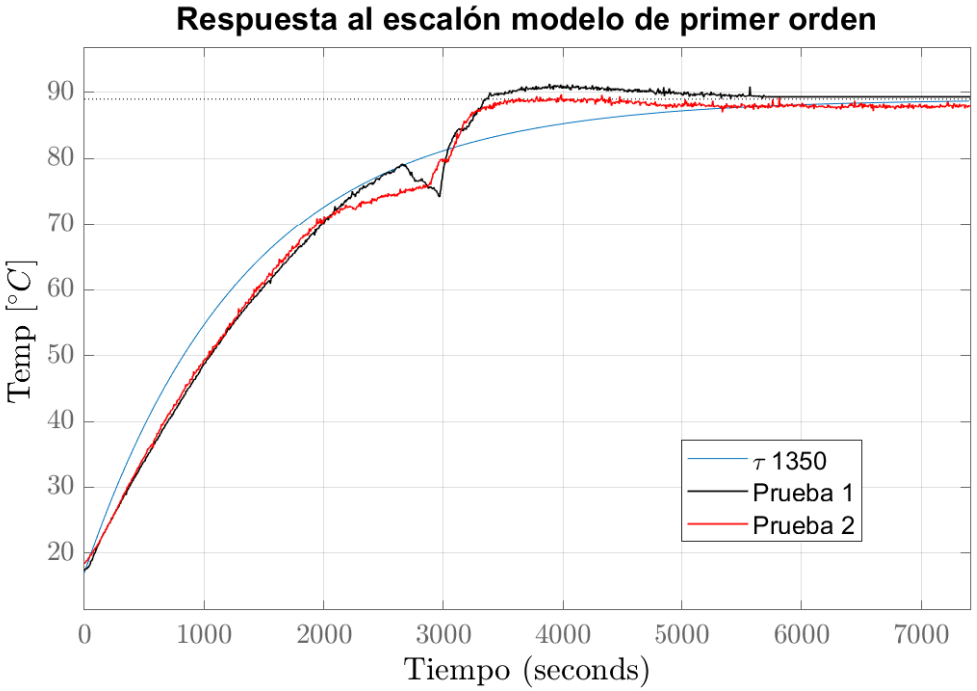


Figura 3.7: Respuesta temporal sistema con retardo. Elaboración Propia

2.4. Aproximación a sistema de segundo orden

Para encontrar la función de transferencia de segundo orden que representa el comportamiento de la planta, realizamos la aproximación de padé (Ecuación 3.4) para el retardo planteado anteriormente,

$$e^{-\theta s} = \frac{1 - \frac{\theta s}{2}}{1 + \frac{\theta s}{2}} \tag{3.4}$$

de esta manera la función de transferencia expresada en la ecuación 3.3, se puede aproximar a:

$$G(s) = \frac{31{,}5}{1350s + 1} \frac{1 - \frac{60s}{2}}{1 + \frac{60s}{2}} \tag{3.5}$$

$$G(s) = \frac{-0{,}0233s + 0{,}00077}{s^2 + 0{,}0341s + 0{,}0000246} \tag{3.6}$$

La respuesta al escalón de la función de transferencia de segundo orden que se puede apreciar en la ecuación 3.6, se ve representada en la Figura 3.8, en donde se ve la cercanía de la aproximación de padel con el sistema de primer orden con retardo mostrado en la Figura 3.7. Este es el modelo de la planta usado para simulaciones, diseños y demás.



Figura 3.8: Respuesta de escalón modelo de segundo orden. Elaboración Propia

3. Diseño y simulación del controlador de temperatura de cocción

Usando como base el modelo planteado en el capitulo anterior, se realiza el diseño de un controlador de lazo cerrado, inicialmente se plantea un regulador usando el método de Ziegler-Nichols en lazo abierto, teniendo en cuenta que se tiene un sistema demasiado lento lo que dificulta llevar la planta al punto marginalmente estable para aplicar el modelo de Ziegler-Nichols de lazo cerrado.

En la sintonización del regulador, solo se usa el modelo de PI (Proporcional-Integral), teniendo en cuenta que el controlador solo P (proporcional) tiene error de estado estacionario, el cual no es conveniente para este sistema que debe llegar a una referencia para lograr la correcta cocción del almidón de maíz.

Se usa la función de transferencia $G(s)$ planteada en la ecuación 3.6, los puntos de medición que se plantean en el método de Ziegler-Nichols se evidencian el la Figura 3.9, en donde se aprecia que el retardo es de 60s, como se había planteado $(L = 60)$, $T = 1735$ y $K = 72{,}6$.

En la Tabla 3.3, se plantean los parámetros de sintonización para el regulador mencionado anteriormente.

Controlador	K_p	T_i	T_d
PI	$0{,}9\dfrac{T}{L} = 26{,}03$	$\dfrac{L}{0{,}3} = 200$	0

Tabla 3.3: Parámetros de sintonización de reguladores

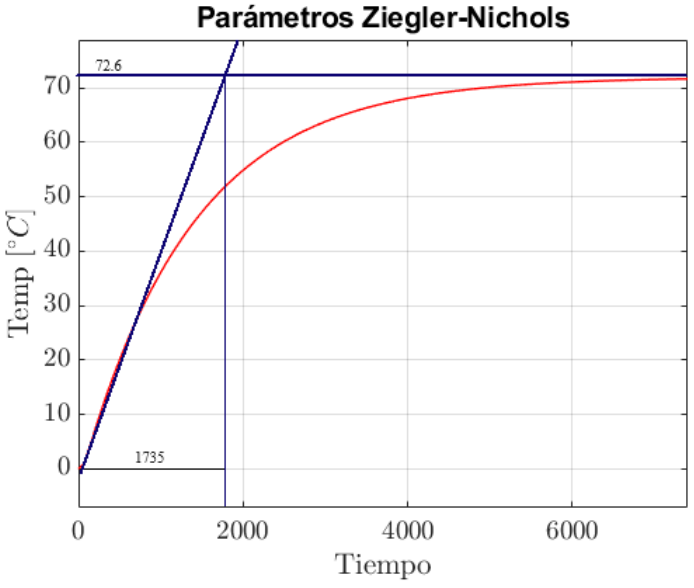


Figura 3.9: Parámetros K,L y T Ziegler-Nichols. Elaboración Propia

Sin embargo, al realizar la simulación del sistema en simulink (Figura 3.10), se puede evidenciar que a pesar de que el comportamiento del controlador es bueno en cuanto a tiempo de estabilización (Cocción), el overshoot es demasiado grande y la acción de control llega hasta 30, lo que hace imposible fisicamente su implementación, ya que el máximo de la válvula es de 1 (100 %) en la Figura 3.11 se puede apreciar la respuesta del controlador PI planteado por Ziegler-Nichols y la acción de control necesaria para obtenerla.

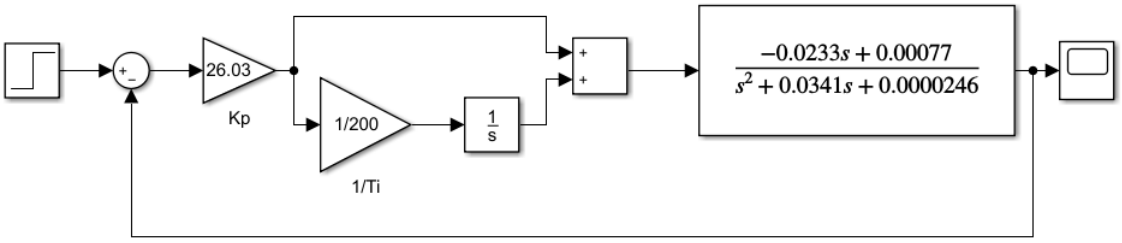


Figura 3.10: Regulador Planteado por Ziegler-Nichols. Elaboración Propia

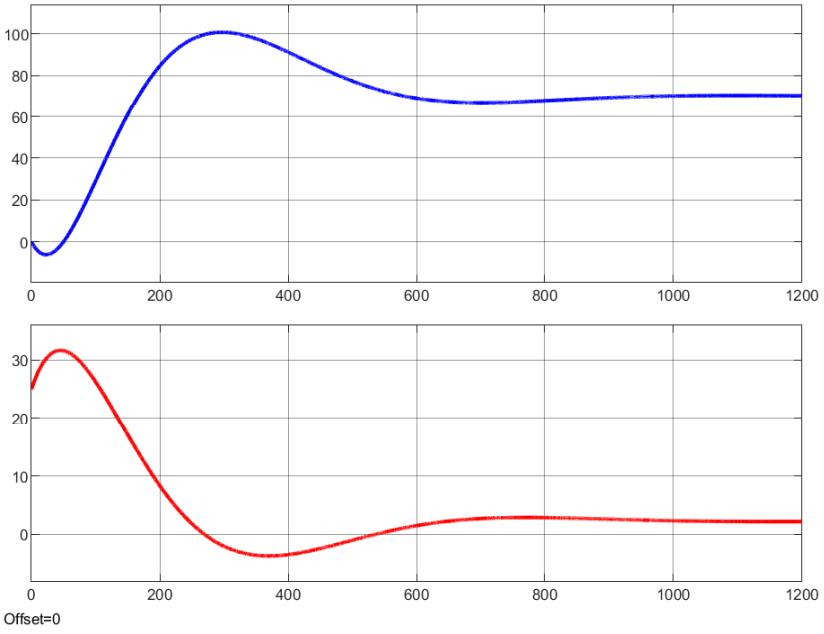


Figura 3.11: Respuesta de sistema sintonizado con Ziegler-Nichols. Elaboración Propia

Al evidenciar este comportamiento, se decide realizar la sintonización, de manera manual, modificando los parámetros K_p y T_i, teniendo como objetivo minimizar el error, usando el criterio ISE (Integral Square Error), definido en la ecuación 3.7.

$$ISE = \int_0^\infty e(t)^2 \, dt \tag{3.7}$$

La manera en la que se realizó esta sintonización fue iniciando con un valor bajo de K_p (0.01) e irlo aumentando con pasos pequeños, con el fin de buscar el que minimice el ISE,

luego de esto, se agrega un tiempo integral T_i grande (1000) y se va reduciendo, buscando disminuir el error, además se evalúa el desempeño en el tiempo del sistema y se verifica una acción de control menor a 1, también se busca un overshoot menor del 10 %
En la Tabla 3.4 se puede apreciar la experimentación que se realizó para la sintonización del regulador, en esta se puede apreciar que la ganancia proporcional se encuentra en el orden de 1-8 % de unidad y el tiempo integral, en entre 1000 y 3000 segundos, el regulador PI que se decide usar es el de ganancia $K_p = 0{,}08$ y $T_i = 1500$ por que fue el que mejor desempeño en cuanto a ISE mostró para este tipo de regulador.

Kp	**Ti**	**ISE**
0.01	0	639.8
0.02	0	261.6
0.03	0	156.2
0.04	0	110.7
0.05	0	86.31
0.06	0	71.44
0.07	0	61.62
0.08	0	54.7
0.08	3000	45.25
0.08	2500	44.96
0.08	2000	44.72
0.08	1500	44.57
0.08	1000	44.66

Tabla 3.4: Análisis de ISE para distintos reguladores

Con respecto a la respuesta temporal, se puede apreciar en la Figura 3.12 que este regulador tiene un sobre pico máximo del 7.2 %, el tiempo pico es de 172 segundos, para una referencia pequeña, al aumentar la referencia, también se vio un efecto negativo en el sobre pico máximo, sin embargo, esta solución es inviable físicamente ya que la acción de control llega hasta 6.75, lo que implicaría una apertura de la válvula de control del 675 %, teniendo en cuenta, se comienza a reducir la ganancia proporcional hasta que la máxima acción de control sea cercana a 1.

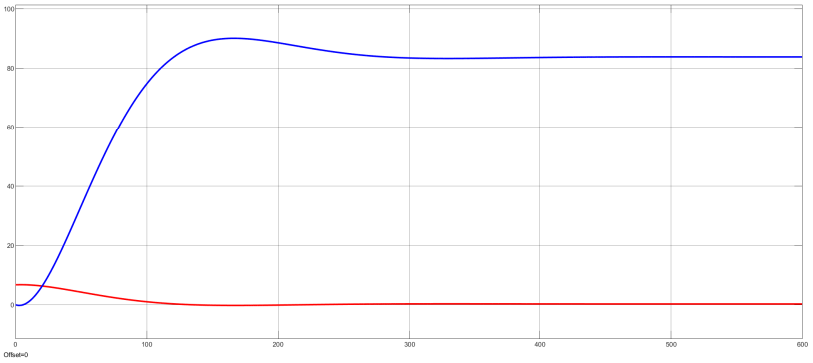


Figura 3.12: Sistema realimentado con regulador teórico. Elaboración Propia

Al realizar los cambios mencionados anteriormente en el controlador, se llega al controlador de la Figura 3.13, en donde el calentamiento hasta la temperatura de cocción se realiza

en 1300 segundos, con un sobre pico máximo del 5.9 %, esto se logró con una ganancia proporcional $K_p = 0{,}0115$ y un tiempo integral de 800 segundos.

