



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONTROL PID DE TEMPERATURA
CON PLC SIEMENS S7-300 Y ALLEN
BRADLEY SLC 500**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniería en Mecatrónica

P R E S E N T A

Isaac Ramírez Enríquez

DIRECTOR DE TESIS

M.F. Gabriel Hurtado Chong



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

Agradecimientos

A mi madre, María de Jesús Enríquez Armijo, por ser mi soporte en toda situación y ser un excelente ejemplo de persona recta y trabajadora. También agradezco a mi padre, Manuel Ramírez Pérez, por no permitir que me faltara nada en ningún momento y por ser un consejero en todas las etapas de mi vida.

A mi hermana, Liliana Ramírez Enríquez, por su cariño y comprensión, a la que le deseo el mayor éxito en todo lo que se proponga hacer y le recuerdo que siempre estaré ahí para ella así como ella lo ha hecho para mí. En general, también agradezco a toda mi familia por sus palabras de aliento y por mostrarme afecto sincero y correspondido en todo momento.

A mis amigos y compañeros de la carrera y de la facultad; especialmente a Arturo, Luis, Uriel, Chucho, Carolina y Nabila por mostrarme la importancia de valorar a los demás auténticamente y a sus ideas; a Angel, Careli, Alma, Oscar Juárez, Viviana, Miguel, Mariana, Perseo, Coyotzi, Suastegui, Oscar García y Mauricio por compartir momentos ingenieriles, muchas vivencias y sus personalidades.

A 강태훈, 박세원, 우동현 y todas las personas que conocí en *Korea University*, porque me aceptaron e hicieron sentirme feliz como un coreano. 감사합니다

A Arturo, Mario y al herrero Felipe, sin ellos el modelo físico del proyecto nunca se hubiera hecho en tiempo y forma.

A todas las personas que pasaron por Copilco 176, mi casa por casi cinco años; por cada uno de los que formó parte de esta comunidad.

Agradezco a mi tutor, M.F. Gabriel Hurtado Chong por su tiempo, su conocimiento y sus oportunas correcciones de la tesis, además de ser uno de mis mejores profesores de la carrera, junto con los demás miembros de mi sínodo.

Finalmente, agradezco a mi alma mater, la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por estos 5 años maravillosos de educación y por darme un sentido de identidad y pertenencia único. *Por mi raza hablará el espíritu.*

ÍNDICE

Introducción	6
Objetivo	7
Alcances.....	7
1. Generalidades.....	8
1.1 Antecedentes	8
1.2 Conceptos básicos.....	10
1.3 Estado del arte	11
2. Diseño conceptual	14
2.1 Necesidades y especificaciones.....	14
2.1.1 Identificación de necesidades.....	14
2.1.2 Jerarquización de requerimientos.....	15
2.2 Propuestas de sensores	16
2.2.1 Sensores de presencia.....	16
2.2.2 Sensor de temperatura.....	18
2.2.3 Sensor para identificación de material.....	20
2.3 Propuestas de actuadores	21
2.4 Modelo funcional	25
2.4.1 Boceto de modelo funcional.....	25
2.4.2 Diagrama de flujo del algoritmo del proceso.....	26
3. Diseño de detalle	28
3.1 Elección de sensores.....	28

3.1.1	Distribución y posición.....	28
3.1.2	Adquisición de señales.....	30
3.1.3	Etapa de acondicionamiento de señal.....	32
3.2	Elección de actuadores.....	36
3.2.1	Pistones.....	36
3.2.2	Motor de DC.....	37
3.2.3	Resistencias para horno y ventiladores.....	37
3.2.4	Acondicionamiento de salidas.....	38
3.3	Material.....	40
3.3.1	Madera.....	40
3.3.2	Arcilla.....	42
3.4	Diagrama de conexiones eléctrico-electrónicas y neumáticas.....	44
3.5	Construcción del modelo funcional.....	46
4.	Implementación del control	53
4.1	Propuesta de control PID de temperatura	53
4.2	Características PLC Allen Bradley SLC 500.....	63
4.3	Características PLC Siemens S7-300	73
5.	Resultados	87
5.1	Pruebas con PLC Allen Bradley SLC 500.....	87
5.2	Pruebas con PLC Siemens S7-300.....	89
5.3	Comparación final de desempeño	96
6.	Conclusiones	98
	Referencias.....	101

Introducción

En el presente trabajo se presentan dos propuestas de control PID para un sistema térmico, utilizando como controladores un PLC Allen Bradley SLC 500 y un PLC Siemens S7-300, ambos del tipo modular. Estas propuestas incluyen el desarrollo y construcción de un modelo funcional de pruebas, la programación para ambos PLC, la caracterización del sistema térmico, una propuesta de parámetros de diseño de control y de los coeficientes PID. El sistema térmico a reproducir es un proceso de secado de materiales, arcilla y madera en este caso.

En el primer capítulo se definen los conceptos más esenciales para entender el desarrollo del trabajo, así como las aplicaciones actuales en las que se utiliza el control de temperatura para el secado de arcilla y madera.

A lo largo del segundo capítulo, se genera un diseño conceptual del proceso. Se tiene una metodología de diseño identificar la importancia de las necesidades y después determinar especificaciones del proyecto. Asimismo, se mencionan propuestas de sensores y actuadores a utilizar, así como una primera proyección de la forma del modelo funcional, la ubicación de sensores y actuadores y un diagrama de flujo que funge de algoritmo de la programación.

En el siguiente capítulo, el tercero, se eligen los sensores discretos y analógicos dentro de las propuestas. Se eligen los actuadores de acuerdo a las necesidades del proyecto. También se incluyen los circuitos o métodos de acondicionamiento de señales de los sensores y actuadores. Se presenta el diagrama de conexiones electro-mecánicas y neumáticas y el proceso necesario para construir el modelo funcional utilizado.

En el cuarto capítulo se caracteriza el sistema térmico del proceso, se realiza el cálculo de coeficientes PID para los parámetros de diseño de control propuestos y se analizan las características de las instrucciones de control PID en STEP7 y RSLogix 500. Finalmente, se incluye la programación para ambos PLC.

Para el quinto capítulo se desglosan los resultados de las pruebas realizadas en el modelo funcional con el código de programación determinado anteriormente. Se obtienen gráficas del comportamiento de la temperatura en el proceso controlado, éstas permiten la comparación del desempeño de los dos PLC usados.