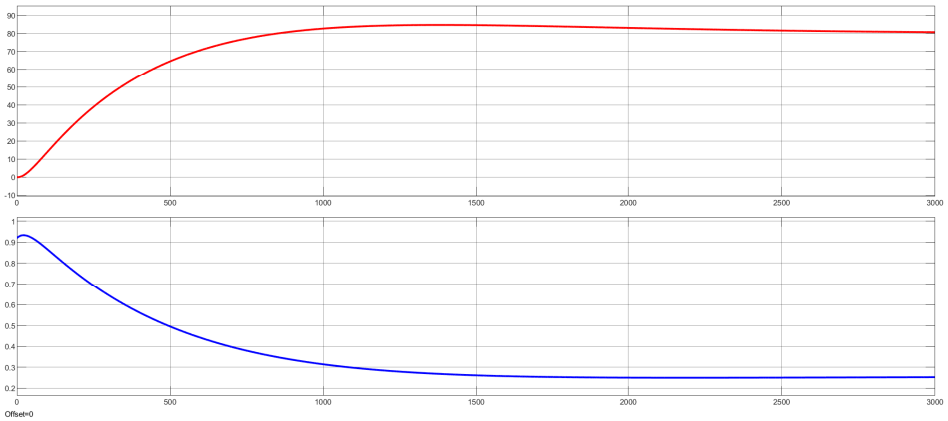


Figura 3.13: Sistema realimentado con limitación en la acción de control. Elaboración Propia

Este control cumple con los requerimientos de diseño, ya que disminuye el tiempo de calentamiento, y sobre todo, elimina la intervención humana en el control del calentamiento.

4. Diseño del sistema de dosificación de almidón

4.1. Descripción del sistema de dosificación

El sistema de dosificación se compone de 2 bombas idénticas, una principal y la redundancia en caso de falla, se encuentran conectadas a un único variador de velocidad que controla las dos bombas con un par de contactores de selección de la bomba. Estas motobombas se encuentran conectadas al tanque de maduración, que es el sitio de almacenamiento luego de la preparación, después del almacenamiento, el almidón cocinado es llevado hacia la caja de nivel para mezclarse con la fibra usada en la formación del papel, en la Figura 3.14 se puede apreciar el sistema de control de dosificación.

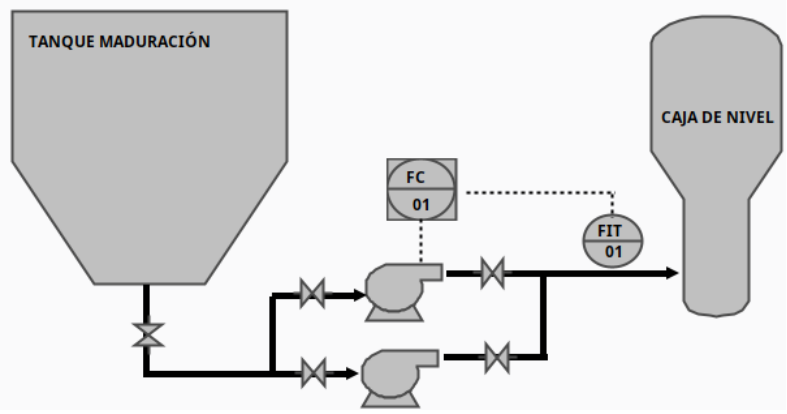


Figura 3.14: Sistema de dosificación del almidón cocinado. Elaboración Propia

4.2. Cálculo de dosificación

Para realizar una correcta dosificación se debe tener en cuenta la producción actual de la planta en Ton/h, esto depende del tipo de papel que se esté produciendo según su peso base (g/m^2) y la velocidad a la que se esté corriendo dicho papel, el cálculo de producción (P) se realiza como se muestra en la ecuación 3.8.

$$P[\frac{Ton}{h}] = Peso[\frac{g}{m^2}] \cdot Ancho[m] \cdot Vel[\frac{m}{min}] \cdot 60[\frac{min}{h}] \cdot \frac{1}{1000000}[\frac{Ton}{g}] \tag{3.8}$$

Se tuvo en cuenta la velocidad promedio a la que se produce cada uno de los papeles en la empresa y acorde a esto se realizó la Tabla 3.5.

Tipo de papel	**Peso Base [$\frac{g}{m^2}$]**	**Vel Tipica [$\frac{m}{min}$]**	**Producción [$\frac{Ton}{h}$]**
LK	120	325	4.68
LK	130	325	5.07
LK	145	325	5.655
LK	165	305	6.039
LK	235	212	5.9784
LK	290	150	5.22
CM	165	316	6.2568

Tabla 3.5: Cálculo de producción de acuerdo al tipo de papel

4.2.1. Concentración de solidos

Se calculó la concentración de solidos de la mezcla de agua con almidón usada para la cocción, esto hace referencia al porcentaje de masa de almidón respecto a la masa de agua, se tomaron medidas al tanque y se realizó el cálculo del volumen de agua, en este caso es de $3{,}23m^3$, en cada preparación se adicionan $100Kg$ de almidón de maíz puro, este cálculo se muestra en la ecuación 3.9, en donde M_A representa la masa total de almidón, M_{H2O} la masa total de agua en la mezcla, V_{H2O} el volumen de agua en la mezcla y ρ_{H2O} la densidad del agua.

$$\begin{aligned} \%Solidos &= \frac{M_A}{M_{H2O}} \cdot 100 \\ &= \frac{M_A[Kg]}{V_{H2O}[m^3] \cdot \rho_{H2O}[\frac{Kg}{m^3}]} \\ &= \frac{100Kg}{3{,}23m^3 \cdot 998\frac{Kg}{m^3}} \cdot 100\,\% = 3{,}10\,\% \end{aligned} \tag{3.9}$$

4.2.2. Dosificación de almidón en el papel

Es necesario realizar el cálculo de cuanto almidón se esta aplicando de manera instantánea a la máquina de formación del papel, teniendo en cuenta que el medidor de flujo

usado, entrega una medida de caudal en l/min (litros por minuto), cabe resaltar que en este cálculo se realizan algunas aproximaciones, una de ellas que la densidad del fluido resultante después de la cocción es la misma que la del agua en estado puro teniendo en cuenta la pequeña concentración de solidos en la mezcla (la disminución de la densidad del agua por temperatura se compensa con el aumento de densidad por la adición del almidón).

Se realiza la conversión de la medida del flujo a Kg/h usando la densidad del agua, como se muestra en la ecuación 3.10

$$\begin{aligned} Q[\frac{Kg}{h}] &= Q[\frac{l}{min}] \cdot \frac{60}{1}[\frac{min}{h}] \cdot \frac{0{,}998}{1}[\frac{Kg}{l}] \\ &= Q \cdot 59{,}88[\frac{Kg}{h}] \end{aligned} \tag{3.10}$$

Conociendo el valor de la producción en Ton/h, el caudal aplicado de mezcla en Kg/h y el porcentaje de almidón, se puede realizar el calculo de la dosificación (D_A) de manera sencilla como se muestra en la ecuación 3.11

$$D_A[\frac{Kg}{Ton}] = \frac{Q[\frac{Kg}{h}]}{P[\frac{Ton}{h}]} \cdot \frac{\%Solidos}{100} \tag{3.11}$$

De esta manera se conoce la dosificación de almidón dependiendo de las variables de producción (velocidad y peso base del papel). Según la especificación de la mezcla óptima para la dosificación de almidón de maíz se debe aplicar 7 Kg/Ton para papeles de tipo Linner Kraft (LK) y de 8 Kg/Ton para papeles de Corrugado Medio (CM).

4.3. Identificación del sistema dinámico de dosificación

Se realizó la curva de reacción para conocer el sistema dinámico que representa el comportamiento del caudal ante una entrada constante de frecuencia (generada con un variador de velocidad), en este caso el escalón fue de 20 Hz y el flujo se tomó en l/min.

Esta prueba se repitió 3 veces con condiciones similares en el experimento, los resultados se pueden apreciar en la Figura 3.15, se evidencia que el sistema se regula en aproximadamente 8 segundos, el valor de estado estacionario es de 20.9 l/min, cabe resaltar que el flujo no comienza en 0 ya que el span del transmisor de caudal usado es de 1.1 a 47.9 l/min, el sistema tiene un comportamiento aproximado de un sistema de segundo orden, con un ζ mayor a 0.7, teniendo en cuenta que el overshoot es menor al 5 %.

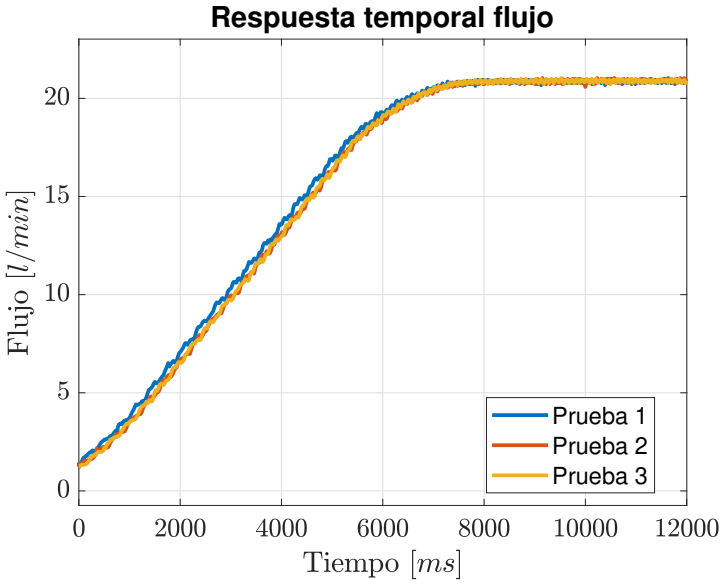


Figura 3.15: Curva de reacción sistema de dosificación. Elaboración Propia

En este caso para la identificación de la planta se usó la herramienta de Matlab System identification, en esta aplicación se agregan los datos de entrada, la curva de reacción mostrada en la Figura 3.15 y se seleccionan las condiciones del sistema deseado, en este caso se aproximó a un sistema de segundo orden, con dos polos y un cero, el resultado obtenido se evidencia en la Figura 3.16

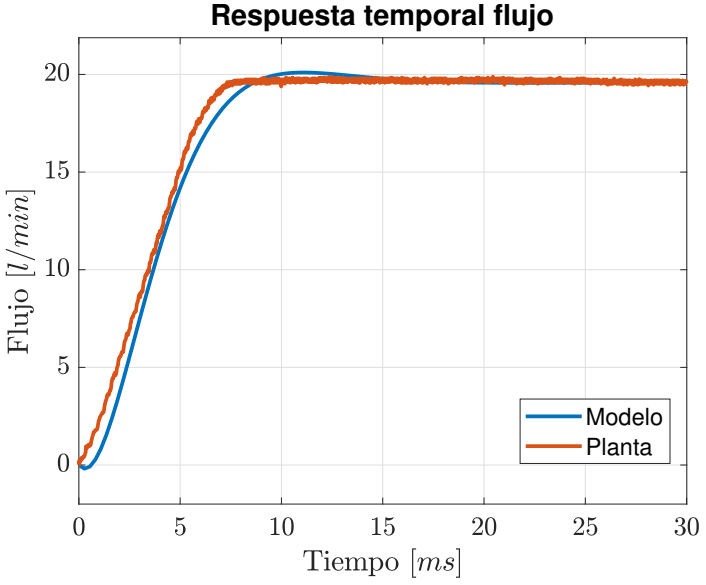


Figura 3.16: Sistema de segundo orden aproximado. Elaboración Propia

El modelo que representa el sistema de dosificación se expresa en la función de transferencia de la ecuación 3.12.

$$G(s) = \frac{-0{,}06539s + 0{,}1953}{s^2 + 0{,}677s + 0{,}1995} \tag{3.12}$$

4.4. Diseño del regulador

En este caso el sistema se aproxima a las características del sistema tipo S planteado en Ziegler y Nichols, se traza la curva tangente al punto de inflexión para calcular los tiempos de retardo y el cruce de esta tangente con la recta de la ganancia, como se puede apreciar en la Figura 3.17

Los parámetros medidos en la gráfica son: $K = 19{,}65$, teniendo en cuenta que la entrada fue de 20, $K = 0{,}9825$, el retardo $L = 0{,}772s$ y el tiempo hasta el cruce con la linea de ganancia $T = 5{,}817s$, con estos datos se calculan los parámetros del regulador PID como se muestra en la Tabla 3.6.

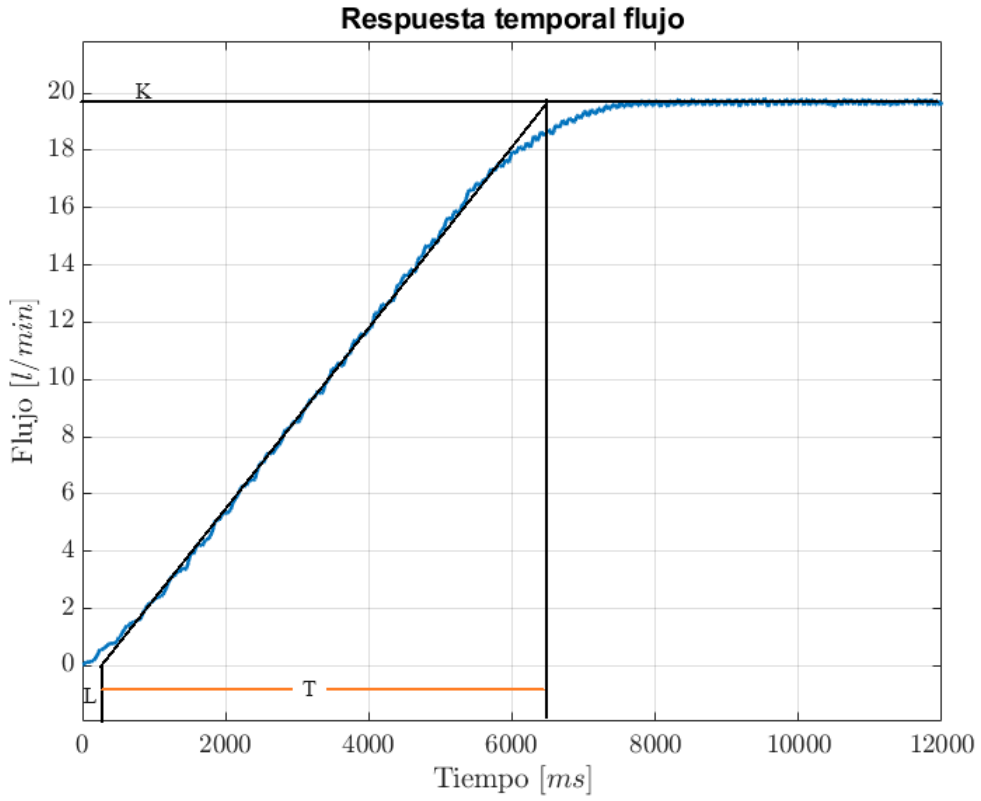


Figura 3.17: Medición de parámetros para sintonización. Elaboración Propia

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$1{,}2\dfrac{T}{L} = 9{,}04$	$2L = 1{,}54$	$0{,}5L = 0{,}39$

Tabla 3.6: Parámetros de sintonización de regulador PID sistema de dosificación

Se realizó la simulación de este sistema en simulink, como se muestra en la Figura 3.18, se aplicó una referencia de $20l/min$.

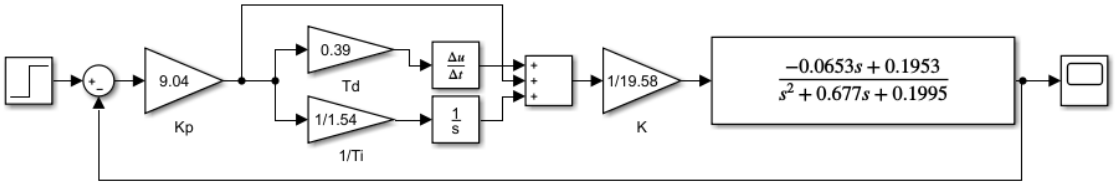


Figura 3.18: Simulación regulador PID flujo. Elaboración Propia

La respuesta temporal obtenida con el controlador PID se puede observar en la Figura 3.19, los parámetros de desempeño obtenidos con este controlador son los siguientes, el sobrepico máximo es del $18\,\%$, el tiempo pico es de aproximadamente $10s$ y el tiempo de establecimiento es de aproximadamente $23s$, el comportamiento obtenido es adecuado para la aplicación planteada en este proyecto.

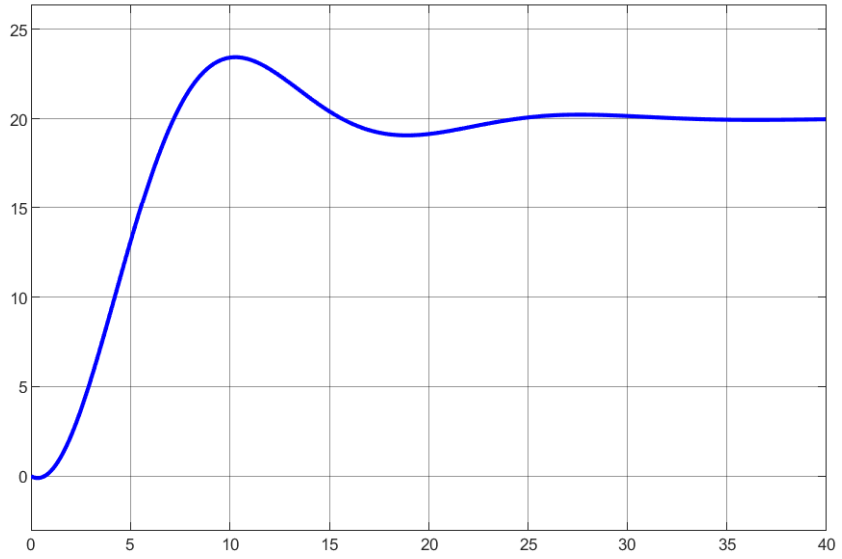


Figura 3.19: Respuesta simulación regulador PID flujo. Elaboración Propia

5. Diseño e implementación de programación PLC

Para la automatización del sistema de cocción y dosificación se usó un PLC Unitronics Vision 1210, como se mencionó anteriormente, este modelo de PLC integra el controlador con la pantalla HMI, del mismo modo el software de programación Visilogic, articula el desarrollo de la lógica de programa y la parte gráfica de la HMI.

5.1. Diseño de la ventana general de operación

Se realizó una ventana principal de operación, en la cual se visualiza de manera general el proceso, en ésta, se aprecian todos los elementos de control y las variables de proceso asociadas al sistema (temperatura, porcentaje de apertura de la válvula de vapor, flujo de almidón, frecuencia de las bombas de dosificación), en esta ventana, se encuentran los botones que direccionan a las pantallas de control (preparación, dosificación) de ajuste del proceso (pantalla de mantenimiento) y de alarmas y fallas del sistema. En esta ventana no se puede realizar ningún cambio del proceso, sin embargo, le otorga al operador la posibilidad de visualizar todo el proceso. En la Figura 3.20 se puede apreciar el diseño de la pantalla de proceso general.

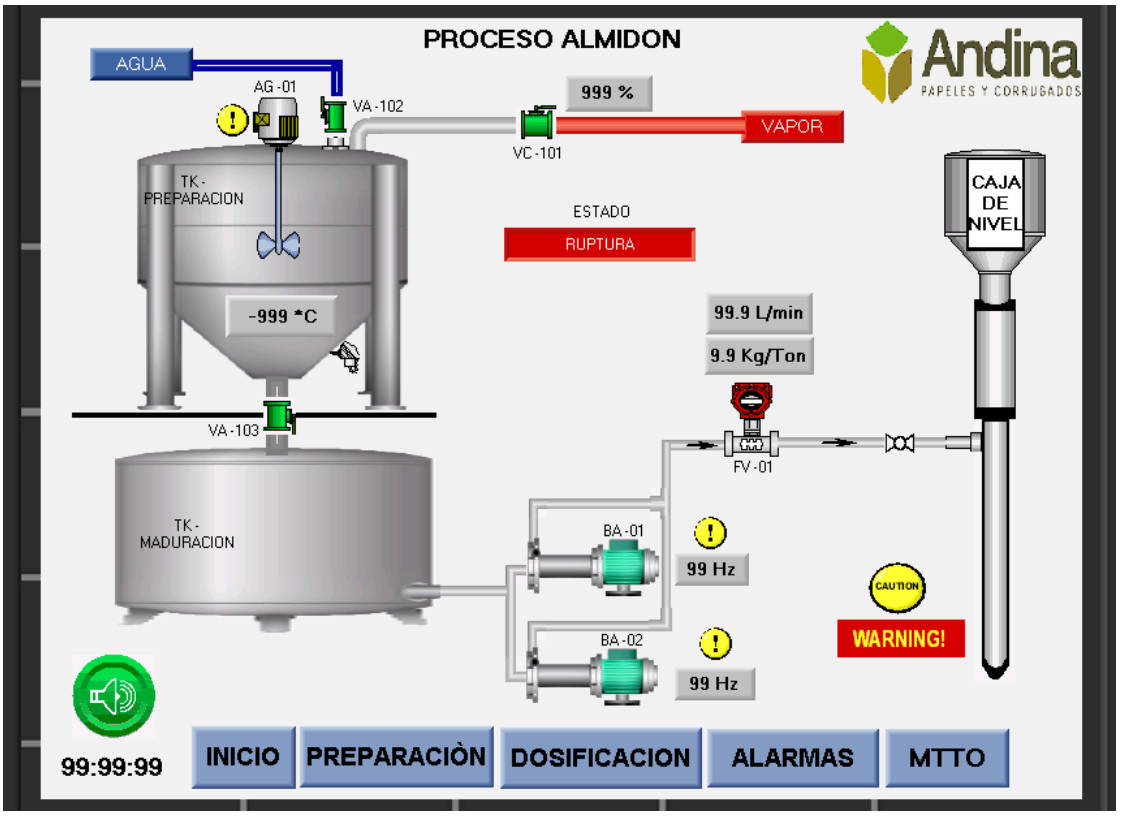


Figura 3.20: Diseño de pantalla general del proceso. Elaboración Propia

Las alarmas que se pueden apreciar en la Figura 3.20 indican cuando se activa la entrada digital del PLC de falla de algún motor del proceso (conectados al guardamotor o variador de los motores dependiendo del caso) y la de la parte inferior izquierda indica un bajo flujo de almidón a pesar que la bomba se encuentre activa y con una referencia superior a 0 Hz, esta alarma tiene el objetivo de indicar al operario que existe una obstrucción mecánica en la tubería de las bombas o que el variador de las bombas presenta algún fallo.

5.2. Implementación de la secuencia de cocción

5.2.1. Diseño de la interfaz gráfica de la secuencia de cocción HMI

La interfaz del mecanismo de cocción se diseño pensando en un modo de acción manual y otro automático, en el modo manual, cualquier elemento puede ser encendido o apagado de manera individual, sin importar el estado del sistema, en el modo automático, los elementos se activarán de acuerdo al paso de la secuencia en el que se encuentre.

El diseño se hizo de forma llamativa para el operario, usando indicadores de estado de cada una de las válvulas y las variables del proceso, entre ellas: temperatura interna del tanque, porcentaje de apertura de la válvula proporcional de entrada de vapor, y tiempo transcurrido desde el inicio de la preparación, en la Figura 3.21 se presenta el diseño final de la pantalla de preparación del almidón.