Finalmente, en el sexto capítulo, se presentan las conclusiones finales sobre el desarrollo total del proyecto, así como posible trabajo a futuro.

Objetivo

Construir un modelo funcional en el cual implementar un controlador PID para el control automático de un sistema, donde se requiere mantener la temperatura dentro de un horno secador en un valor deseado, utilizando como controladores un PLC Siemens S7-300 y un PLC Allen-Bradley SLC 500, de manera independiente, para comparar el desempeño de ambos dispositivos.

Alcances

El presente estudio comparará las características, tanto de programación como de desempeño en control, de un PLC Siemens 300 y de un PLC Allen-Bradley SLC 500. Esta investigación comparará únicamente a estos dos PLC.

Se construirá un modelo funcional de una línea de secado de objetos de arcilla y madera, que refleje tanto las características y ventajas de utilizar uno u otro de los PLC mencionados en el párrafo anterior en un proceso con control PID. No obstante, no resultará de interés el proceso de fabricación de los objetos antes del calentamiento o cómo llegan a la unidad de almacenaje antes de ser depositados en la banda transportadora. La medición de humedad de los materiales utilizados será realizada manualmente por el operador.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Antecedentes

Desde tiempos antiguos, el deseo de controlar el medio a su alrededor ha sido una característica básica, inherente e innata del ser humano. Se puede generalizar este comportamiento a prácticamente cualquier época y civilización. Esto no se limita a solo un área, pues el hombre ha intentado controlar a los fenómenos naturales, a sus semejantes, a otros seres vivos, al entorno económico, etc.; en ocasiones presentándose resultados negativos para la humanidad.

De forma paralela, desde tiempos tan remotos como la civilización misma, el hombre ha buscado siempre tener más objetos, bienes y adquisiciones. Como menciona Karl Marx en su obra, *El Capital*, se busca que “una cantidad menor de trabajo adquiera la capacidad de producir una cantidad mayor de valor de uso” [1].

Es por esto que se ha desarrollado tecnología diversa a través de la historia, con el fin de evolucionar los sistemas de producción y “descubrir nuevas vías por las que se puede producir una mercancía con menos gente o en menos tiempo que antes” [2].

Bajo la premisa anterior, se implementaron sistemas complejos en la industria, estos contaban con subsistemas electrónicos, mecánicos, de control e informativos, que de forma integrada y armónica lograban resultados más eficientes que trabajando por separado. Como consecuencia de esto, surge la mecatrónica como respuesta a la demanda de especialistas en estos sistemas híbridos.

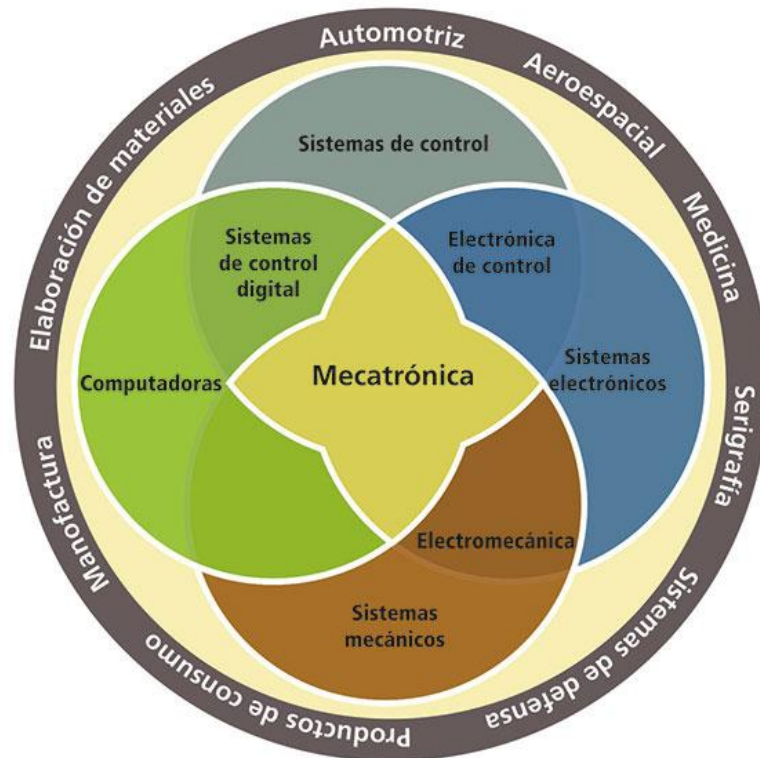


Imagen 1. Áreas de influencia de la mecatrónica [3]

Para controlar estos sistemas de producción, se utilizan Controladores Lógicos Programables (PLC por *Programmable Logic Controller*). Un PLC es “un dispositivo electrónico digital que usa una memoria programable para guardar instrucciones y llevar a cabo funciones lógicas, de secuencia, de sincronización, de conteo y aritméticas para controlar máquinas y procesos” [6]. Los PLC son controladores robustos y resistentes a los ambientes hostiles que se encuentran en la industria. Existen diversas compañías que los fabrican, siendo las más importantes Siemens, Allen Bradley, Mitsubishi, OMRON, Modicon, entre otras.

1.2 Conceptos básicos

Existen términos esenciales e indispensables para el desarrollo de este escrito, los cuales son utilizados de distinta forma en la literatura. Debido a esto, se propondrán conceptos básicos que se aceptarán como útiles a lo largo del trabajo; sin embargo, estos no son definitivos y permiten extraer características de conceptos dados por otros autores con el fin de tener un mejor entendimiento del proyecto.

Se entenderá que un sistema de control es un conjunto de componentes que actúan juntos para realizar un objetivo, donde se miden los valores de una o más variables a controlar y se aplica una o varias variables de control para corregir o limitar una desviación del valor medido a partir de un valor deseado [7]. Existen dos configuraciones de sistemas de control: sistemas de lazo abierto, sin retroalimentación sobre la salida del sistema, o de lazo cerrado, los cuales tienen retroalimentación y son de interés para el proyecto.