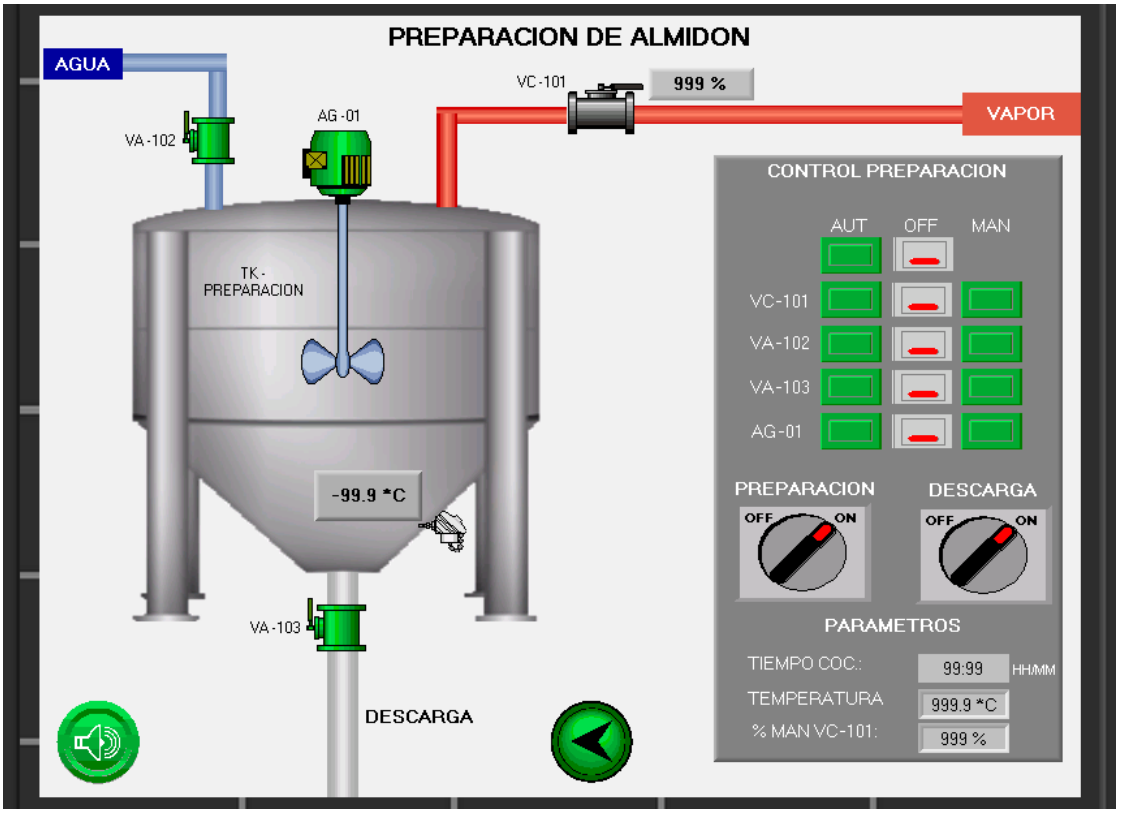


Figura 3.21: Diseño HMI preparación almidón. Elaboración Propia

En la parte izquierda de la pantalla se puede apreciar el estado de cada uno de los elementos del sistema y su ubicación física y en la parte derecha la consola de operación, los primeros botones de la consola representan el modo automático de la secuencia, el botón off general apaga todos los elementos que se encuentren activos y los botones particulares activan los elementos de manera discreta, en la siguiente sección de la consola se encuentra el botón de inicio de secuencia y el botón de inicio de descarga y por último se encuentran los parámetros del proceso mencionados anteriormente, incluyendo una ventana de entrada para apertura manual de la válvula proporcional de vapor.

5.2.2. Diseño de la secuencia lógica de programación

El diseño de la secuencia de cocción se realizó en Grafcet, tomando cada uno de los pasos de la cocción como etapas del diagrama grafcet, en la Figura 3.22 se puede apreciar la secuencia diseñada para la automatización del sistema de preparación del almidón en grafcet de alto nivel.

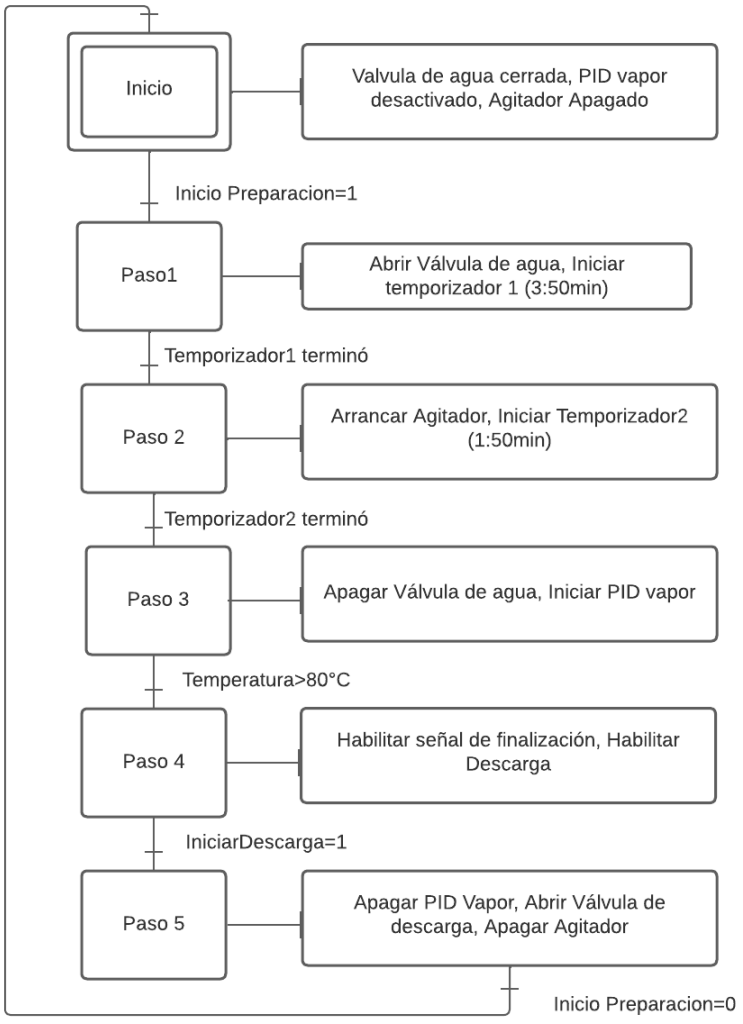


Figura 3.22: Secuencia de cocción automática. Elaboración Propia

teniendo en cuenta que este PLC no cuenta con la opción de programación en lenguaje SFC, la implementación se realiza usando un secuenciador en ladder, en donde cada paso mas la condición de transición habilitan el siguiente paso y deshabilita el anterior, en la Figura 3.23 se puede apreciar la implementación que se hizo del secuenciador mencionado anteriormente.

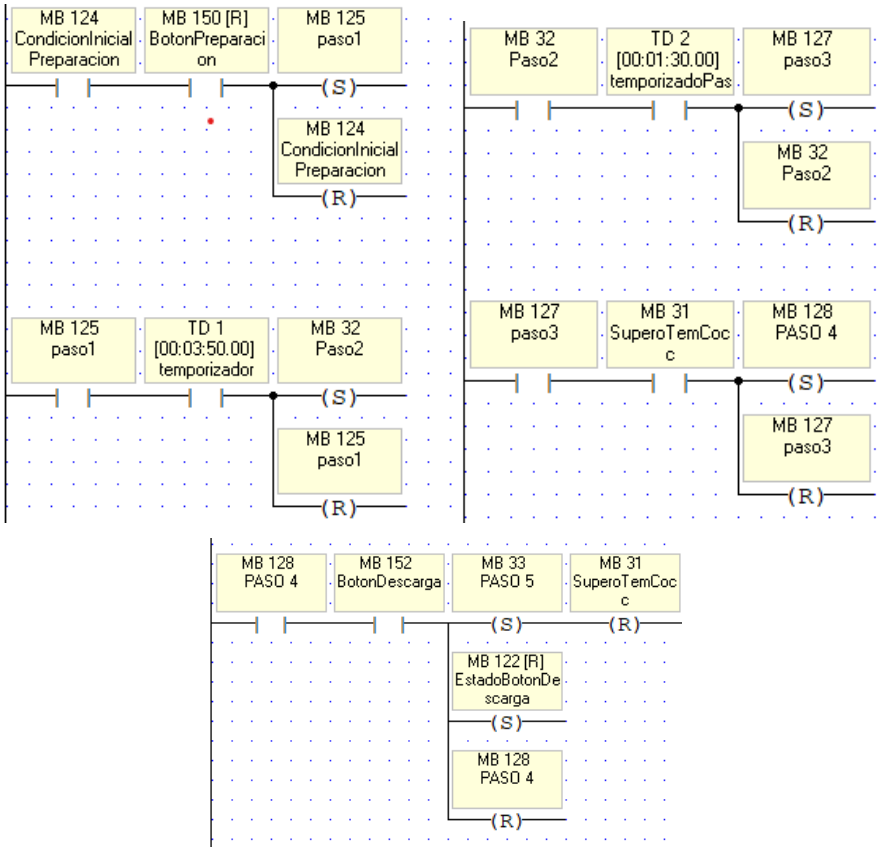


Figura 3.23: Implementación secuenciador en ladder. Elaboración Propia

En cada uno de los pasos se activa o se desactiva una bobina que representa el arranque automático de los elementos que hacen parte de secuencia de preparación del almidón, sin embargo, adicional a esto se adicionó una opción de arranque manual de cada uno de los elementos, en la Figura 3.24 se puede apreciar un ejemplo de la implementación del modo de accionamiento manual o automático de uno de los elementos del sistema, los demás se hicieron de manera análoga.

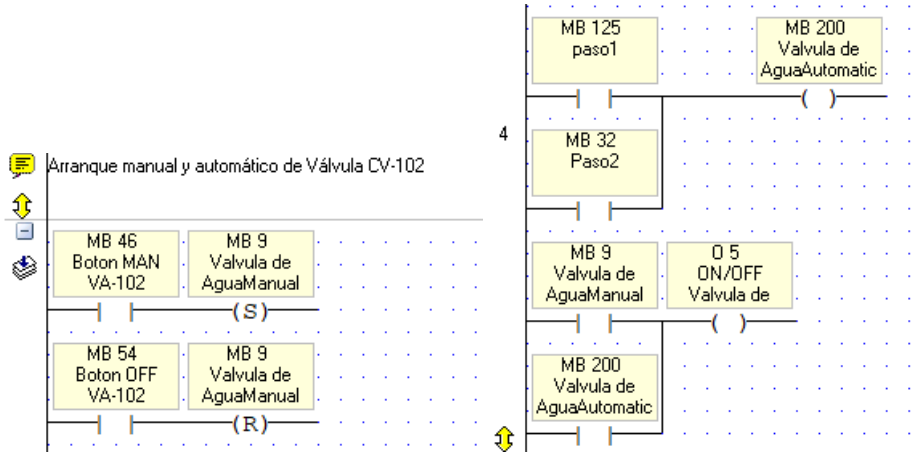


Figura 3.24: Arranque manual y automática válvula CV-102. Elaboración Propia

5.3. Implementación del sistema de dosificación del almidón

5.3.1. Diseño de la interfaz gráfica del sistema de dosificación

La pantalla de dosificación se realizó de manera similar a la de preparación, como se puede ver en la Figura 3.25, contiene una consola de operación en la parte superior izquierda y la descripción gráfica del proceso en el que se encuentra el estado de las bombas y su frecuencia de funcionamiento y el indicador de caudal con la medida instantánea de dosificación en l/min y Kg/Ton, el panel de operación tiene las dos bombas con modo de funcionamiento manual y automático de igual manera el set point de dosificación.

El modo manual de las bombas arranca cada una de las bombas y permite el ingreso de la frecuencia a la cual funcionará el variador de velocidad de las bombas, si está activado el modo automático de las bombas existen dos posibilidades, set point automático, que dependiendo del tipo de papel (LK o CM) cambiará la consigna de dosificación a 7 o 8 Kg/Ton respectivamente, con el set point en modo manual el operario podrá ingresar la dosificación que considere necesaria dependiendo de los resultados de calidad del laboratorio.

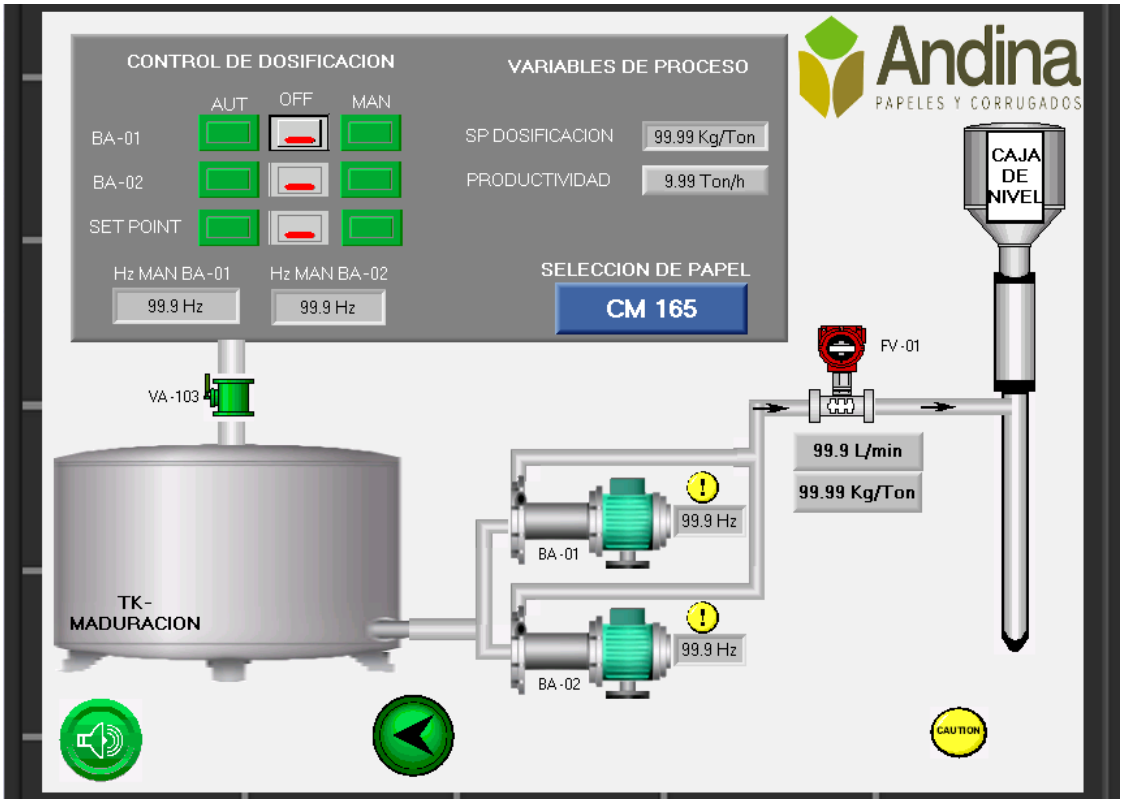


Figura 3.25: Diseño HMI dosificación almidón. Elaboración Propia

En la parte derecha de la consola de operación se encuentran las variables del proceso en el cual el operario podrá ingresar el set point manual de dosificación, se visualiza la productividad instantánea dependiendo del tipo de papel y la selección del papel que se hace a través de un botón que cambia el tipo de papel y la productividad de acuerdo a la tabla 3.8 cada vez que se oprime.