Un sistema de lazo cerrado es un sistema de control retroalimentado. Esta configuración “compensa perturbaciones al medir la respuesta de salida, alimentando esa medida a una trayectoria de realimentación y comparando esa respuesta con la entrada” [4]. De igual forma, son más precisos y permiten un mayor control de la respuesta transitoria y error en estado permanente que un sistema de lazo abierto.

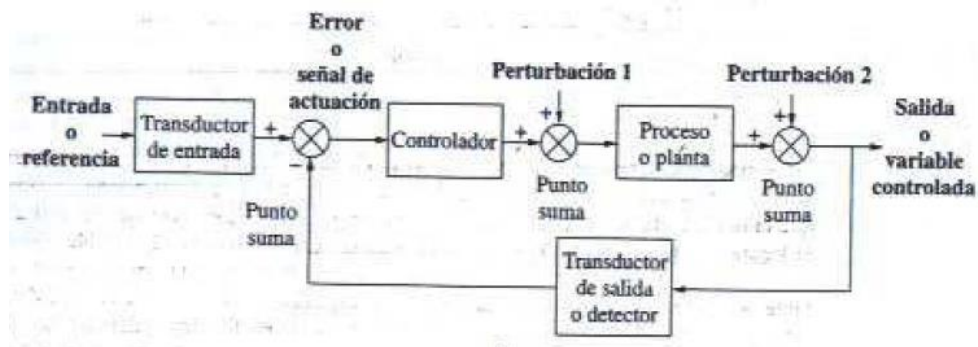


Imagen 2. Diagrama de bloques de sistema de lazo cerrado [4]

El control PID es “una unidad para crear un lazo de control estable y alcanzar el desempeño deseado mediante tres tipos de acciones básicas de corrección de error: proporcional, integral y derivativa” [9]. El control PID en la industria es altamente utilizado, debido a que el *software* de programación actual incluye, generalmente,

bibliotecas o funciones de control PID. La descripción matemática del controlador PID es la siguiente, donde $u(t)$ es la variable de control o variable de entrada de planta y $e(t)$ es el error calculado:

$$u(t) = P e(t) + I \int e(t) dt + D \frac{de(t)}{dt}$$

Cada una de las acciones de corrección de error tiene un efecto diferente en la planta o subsistema que se quiera controlar. El control proporcional (P) modifica el tiempo de levantamiento (t_r) de la salida del sistema, es decir, la acción de control es mucho más rápida mientras mayor sea el valor del coeficiente P. Sin embargo, también se incrementa el sobrepaso (% Sp). El control integral (I) es el que permite que la variable a controlar llegue al valor deseado después de un tiempo de asentamiento (t_s). El control derivativo (D) tiende a anticipar el error, por lo que las oscilaciones en la salida son menores (disminuyendo el % Sp).

Sintonizar un controlador PID significa ajustar los parámetros de control (P, I y D) a valores que cumplan con los requerimientos de respuesta del control. Esta reconfiguración de parámetros del control se puede realizar experimentalmente, a partir de unos parámetros iniciales calculados y mediante prueba y error. Sin embargo, siempre se debe procurar la estabilidad del sistema.

1.3 Estado del arte

El secado térmico es una práctica donde se reduce o elimina el contenido de humedad de un material mediante el intercambio de calor y masa entre el fluido de secado y el sólido a secar. El secado de materiales depende de seis factores principales: el contenido de oxígeno, la velocidad de flujo del gas caliente dentro de la cámara, la humedad relativa dentro de la cámara, la temperatura de la misma, el tiempo de residencia del material y el consumo de energía [10]. La mayor parte de los hornos de secado utilizan el secado directo o por convección, es decir, el calor se transfiere por el contacto del objeto con aire caliente u otro gas calentado.

Los hornos de secado industriales de tipo continuo se basan en el fundamento de calentar un material a lo largo de una banda transportadora, tanto al material como a la banda misma. Aunque tienen un mayor consumo energético que un horno estacionario o modular, este proceso es más dinámico y no detiene la producción. Se utiliza para eliminar humedad de madera, de superficies cerámicas, de alimentos, en la aplicación de pintura en polvo, entre otras actividades.

El secado de arcilla se utiliza en la industria para la producción en masa de objetos de uso cotidiano hechos con este material como tazas, vasos, cazuelas, ornamentos, etc. En la tesis de O. Silva y John J. Pantoja, se desarrolla una mejora al proceso de secado de arcilla para la rama de la construcción, pues se colocan ladrillos preparados para su secado en una banda transportadora a velocidad baja, con el fin de calentar la arcilla mediante calor y microondas; con este método, se permite un secado rápido y efectivo de los ladrillos. [8]

En otros ámbitos, la manipulación de la humedad en la arcilla es utilizada en las ciencias de la tierra, pues las características de un suelo se determinan en un punto de humedad “cero absoluto”, en el que se calienta una muestra a una temperatura mínima de 110 °C por 10 minutos por cada 100 gramos de suelo. Para ello se requiere mantener fija la temperatura por el tiempo necesario para deshumidificar la arcilla en el suelo, que es uno de los componentes que más agua absorben.

La madera es otro material al que comúnmente se le reduce o elimina la humedad. Existen tres métodos para secarla: secado natural o al aire libre, en horno o cámaras y secado mixto (al aire, hasta el punto de saturación de las fibras, y después completar el proceso en un horno). El método a utilizar depende de diversos factores, como el tipo de madera, el tamaño del material, la tasa relativa de secado y la degradación o daño permisible [11].

Una parte muy significativa de los hornos industriales que se utilizan para procesos de calefacción se basan en control ON/OFF. Este tipo de control no alcanza el valor deseado de temperatura, solo por ciertos y cortos instantes, debido a que existe un intervalo diferencial en el cual oscila la temperatura.