5.3.2. Diseño de lógica de programación del sistema de dosificación del almidón

Para la dosificación se debe controlar la señal digital de arranque de las bobas y la frecuencia de operación, la señal digital se controla de manera similar a lo planteado en la lógica de preparación, una bobina que habilita la salida si se encuentra en manual y una bobina que enciende las bombas en modo automático, además se ingresa el interlock de ruptura que es una señal digital que informa cuando la máquina de formación del papel no se encuentra produciendo de manera habitual y la dosificación se detiene, en la Figura 3.26 se aprecia el renglón en el que se aprecia la lógica de activación de una de las bombas.

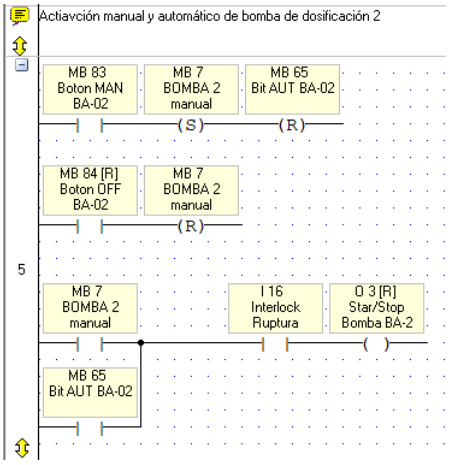


Figura 3.26: Lógica de activación Bomba 2. Elaboración Propia

Se realiza el cálculo de la dosificación en Kg/Ton usando las ecuaciones de la sección anterior en las cuales se relaciona la productividad y el flujo en l/min, en la Figura 3.27 se puede ver la manera en que se realiza este cálculo en el PLC, la respuesta está multiplicada x 100 con el fin de realizar todas las operaciones con enteros y en la visualización tomar las dos cifras menos significativas como decimales.

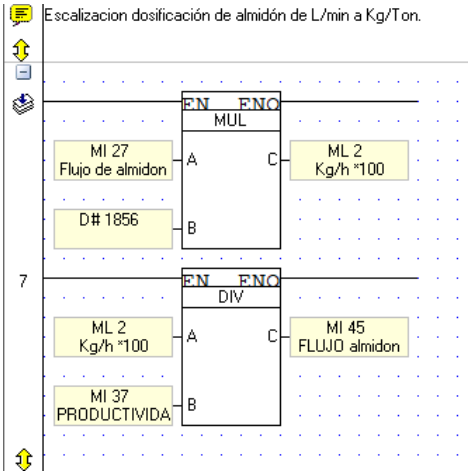


Figura 3.27: Cálculo de dosificación en Kg/Ton. Elaboración Propia

Por otro lado tenemos la selección de set point, si la selección del botón está en manual, se guarda en el registro set point el dato que se está leyendo en la ventana de ingreso, si el set point está en automático se evalúa si el papel es corrugado medio ($MI50 = 6$) o si es linner kraft ($MI50 <> 6$) y se escribe en la variable set point 800 (8.00) o 700 (7.00) respectivamente, esta operación se puede apreciar en la Figura 3.28, posteriormente este valor de set point se coloca como consigna en el controlador PID.

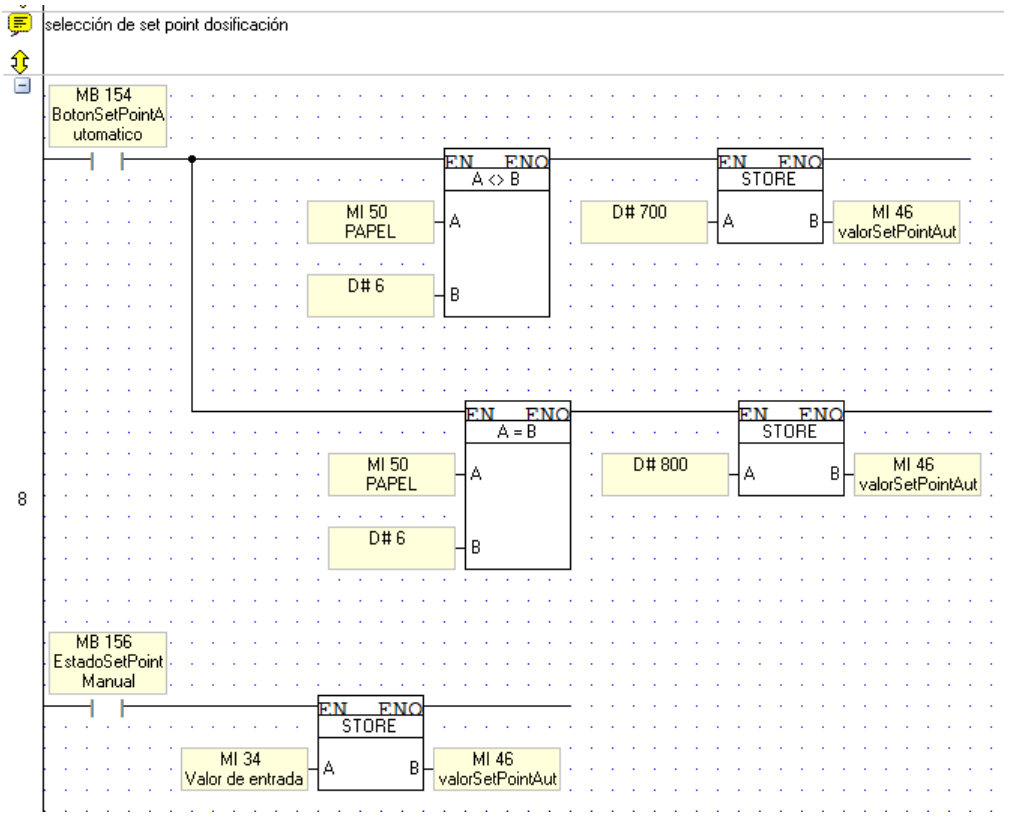


Figura 3.28: Asignación de set point manual automático. Elaboración Propia

5.4. Implementación de reguladores de temperatura y caudal

5.4.1. Regulador de temperatura

El set point de temperatura se toma de la ventana de preparación, es un número entre 0 y 1000, siendo repartido este número de 4 cifras en 3 dígitos enteros y un decimal, el habilitador del bloque PID está activo únicamente en los pasos 3 y 4 de la secuencia automática, en la Figura 3.29 se puede apreciar las variables asignadas como set point (MI12), la variable de proceso está relacionada a la temperatura de la mezcla (MI1) y la variable de control (MI51).

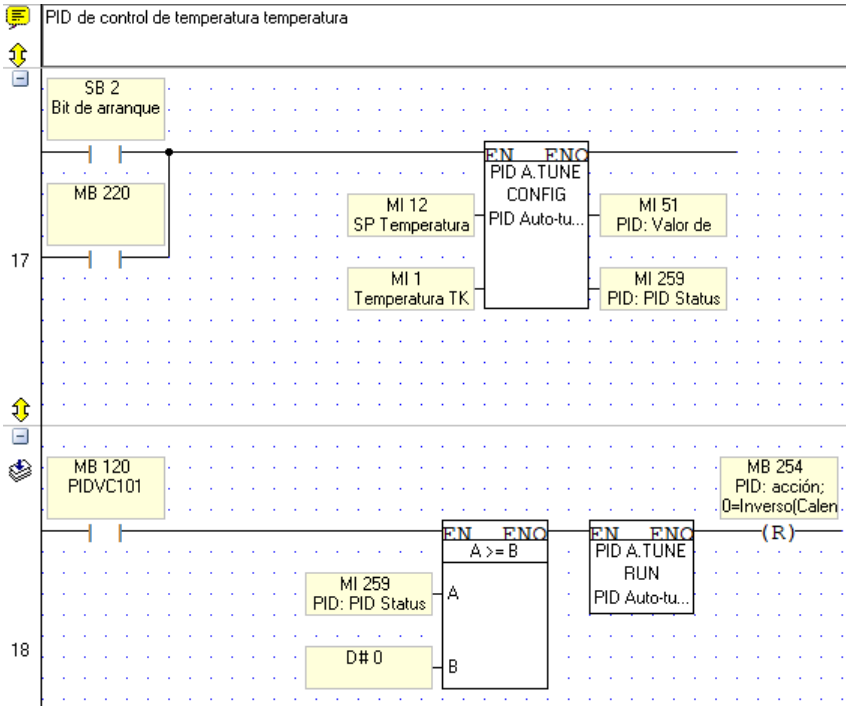


Figura 3.29: Lógica regulador de temperatura de cocción PID. Elaboración Propia

La parametrización del controlador se realiza dentro del bloque de configuración como se puede ver en la Figura 3.30, ahí se asignan las variables designadas para las constantes del controlador: Banda proporcional (MI250), tiempo Integral (MI251), tiempo derivativo (MI252), los valores mínimos y máximos de la variable de proceso, en este caso de 0 a 1000 (0 a 100.0 °C) y la variable de control de 0 a 100 (porcentaje de apertura de la válvula proporcional), los valores que se aprecian en la Figura 3.30, son los valores por defecto cuando se energiza el PLC.

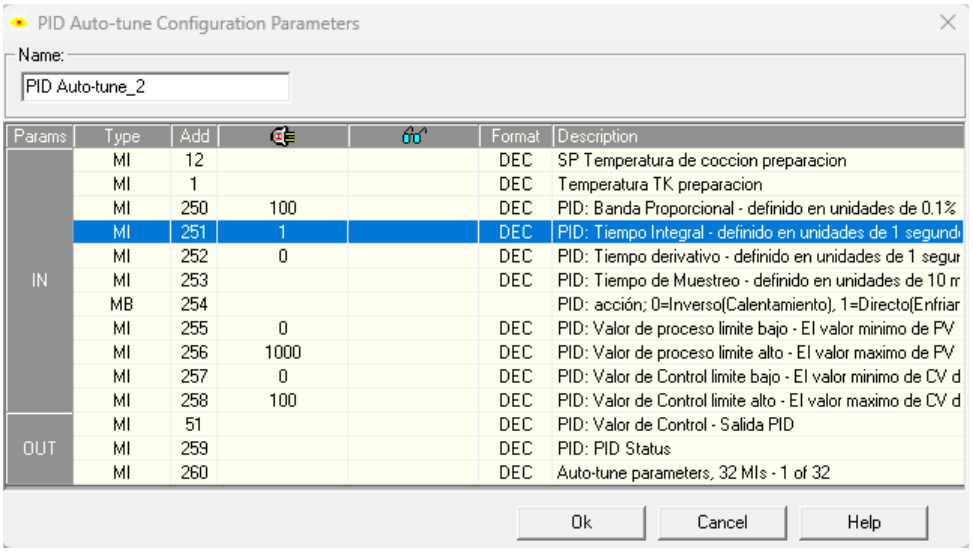


Figura 3.30: Parametrización regulador de temperatura de cocción PID. Elaboración Propia

5.4.2. Regulador de caudal

El controlador de caudal PID está activo siempre y cuando el botón set point se encuentre en modo automático o manual, el valor de la consigna se selecciona de acuerdo al estado del botón set point, como se explicó en la **Sección 7.2 Implementación del sistema de dosificación del almidón**, en este caso la variable de proceso es el valor de la dosificación del almidón en Kg/Ton, y la variable de control la salida en frecuencia para las bombas, como se puede ver en la Figura 3.31