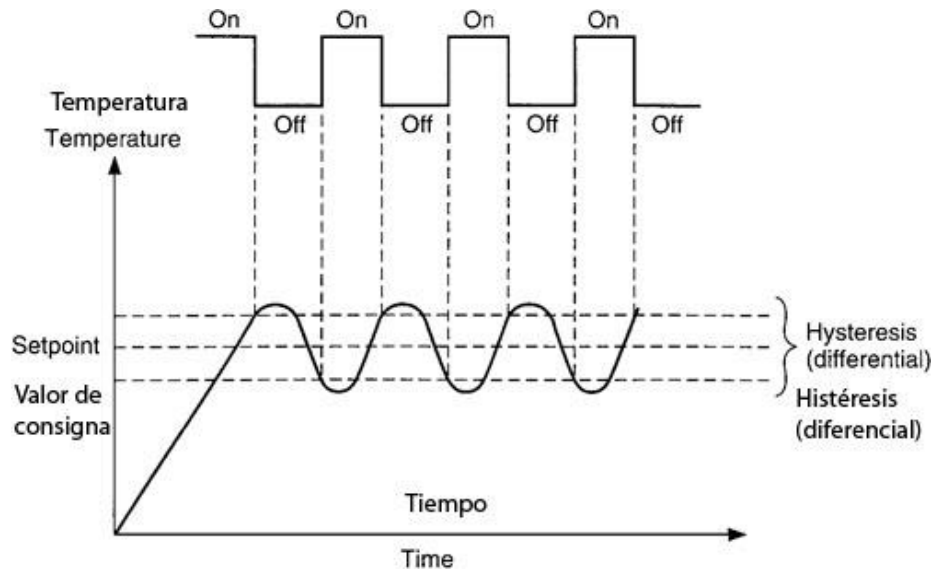


Imagen 3. Intervalo diferencial en control ON/OFF [5]

Aunque este tipo de control es muy económico, carece de exactitud. Existen otros procesos de calentamiento que requieren de alcanzar una temperatura y mantenerla un cierto tiempo, por lo que se requiere un control mucho más completo.

Siemens desarrolla tanto PLC como *software* para programarlos. El programa más utilizado en los PLC de la marca es STEP 7 y funciona con una gran variedad de controladores, incluyendo el que se utilizará en el proyecto, el S7-300. Este PLC se programa mediante bloques de funciones y se le pueden agregar diferentes módulos para mejorar sus capacidades, como entradas y salidas digitales y analógicas, módulos de funciones, interfaces, etc. Siemens define a este PLC como la solución innovadora para todas las tareas de automatización.

El fabricante de PLC Allen-Bradley clasifica sus productos en tres categorías: Sistemas de control de altas prestaciones, sistemas de control Micro y Nano y sistemas de control pequeños. El PLC a utilizar de esta marca, que es el SLC 500, pertenece a los sistemas de control pequeños, de tipo modular y lleva más de una década en el mercado. Es un PLC de costo accesible para una industria y eficiente para procesos donde no se le da una importancia crítica al tiempo de procesamiento interno del autómatas. Se programan con el software RSLogix 500 y se utilizan actualmente en maquinaria herramienta, de envasado, textil, de productos alimenticios, de farmacéuticos o en transportadores y en manejo de materiales

Capítulo 2

Diseño conceptual

2.1 Necesidades y especificaciones

2.1.1 Identificación de necesidades

El proyecto presenta una serie de requerimientos esenciales y básicos que se deducen a partir de una línea real de secado de materiales de tipo industrial. Puesto que se quiere emular el proceso a escala, se deben de tomar en cuenta consideraciones acerca de la construcción del modelo físico, así como otras necesidades más de acuerdo a los PLC que se utilizarán y los sensores y actuadores empleados.

Las necesidades el proyecto son:

- Que exista una mínima intervención del operador, la cual se limitará a ser un supervisor del proceso para su correcto funcionamiento y al retiro manual de los materiales después de ser secados y organizados en sus respectivas áreas.
- Se deben tener ciclos automáticos mediante secuencias previamente programadas en el PLC a utilizar.
- Los ciclos deben ser repetibles y sin interrupciones.

- Que el proceso sea silencioso.
- Elección de la temperatura final deseada por el operador.
- El horno secador debe alcanzar temperaturas de hasta 200 °C, permitiendo que el usuario solicite una temperatura mínima de 50 °C.
- Mostrar en una interfaz la temperatura actual del horno al usuario.
- Evitar cambios bruscos en la temperatura dentro del horno.
- Utilizar un control PID para el control del aumento de temperatura.
- La banda debe moverse a velocidad baja, con la finalidad de tener un mejor control de eventos en el proceso.
- Tener disponible un paro de emergencia ante cualquier eventualidad.
- Elaborar una bornera para una interacción eficaz del modelo con los PLC.
- Que el cableado utilizado esté oculto.
- Utilizar una estructura metálica para sostener a todo el proceso.
- Fácil sujeción y transporte del modelo funcional.

Además de las necesidades esenciales antes mencionadas, existen otras necesidades secundarias que se considerarán como deseables, es decir, se procurará su cumplimiento pero no son de vital importancia para el proceso, tales como el tiempo del recorrido de los materiales por la banda transportadora o que las cajas donde se organizarán los objetos sean metálicas, entre otras.

2.1.2 Jerarquización de requerimientos

Conociendo las necesidades del proyecto, propuestas por el escritor de esta tesis, se realiza una tabla de jerarquización de requerimientos, donde se subdividen y agrupan algunos requerimientos en áreas comunes y se asigna un valor de importancia a cada uno de ellos, donde el 1 es la necesidad más importante a cumplir y 15 la menos importante de las mencionadas.

<i>Jerarquización de los requerimientos del proyecto</i>		
	<i>Requerimiento</i>	<i>Importancia</i>
Movimientos Automáticos	Mínima intervención del operador	7
	Secuencias previamente programadas	3
Características del proceso	Ciclos repetibles	4
	Proceso silencioso	15
Horno	Elección de temperatura deseada	5
	Rango de operación (50 - 200 °C)	8
	Interfaz para mostrar temperatura	9
	Evitar cambios bruscos de temperatura	10
Control	Control PID al aumento de temperatura	2
Estética	Bornera	12
	Cableado oculto	13
Manipulación	Estructura metálica	11
	Fácil sujeción y transporte	14
Otros	Velocidad baja de banda transportadora	6
	Botón de paro de emergencia	1

Tabla 1. Jerarquización de requerimientos

2.2 Propuestas de sensores

2.2.1 Sensores de presencia

Se utilizarán sensores de presencia con el fin de iniciar eventos dentro de nuestro proceso. Existe una gran gama de sensores de presencia a utilizar y, fundamentalmente, podemos dividirlos en dos grandes grupos: Con contacto y sin contacto. A su vez, estos se subdividen de la siguiente forma:

- Con contacto – Microswitches, final de carrera y piezoeléctricos.
- Sin contacto – Inductivos, capacitivos, magnéticos, fotoeléctricos y ultrasónicos.