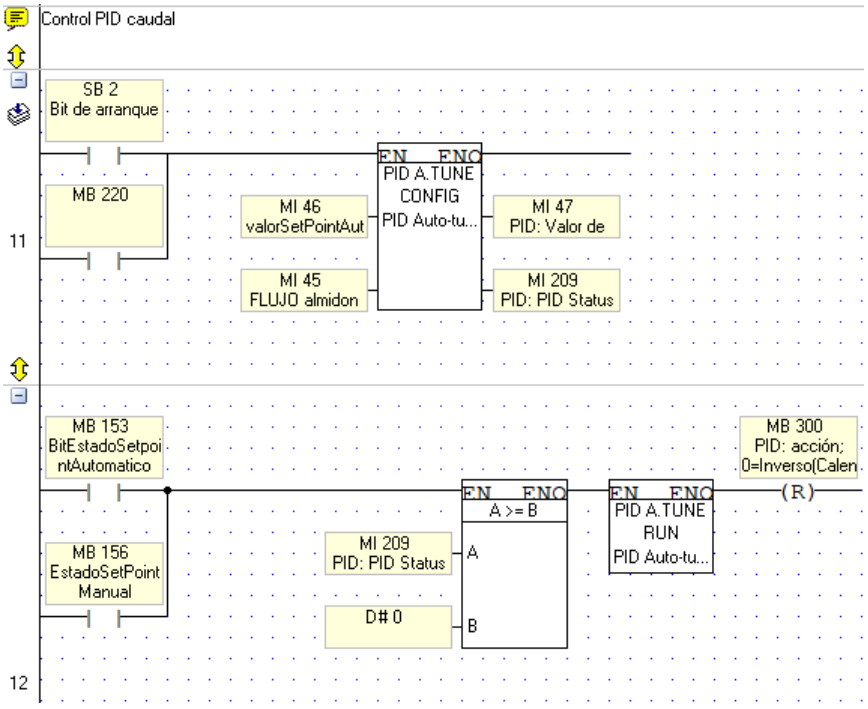


Figura 3.31: Lógica regulador de dosificación PID. Elaboración Propia

La configuración de los parámetros K_p, T_i, T_D, se realiza asignando los registros correspondientes en el bloque de configuración, en este caso la variable de proceso mínima y máxima se configura entre 0 y 8724 (0.0 y 87.24) Kg/Ton que es el máximo teórico calculado, la variable de control se configura entre 0 y 600 (0.0 y 60.0) Hz, como se puede apreciar en la Figura 3.32.

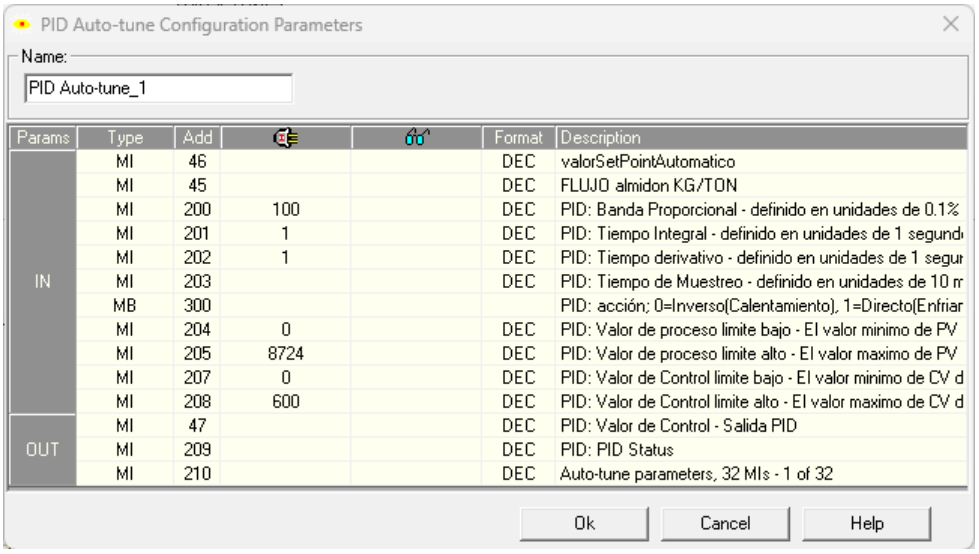


Figura 3.32: Configuración regulador de dosificación PID. Elaboración Propia

5.4.3. Interfaz de configuración de parámetros de reguladores

Para la configuración de los parámetros se creó una pantalla de mantenimiento a la cual para acceder se debe introducir una contraseña únicamente conocida por el personal autorizado, esta pantalla se puede apreciar en la Figura 3.33

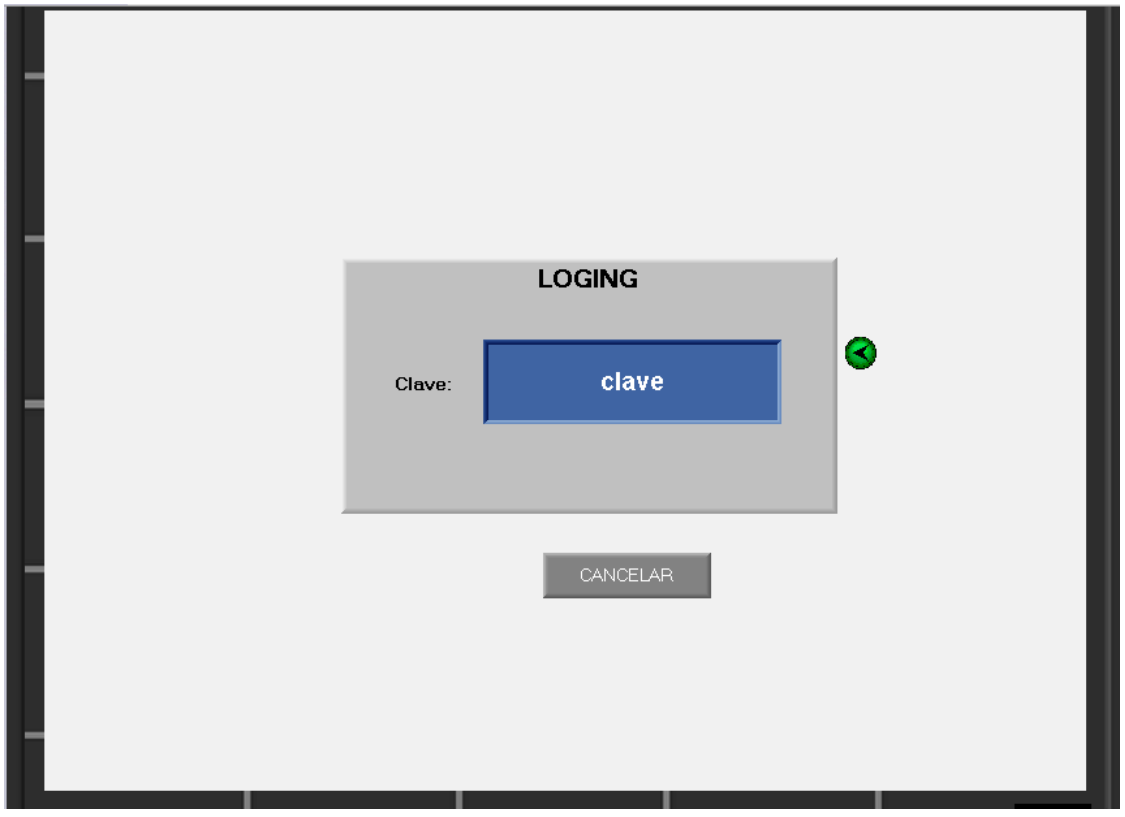


Figura 3.33: Pantalla de acceso a configuración de parámetros PID. Elaboración Propia

Al ingresar la contraseña se da acceso a la pantalla de configuración de los parámetros PID, como se puede apreciar en la Figura 3.34, acá se configuran los parámetros de los dos reguladores, estos registros solamente recibe valores enteros entre 0 y 32767, el valor de K_p se da en 0.1 % de unidades de la banda proporcional que es el inverso de la ganancia proporcional, y los valores T_i y T_D en valores de tiempo.

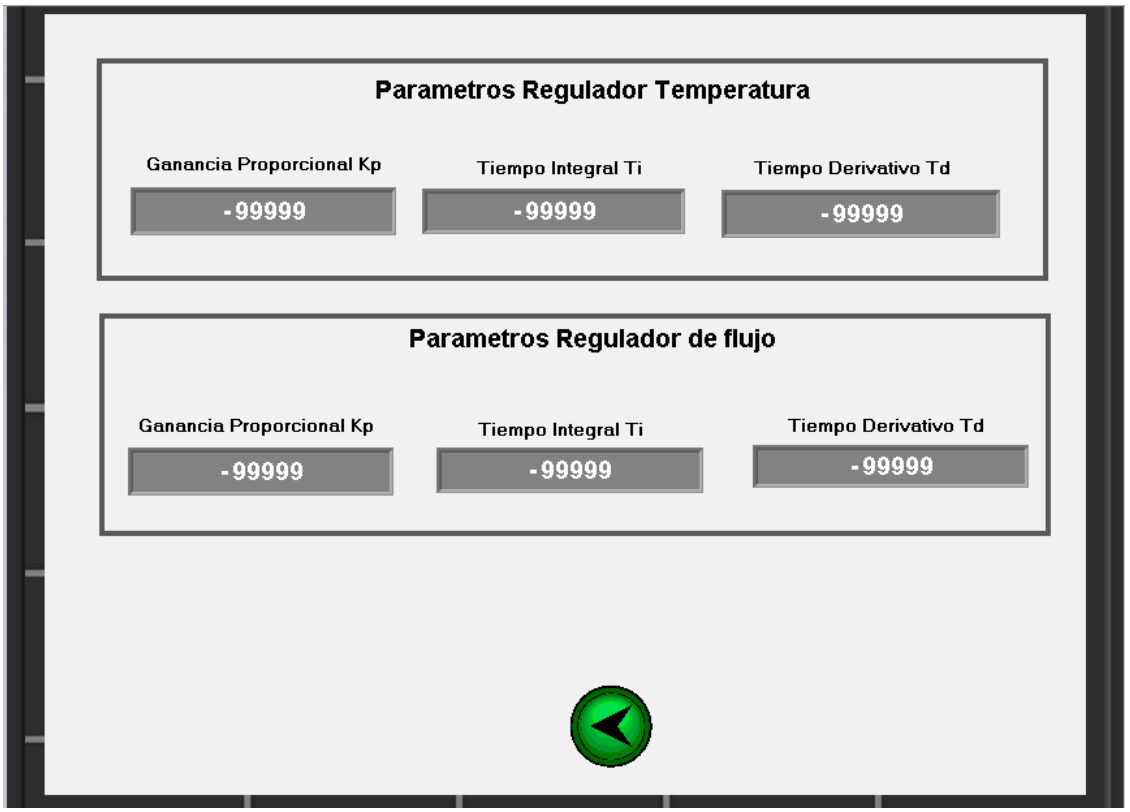


Figura 3.34: Pantalla de configuración de parámetros PID. Elaboración Propia

6. Pruebas de validación de sistema de cocción y dosificación

6.1. Validación de regulador de dosificación de almidón

Al sintonizar el regulador PID con los parámetros encontrados en la **sección 6.4 Diseño del regulador**, se comprobó el desempeño del regulador ante una consigna constante, como se puede apreciar en la Figura 3.35, se realizó la toma de datos de 3 pruebas en instantes diferentes con una misma consigna, iniciando con la bomba dosificadora apagada.

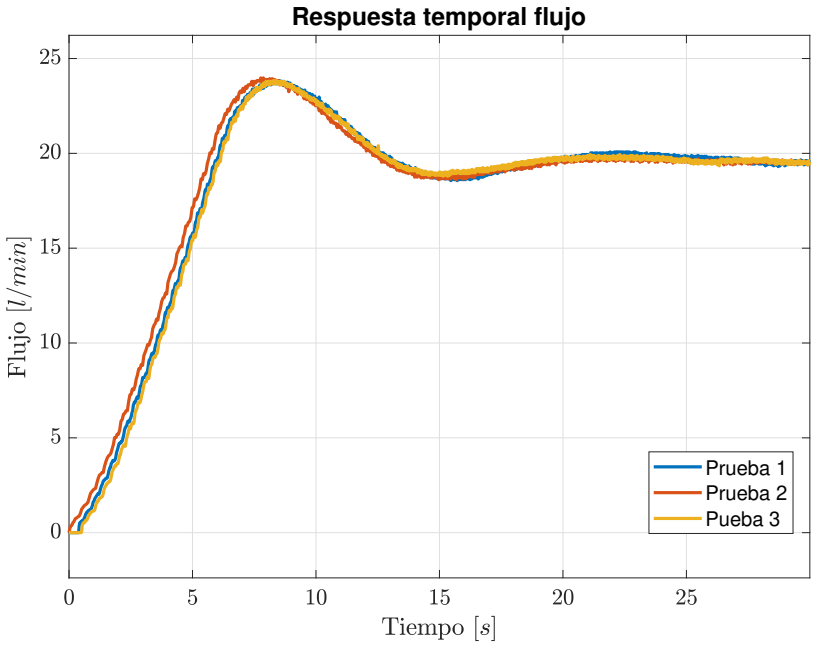


Figura 3.35: Control PID dosificación de almidón. Elaboración Propia

Se puede apreciar que el tiempo pico es de 8.2s en promedio, se puede considerar el sistema en estado estable a partir de 20s, con un sobrepico máximo de 20 %, el máximo al que llega la señal es de 23.8 l/min y el valor de estado estacionario es de 19.56 l/min.

Al realizar la comparación con el diseño teórico, se puede apreciar que el sistema tiene un comportamiento más rápido con respecto al diseñado, el overshoot es 1 % mayor al diseñado, En la Figura 3.36 se puede apreciar la diferencia entre el regulador simulado y el regulador implementado y medido en la planta.

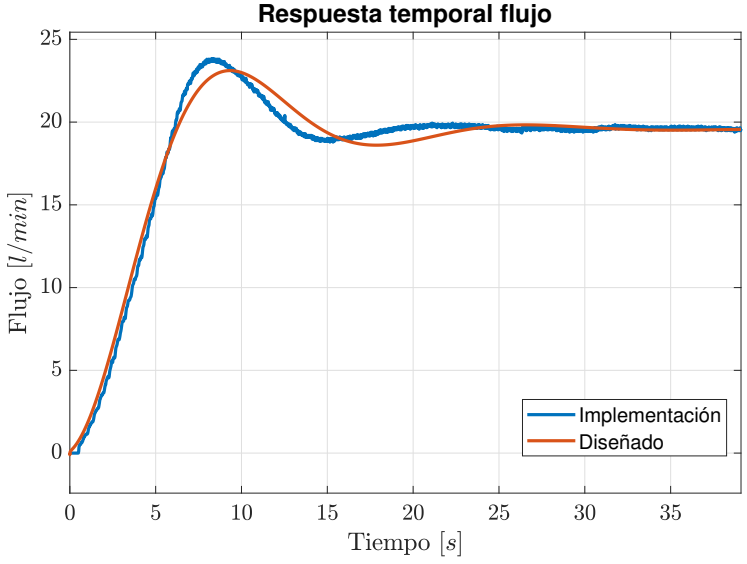


Figura 3.36: Comparación entre regulador diseñado e implementado. Elaboración Propia

Para verificar el comportamiento del controlador ante los cambios de consigna, se realizó una prueba en la cual se fue aumentando la consigna de dosificación y luego se disminuyó, en la Figura 3.37 se puede apreciar la respuesta del controlador, para todos los cambios de referencia ascendentes se puede apreciar un overshoot igual al apreciado en la Figura 3.36, en los descensos de set point se puede apreciar un undershoot de magnitud similar al overshoot.

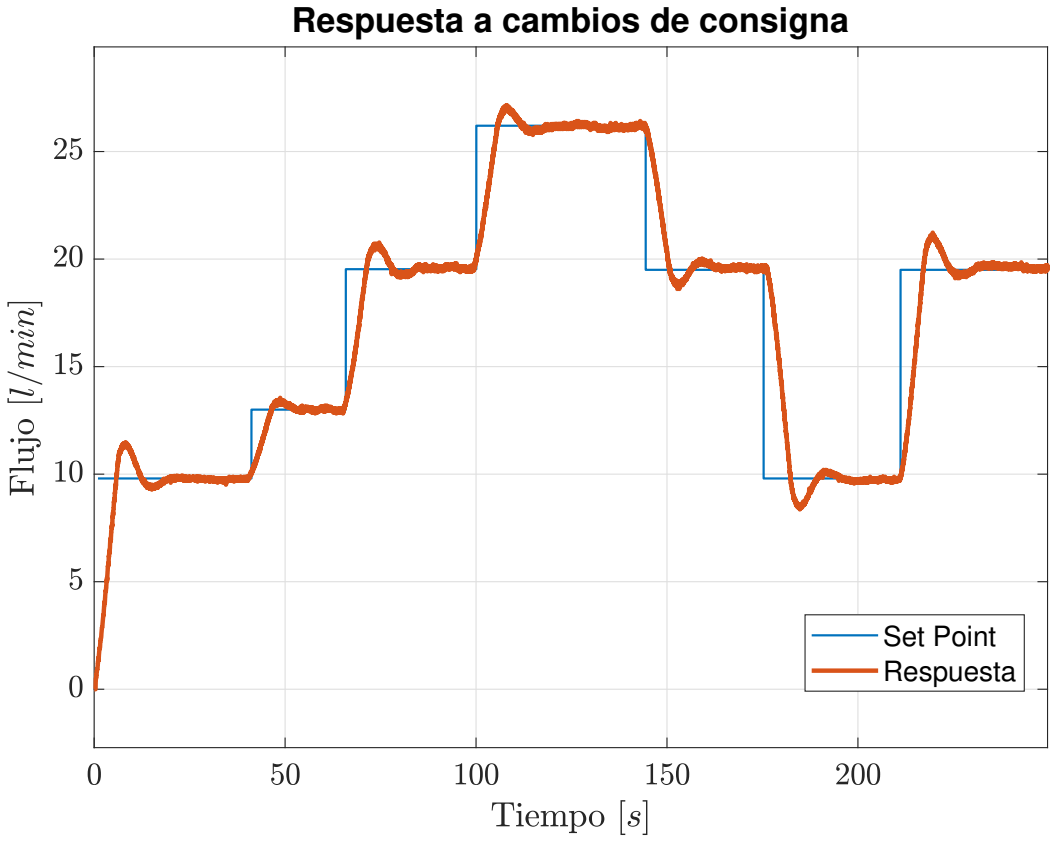


Figura 3.37: Respuesta del regulador a cambios de consigna. Elaboración Propia

En la Figura 3.37 se puede apreciar que el regulador cumple de manera exitosa la funcionalidad para la cual fue diseñado y el desempeño temporal analizando: tiempo de establecimiento, capacidad de seguimiento de la consigna, sobre pico máximo y oscilaciones es muy bueno.

6.2. Validación de regulador PI de preparación del almidón

Se implementó el regulador PI en el PLC unitronics vision 1210, el sistema cuenta con una válvula manual de entrada, la cual sirve de reguladora del caudal de vapor, los datos iniciales se tomaron con una apertura de válvula de aproximadamente el 50 %, de esta manera se obtuvieron los resultados del controlador que puede apreciarse en la Figura 3.38.

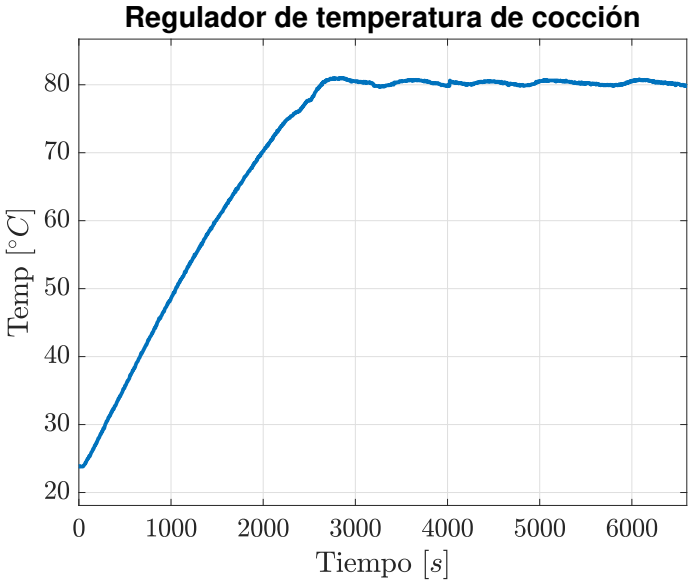


Figura 3.38: Respuesta del regulador de temperatura. Elaboración Propia

En este caso se puede apreciar un sobre pico menor al 2 % un tiempo de estado estacionario aproximado de 3000 s y un control adecuado de la temperatura luego de lograr la cocción, sin embargo, el tiempo de cocción se puede considerar elevado si se está produciendo papel CM 165, en donde la cantidad de almidón aplicado y la productividad es mayor, por tanto, la dosificación aumenta, es necesario disminuir aún más el tiempo de cocción, por esta razón fue necesario aumentar el caudal de vapor al tanque de preparación, abriendo más la válvula manual que se encuentra en la línea de vapor saturado, realizando este cambio se obtuvo la respuesta de la Figura 3.39, en donde, a pesar que se disminuyó el tiempo de cocción, se aumentaron las oscilaciones, debido al tiempo de respuesta del control.

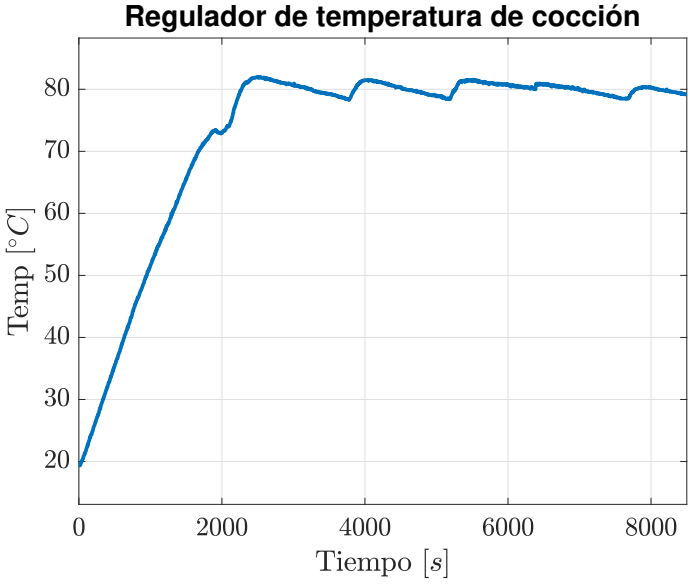


Figura 3.39: Respuesta del regulador al aumentar el caudal de vapor. Elaboración Propia

Se realizó un ajuste a la sintonización del controlador aumentando la ganancia proporcional, con el fin de obtener una respuesta más rápida (acción de control mas grande) en los errores cercanos a 0 y se aumentó el caudal de vapor al sistema, en la Figura 3.40 se puede apreciar que se logró un tiempo de cocción de aproximadamente 1100 s, un sobre pico del 3.7 %, se redujo el valor de las oscilaciones, especialmente cuando el error es positivo (variable de proceso menor al set point), además, al aumentar el flujo de vapor en la mezcla se aprecia que se logra disminuir el retardo producido por la gelatinización del almidón.

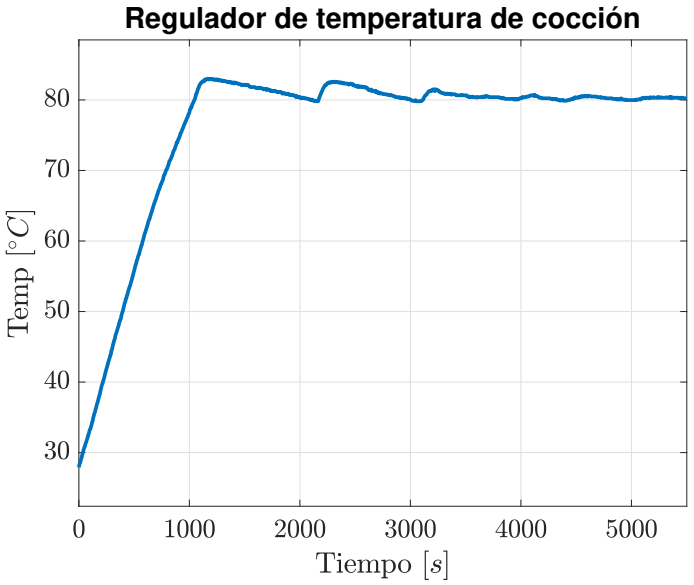


Figura 3.40: Respuesta del regulador al aumentar el caudal de vapor y la ganancia proporcional. Elaboración Propia

6.3. Validación programación PLC

Se ajustó con la ayuda de los operarios los tiempos de llenado del tanque para garantizar la cantidad de agua requerida en la preparación, se verificó el correcto funcionamiento de la secuencia de preparación, en la Figura 3.41 se puede apreciar la visualización de la pantalla de proceso general en funcionamiento, esta se obtuvo a través de la aplicación HMI remote, del fabricante del PLC, en el cual se monitoriza el estado del PLC de manera remota.