Puesto que los objetos a secar serán transportados mediante una banda transportadora, es preferible utilizar sensores de presencia sin contacto, además de que ofrecen cierta facilidad de acoplarse a las paredes donde se soportará la banda.

Los sensores inductivos solo pueden detectar metales por lo que, debido a la naturaleza de los materiales que se utilizarán, resultan sin utilidad para las aplicaciones del proyecto. De igual forma, los sensores magnéticos no pueden ser considerados para los objetivos deseados.

Tanto los sensores ultrasónicos como fotoeléctricos y capacitivos se pueden utilizar para la detección de presencia de los objetos al desplazarse por la banda; sin embargo, debido al alto costo de los sensores capacitivos en comparación con los otros dos, se prefirió eliminar esta opción. Por otro lado, se restringe el uso de sensores de presencia a los de tipo discreto, debido a que solo se requiere conocer si un objeto se encuentra en un lugar deseado y no se necesita conocer información adicional de éste, además de la mayor disponibilidad de entradas discretas de los PLC que de entradas analógicas. Por lo tanto, los sensores ultrasónicos se restringen a los de tipo digital y estos aumentan su costo considerablemente con respecto a los fotoeléctricos, por lo que se decide evaluar a los sensores de solo este tipo.

Respecto a los sensores fotoeléctricos, se pueden utilizar de tipo difuso-reflexivo (emisor y receptor en el mismo dispositivo) y de tipo de barrera (donde al emisor-receptor están desacoplados). Para elegir el mejor sensor para esta aplicación, se realiza una matriz de selección, donde el sensor 1 es el fotoeléctrico difuso-reflexivo QRD1114 y el sensor 2 es el fotoeléctrico con emisor de infrarrojos TSCHA5202 y receptor OP999 desacoplados, siendo ambos sensores fotoeléctricos de fácil adquisición en tiendas de electrónica.

	Objetivo	Importancia	Porcentaje	Sensor 1	Sensor 2
Sensibilidad	+	70	14,89	0	1
Rango	+	50	10,64	1	1
Error	-	60	12,77	0	0
Precisión	+	80	17,02	1	1
Exactitud	+	60	12,77	1	1
Offset	-	20	4,26	0	1
Tiempo de respuesta	-	40	8,51	-1	1
Costo	-	90	19,15	1	1
Total		470	100	0,5107	0,8724

Tabla 2. Matriz de selección de los sensores de presencia

Como resultado de la matriz de selección, se decide utilizar un sensor fotoeléctrico de tipo barrera, con fotodiodo receptor OP999 y emisor TSHA5202 desacoplados.

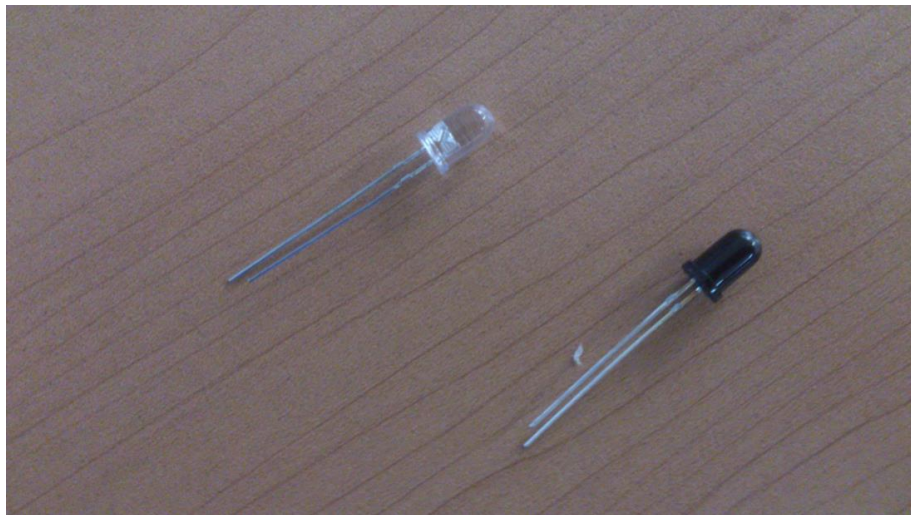


Imagen 4. Emisor de infrarrojo TSHA5202 (izquierda) y fototransistor receptor OP999 (derecha)

2.2.2 Sensor de temperatura

El sensor de temperatura será el dispositivo que permitirá la retroalimentación del sistema, pues leerá la variable a controlar (la temperatura dentro del horno secador) y obtendrá la información que será procesada por el PLC y éste ejercerá la acción necesaria para un control correcto.

Dentro del apartado de *necesidades del proyecto*, se definió que el rango ideal de trabajo del horno estaría entre 50 y 200 °C, evitando así una dilatación excesiva del horno, de las paredes metálicas donde se soporta la banda transportadora o el sobrecalentar alguno de los sensores o cables que se utilicen.

Debido a esto, se optó por utilizar sensores de temperatura que tuvieran una temperatura máxima de operación y de unión (o junta) de al menos 300 °C y así evitar que el sensor se calentara en exceso o que se desoldara alguno de sus elementos internos o alguna de sus juntas. La opción más viable, tanto económicamente como por las condiciones de trabajo antes mencionadas, son los termopares.

Un termopar es un sensor autoexcitado de temperatura, es decir, no se necesita una fuente externa de tensión o de corriente para poder ser leído por el sistema. Se forma por dos metales diferentes unidos por un extremo; estos metales, al calentarse o enfriarse, producen un voltaje. Se pueden utilizar una gran diversidad de metales para elaborar un termopar y eso da lugar a los diferentes tipos de termopar y a su precisión y los rangos de temperatura en los que operan.