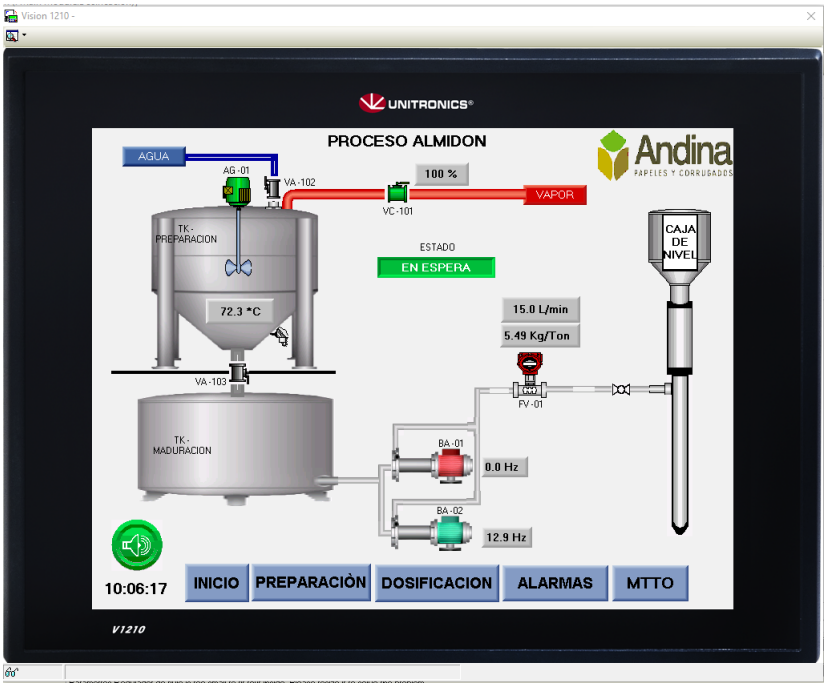


Figura 3.41: PLC en funcionamiento, ventana general del proceso. Elaboración Propia

En la Figura 3.42 se puede apreciar la ventana de preparación, en la cual se puede apreciar el estado de los elementos de la preparación, en este caso se encuentra el agitador encendido y la válvula de vapor abierta por completo (100 %), la temperatura es cercana a los 74°C, por lo que está completando el ciclo de cocción, en el ciclo grafcet se encuentra en el paso 3, esperando a superar la temperatura de cocción.



Figura 3.42: PLC en funcionamiento, ventana de preparación. Elaboración Propia

En la Figura 3.43 se puede apreciar el funcionamiento de la ventana Dosificación, en la cual se muestra el estado de las bombas 1 y 2 (apagada y encendida respectivamente), en este caso por petición del supervisor de producción el set point de dosificación se encuentra fijado de manera manual en 5.5 Kg/Ton, el papel que se está produciendo es Linner Kraft de 130 g/m^2, la referencia automática de la bomba está en 12.9 Hz y el caudal de almidón es de 15.1 l/min

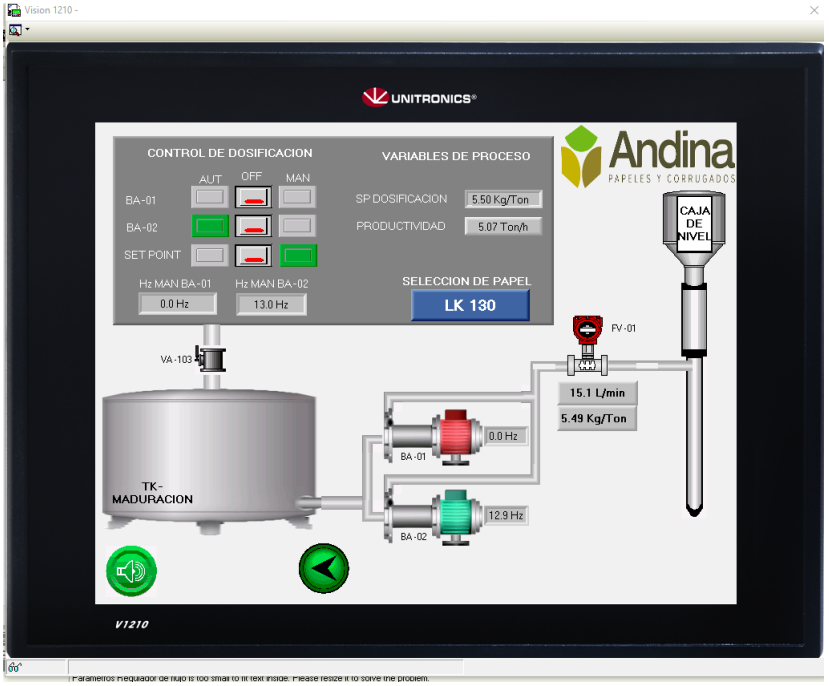


Figura 3.43: PLC en funcionamiento, ventana de dosificación. Elaboración Propia

Al estar en línea en el PLC se verifica el estado del bloque PID usado para implementar el control de temperatura, se puede apreciar en la Figura 3.44, que se obtiene una lectura de 796 (79.6 °C), el set point está en 800 (80.0 °C) y la acción de control en este instante de tiempo es de 23 (23 % de apertura de la válvula)

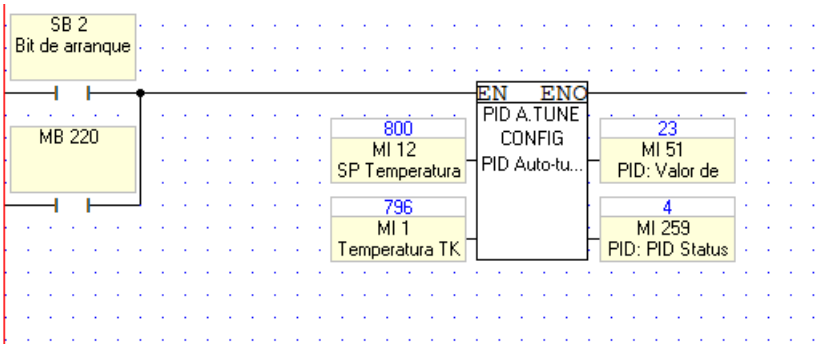


Figura 3.44: PLC en funcionamiento, estado de bloque PID temperatura. Elaboración Propia

Conclusiones

- Se logró reducir la intervención del operario de control proceso en la preparación y dosificación del almidón de maíz, automatizando parte del proceso, sin embargo, se podría aumentar el nivel de automatización, eliminando por completo la intervención humana e introduciendo las variables de este proceso al sistema Scada de la empresa.
- La sintonización de los reguladores PID se vio limitada, ya qué, la banda proporcional, tiempo integral y tiempo derivativo únicamente pueden ser valores enteros en este PLC, sin embargo se logró un buen desempeño en los dos casos, cumpliendo con los objetivos planteados en este proyecto.
- Se redujo el tiempo de cocción en un 60 % aproximadamente aumentando el flujo de vapor en el calentamiento e implementando el regulador con la válvula de control.
- Se estandarizó el proceso de dosificación en función del tipo de papel y su productividad (velocidad de producción).
- Se usaron diferentes técnicas para llegar a los modelos dinámicos que representan el comportamiento del sistema de preparación y dosificación.
- Se obtuvo un modelo del sistema de dosificación bastante aproximado a la realidad, lo que significó obtener comportamientos similares en simulación y en la planta, sin embargo, el comportamiento del sistema de preparación es difícil modelarlo con un sistema lineal de orden 1 o 2.
- Para reducir costos del proyecto se realizó una secuencia programada por tiempo (en lazo abierto), esto puede generar inconvenientes en el futuro si la condiciones del sistema cambian.
- Se realizó una verificación de los instrumentos de medición usando patrones con el fin de garantizar la eficacia de los controladores de caudal y temperatura.

Bibliografía

[1] N. Patil, R. G. Datar, and D. R. Patil, "System identification of a temperature control process using open loop and closed loop methods," in *2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, pp. 240–246, 2018.

[2] N. S. Narkhede, A. B. Kadu, and S. Y. Sondkar, "Labview based system for pid tuning and implementation for a flow control loop," in *2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, pp. 436–442, 2016.

[3] M. Chattal, V. Bhan, H. Madiha, and S. A. Shaikh, "Industrial automation control trough plc and labview," in *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*, pp. 1–5, 2019.

[4] T. Pereira, A. Neves, F. Silva, R. Godina, L. Morgado, and G. Pinto, "Production process analysis and improvement of corrugated cardboard industry," *Procedia Manufacturing*, vol. 51, pp. 1395–1402, 2020. 30th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2021).

[5] S. Gulpanich, V. Krongratana, A. Srimuang, V. Tipsuwanporn, and N. Wongvanich, "Plc-based industrial temperature controller with different response times," in *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 522–527, 2017.

[6] varios autores, "Principio de funcionamiento y ventajas de los vdf."

[7] J. ESCAÑO GONZÁLEZ, A. NUEVO GARCIA, and J. GARCÍA CABALLERO, *Integración de sistemas de automatización industrial*. Ediciones Paraninfo, S.A, 2019.

[8] J. Yépez, "Obturadores utilizados para las válvulas de característica lineal," Jan 1970.

[9] NTGDValve, "Válvula de compuerta de cuña resistente."

[10] Valveseal, "Válvulas de bola."

[11] Valveseal, "Válvulas de globo."

[12] M. Thomann, "Característica y dirección de rotación potenciómetros."

[13] Libretexts, “9.7: Galgas extensométricas,” Nov 2022.

[14] PRelectronics, “Los fundamentos de los sensores de temperatura rtd.”

[15] EUROHEATERS, “Termistores ntc.”

[16] descubrearduino, “Ldr o resistencia dependiente de la luz, light dependent resistor.”

[17] tableroalparque, “Introducción a los sensores.”

[18] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, 2002.

[19] D. Chuk, “Los sistemas de primer orden y los controladores pid.”

[20] AUTRACEN, “Estructura de plc,” Jun 2021.

[21] P. Asensio, R. Vilanova, and R. Arbós, *Automatización de procesos mediante la guía GEMMA*. Aula Politècnica, Edicions de la UPC, S.L., 2005.

[22] P. S. S. y. R. H. Alberto Brunete, “Introducción a la automatización industrial.”

[23] S. electric, “Variador de frecuencia altivar 312.”

[24] IndiaMart, “Magnetic flow meter.”

[25] J. A. Velásquez, M. F. Acevedo, and A. Villa, “Producción de almidón zwitteriónico a partir de almidón de papa para la industria papelera,” Jan 1970.

[26] M. Jimenez, “Evaluación de la resistencia a la absorción de agua, ataque de termitas nasutitermes corniger y las propiedades de un material lignocelulósico,” 2015.

[27] K. Teschke and P. Demers, *Capitulo 72 Industria del Papel y de la pasta de papel*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), 2012.

[28] scrib, “Refinacion.”

[29] C. Leon and M. FUENTES, *DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA FABRICACIÓN DE PAPEL RECICLADO ECOLÓGICO A ESCALA LABORATORIO USANDO PERÓXIDO DE HIDRÓGENO*. PhD thesis, 2012.

[30] Z. R. López. Freddy, “Válvulas de control.”

[31] S. electric, “Lenguaje de diagrama de bloques de funciones (fbd).”

[32] IEEC, “Controladores industriales inteligentes.”

[33] D. C, “Adaptive control applications in pulp and paper,” 1993.

[34] C. E. Graf, E. A. Skogsholm, and W. K. Volkmann, “Practical design considerations or inverter drives,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-9, no. 5, pp. 593–600, 1973.

[35] P. M. Meshram, "Tuning of pid controller using ziegler-nichols method for speed control of dc motor," *IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM -2012)*, p. 117, 2012.

[36] R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar, and S. N. Pawar, "A review of pid control, tuning methods and applications," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 9, pp. 818–827, 6 2021.

[37] O. A. Somefun, K. Akingbade, and F. Dahunsi, "The dilemma of pid tuning," *Annual Reviews in Control*, vol. 52, pp. 65–74, 1 2021.

[38] S. Dutta, A. Sarkar, S. Kaushik, R. Das, and A. Ghosh, "Supervision of control valve characteristics using plc and creation of hmi by scada," *2014 First International Conference on Automation, Control, Energy and Systems (ACES)*, 2014.

[39] L. Esmaeilani, J. Ghaisari, M. Ahmadian, and R. Esmaeilani, "Control valve position response identification by matlab; control valve position response identification by matlab," *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, 2015.

[40] "Un sistema de control de proceso y accionamiento uniforme para la industria de la pulpa y el papel," 1993.

[41] J. Soza and R. González, "Estudio de refinación de mezclas de celulosa fibra corta-fibra larga en refinador piloto escher."

[42] Tuvacomsa, "Válvulas de seccionamiento."

[43] P. y Corrugados, 2023.