Las cuatro calibraciones más comunes son J, K, T y E. La siguiente tabla muestra las características de precisión y rango de temperatura de los termopares antes mencionados:

Common Thermocouple Temperature Ranges			
Calibration	Temp Range	Std. Limits of Error	Spec. Limits of Error
J	0°C to 750°C (32°F to 1382°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
K	-200°C to 1250°C (-328°F to 2282°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
E	-200°C to 900°C (-328°F to 1652°F)	Greater of 1.7°C or 0.5%	Greater of 1.0°C or 0.4%
T	-250°C to 350°C (-328°F to 662°F)	Greater of 1.0°C or 0.75%	Greater of 0.5°C or 0.4%

Tabla 3. Rangos de temperatura y precisión para termopares J, K, E y T [12]

La temperatura mínima que puede llegar a existir es la misma que rodeará al modelo funcional, es decir, la temperatura ambiental, por lo que no es indispensable que el termopar incluya en su rango valores negativos de temperatura. Por lo tanto, todos los

tipos de termopares nos serán igualmente útiles en este sentido. A El termopar tipo E y el termopar tipo T presentan una mejor exactitud que los otros dos tipos de termopares. Debido a esto, los parámetros de costo y facilidad de adquisición y reposición del termopar son los más importantes para elegir al termopar. Ambos, termopares tipo E y T son mucho más caros, debido a su mayor precisión, que los tipos J y K.

Finalmente, se decide utilizar un termopar tipo K, pues se puede adquirir en tiendas de electrónica fácilmente y a un precio comercial de \$60 M.N., un poco más barato que el tipo J.



Imagen 5. Termopar tipo K

2.2.3 Sensor para identificación de material

En la industria se utilizan generalmente sensores capacitivos para identificar materiales no metálicos. Como se estableció anteriormente, la naturaleza de los materiales a utilizar, arcilla y madera, no permite el uso de sensores inductivos o magnéticos; sin embargo, un sensor capacitivo puede identificar y diferenciar estos dos materiales uno de otro.

Por otro lado, se tiene actualmente un sensor capacitivo BALLUFF BCAW 030-NB-1-Y 03 en el Laboratorio de Automatización Industrial, de la Facultad de Ingeniería, siendo innecesario adquirir algún otro sensor capacitivo en el mercado. Este sensor es de tipo analógico con un alcance nominal de 2 a 20 mm y un alcance asegurado de 4 a

18 mm. El voltaje de alimentación es de 24 VDC y la salida del sensor es de 4 a 20 mA dependiendo del material detectado (NPN tipo sink) [13].

Este sensor cuenta con un LED indicador que es color verde para indicar que existe un objeto a detectar dentro de su alcance o es color rojo en caso contrario.



Imagen 6. Sensor capacitivo BCAW 030-NB-1-Y 03

2.3 Propuestas de actuadores

Para la elaboración del modelo funcional, se requerirán una serie de actuadores que permitan realizar varias acciones, tales como calentar, mover o enfriar. Puesto que se desea economizar, en la mayor medida posible, la elaboración del modelo funcional, se procurará utilizar actuadores que cumplan con los requisitos del proyecto y con los que se cuente actualmente en el Laboratorio de Automatización o, en su defecto, que se puedan adquirir fácilmente y de forma accesible en el mercado.

Los actuadores que se utilizarán se pueden dividir en dos grandes grupos: Los que afectarán a la temperatura y los que manipularán los materiales o elementos físicos del proceso. Dentro del primer grupo, tenemos los actuadores para aumentar la temperatura y los que la disminuirán. Para el segundo grupo, se pueden utilizar actuadores de tipo mecánico, eléctrico, hidráulico, neumático, etc.

Puesto que se definió el rango de trabajo del horno, se procura que los actuadores que aumentarán la temperatura tengan la capacidad de llegar al valor máximo definido del rango (200 °C). Existen diferentes opciones para esto:

- Resistencias eléctricas de AC
- Quema de gas u otro combustible
- Microondas electromagnéticas
- Inducción eléctrica de un medio conductor

Sin embargo, debido al poco conocimiento sobre los hornos de inducción y a la manipulación de ondas electromagnéticas con el fin de calentar, se descartan ambas opciones.

El uso de algún fluido como combustible para ser quemado requerirá de una mayor inversión que el uso de resistencias eléctricas de AC, puesto que se necesitará comprar el combustible, mientras que la electricidad que se consume no incrementará directamente el costo del proyecto. Por otro lado, el riesgo a explosión está latente y la seguridad se ve comprometida más que al solo utilizar resistencias eléctricas. Por último, las resistencias eléctricas de AC se pueden encontrar más fácilmente en el mercado (con valores de 120 o 240 V en AC) y no se requiere de un subsistema físico de control, que sí se requeriría para el control de flujo de combustible (como una válvula, un estrangulamiento, etc.). Por lo tanto, se decide utilizar como actuador calentador a las resistencias de 120 VAC.



Imagen 7. Resistencia eléctrica de AC encendida (izquierda) y apagada (derecha)

Respecto al enfriamiento, puesto que el control PID actuará solamente en el aumento de temperatura y no en decremento de la misma, no se requerirá necesariamente un control analógico para lograr este fin; es posible utilizar solo un actuador que disipe calor mediante un control ON/OFF, para ahorrar recursos de programación y utilizar las entradas discretas de los PLC. Teniendo en cuenta estas condiciones, se elige un ventilador de 12 VDC TFB9225H como actuador enfriador.

Este ventilador funciona con 0.2 A a 12 VDC, por lo es sencillo adquirir una fuente de 12 V que cumpla con la demanda de corriente. El costo del ventilador es bajo y, puesto que solo será un control ON/OFF, solo será necesario introducir el voltaje de alimentación a sus dos terminales para que el dispositivo funcione.



Imagen 8. Ventilador TFB9225H de 12 VDC

Por otro lado, para elegir los actuadores que tienen la función de manipular o mover material, se decidió utilizar pistones de doble efecto debido a varias razones:

- Para introducir los objetos a la banda transportadora, se requiere un movimiento lineal, no rotatorio (como el de un motor), el cual es proporcionado por los pistones a utilizar.
- En el Laboratorio de Automatización Industrial se tienen pistones de doble efecto, racores para controlar la velocidad de entrada/salida del vástago y unidades de mantenimiento para proporcionar aire comprimido en condiciones

idóneas para la aplicación. También se tienen las electroválvulas 5/2 necesarias para el control de los pistones.

- Para realizar este sistema electro-neumático, solo se requiere de una fuente de 24 VCA y aire comprimido, con el cuál se cuenta en el Laboratorio.
- El uso de la neumática en la industria moderna es ampliamente aceptado y, puesto que se quiere emular lo máximo posible un proceso real, es válido para ser utilizado en este proyecto.

Los pistones de doble efecto son de la marca FESTO.



Imagen 9. Pistón de doble efecto con vástago dentro (arriba) y fuera (abajo).

Por último, se debe utilizar un motor para realizar el movimiento de la banda transportadora. El motor a pasos y el servomotor quedan descartados, puesto que utilizan más terminales que un motor de DC y al tener un número limitado de salidas del PLC, se debe procurar el uso eficiente de las mismas. Un motor de DC, sin embargo, no aportará el par necesario para mover la banda transportadora, por lo que se requiere que el motor esté acoplado a una etapa de reducción, con el fin de aumentar el par.

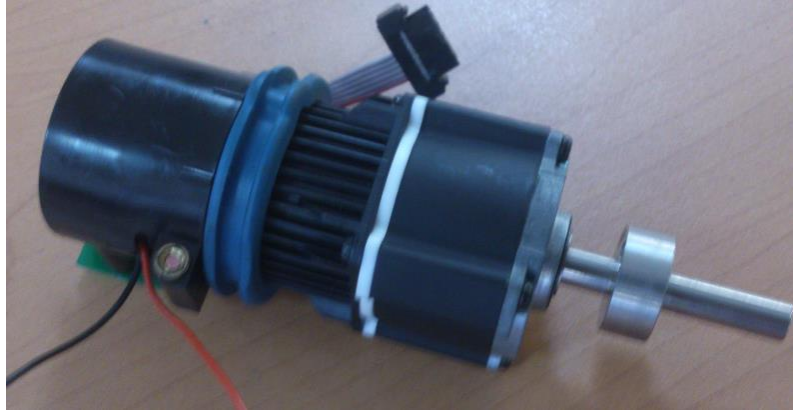


Imagen 10. Motor de DC con reducción

2.4 Modelo funcional

2.4.1 Boceto de modelo funcional

El motivo de la realización de un boceto a mano alzada es el de comprender el proceso en su totalidad, respetando la forma de los sensores y actuadores a utilizar y dando las primeras propuestas de la ubicación de los elementos que se usarán en el modelo funcional.

Para facilitar el bosquejo del modelo y poder observar de forma sencilla la propuesta de ubicación de los sensores y actuadores, así como sus nombres, se decidió que el boceto no incluyera en su dibujo las paredes de donde se sostendrán los sensores de presencia, la banda transportadora y su motor, es decir, la estructura metálica que sostendrá a la línea de proceso.

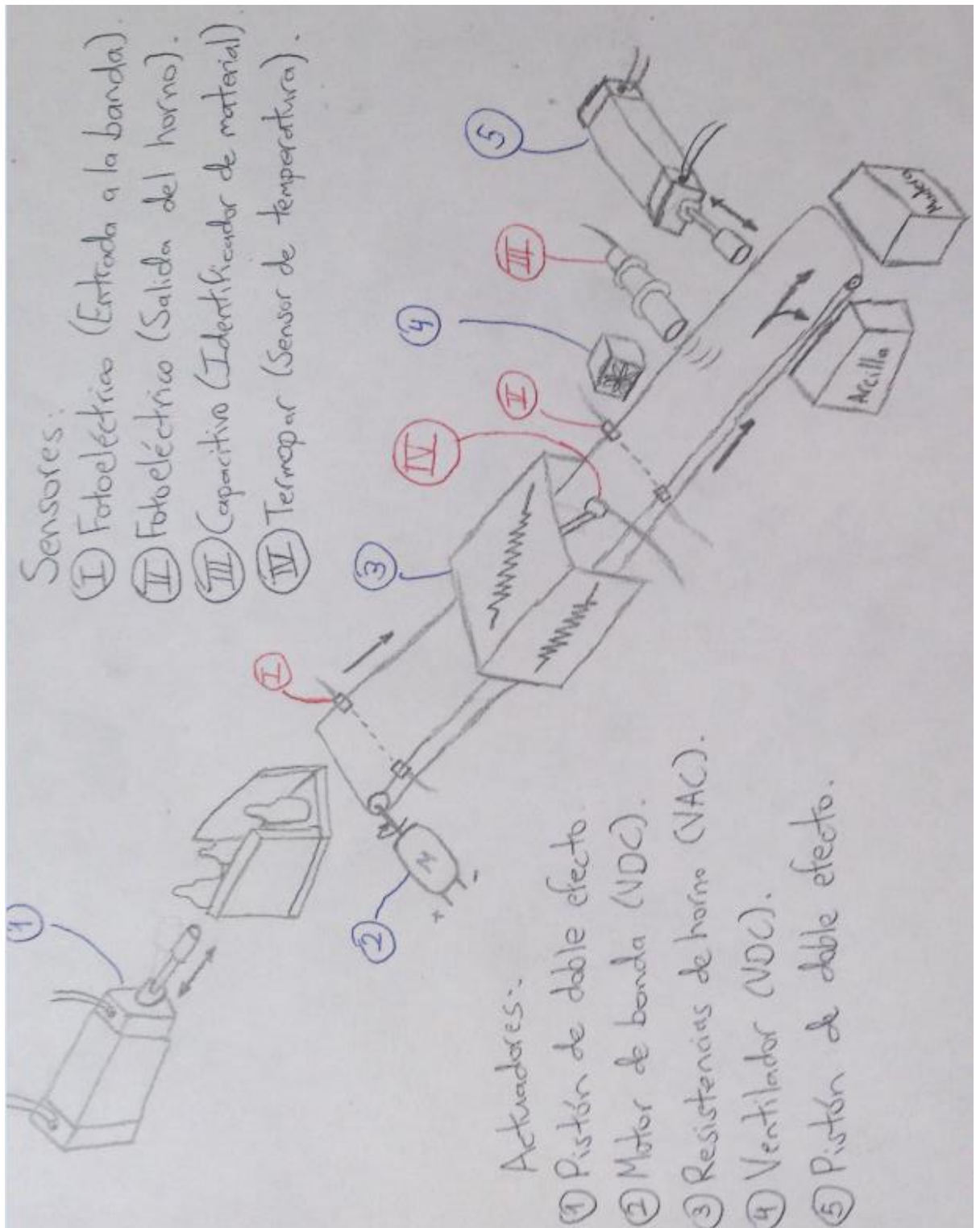
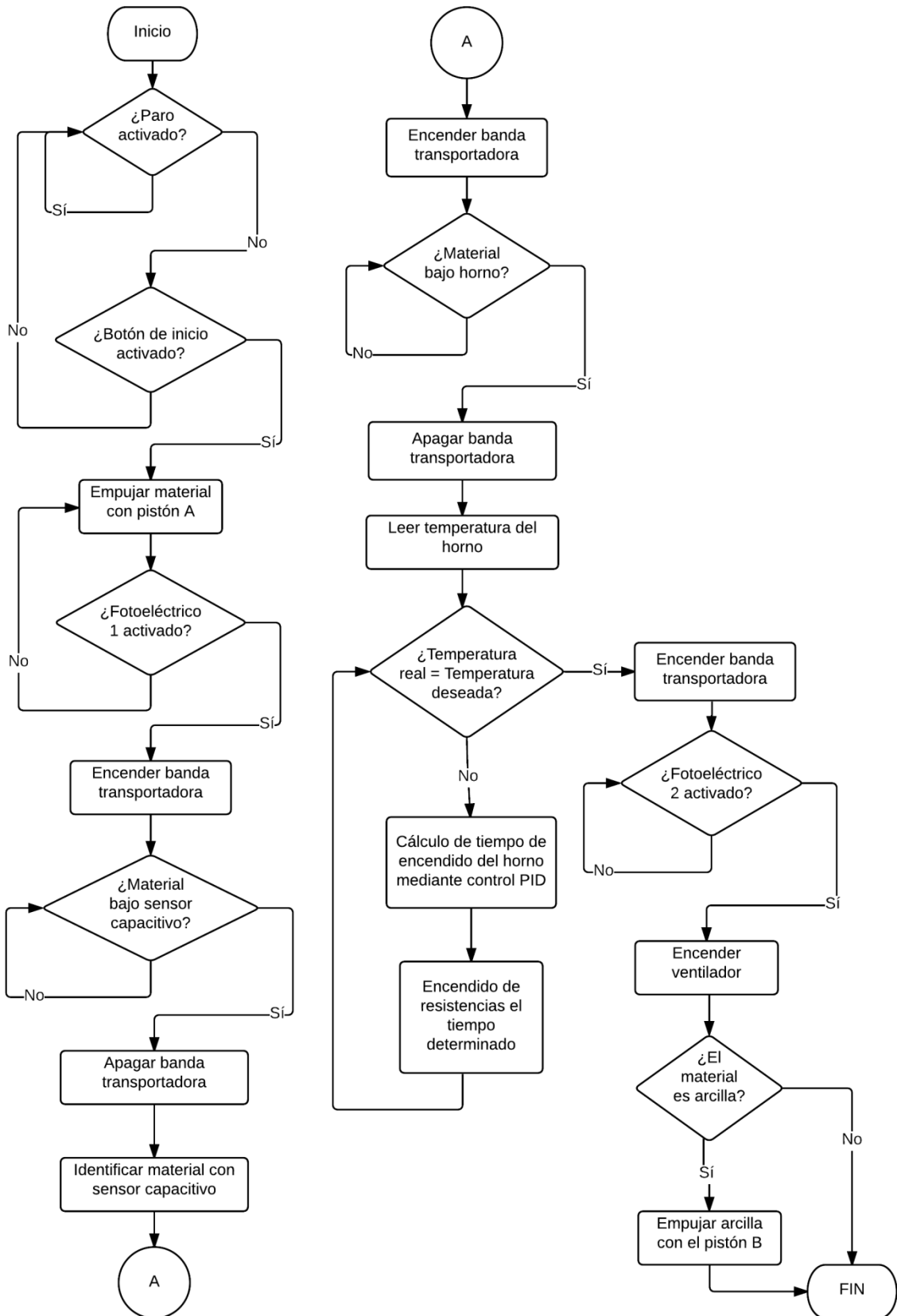


Imagen 11. Primer boceto del modelo funcional

2.4.2 Diagrama de flujo del algoritmo del proceso



Capítulo 3

Diseño de detalle

3.1 Elección de sensores

3.1.1 Distribución y posición

La ubicación de los sensores fotoeléctricos, del sensor capacitivo y del sensor de temperatura, son fundamentales para adquirir datos de nuestro proceso. Los dos sensores del primer tipo mencionado fungirán para determinar dos situaciones: Si un material ha sido empujado por el primer pistón hacia la banda transportadora y si el objeto ha salido del horno secador. Debido a esto, se colocará una pareja de emisor-receptor inmediatamente a la salida de la caja de almacén donde se tendrán nuestros objetos a secar. La otra pareja se ubicará a la salida del horno. Ambas parejas de sensores se colocarán de tal forma que el emisor se encuentre de un lado de la banda y el receptor del otro lado. Dado el alcance operativo de estos sensores (28 cm) y el ancho de la banda transportadora (12.5 cm), no habrá problema alguno para detectar cuando un objeto interrumpe la transmisión-recepción de los rayos infrarrojos.



Imagen 12. TSHA5202 y OP999 con sus portaleds

Por otra parte, el sensor capacitivo y de temperatura, de tipo analógicos, tienen bien definida su función. Según la propuesta hecha en el boceto de la *Imagen 11*, el sensor capacitivo se encuentra al final de la banda, de forma perpendicular a esta, con el fin de tener un mejor ángulo de acción y detectar eficientemente el material que se está transportando frente a él. El sensor de temperatura naturalmente se encuentra dentro de las paredes del horno secador, procurando encontrarse lo más cerca de los objetos que se transportan pero sin tocarlos.

Respecto al sensor capacitivo, éste tiene un rango de temperatura de operación ubicado entre $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que se debe tener cuidado en colocarlo a una distancia suficientemente lejana del horno con el fin de tener un correcto funcionamiento del sensor capacitivo. Sin embargo, se observa que debido a la ubicación propuesta en la *Imagen 11* del sensor capacitivo, éste tendrá lecturas de los materiales después de que estos son calentados en el horno. Los sensores capacitivos tienen lecturas diferentes dependiendo de la temperatura del objeto que entra en su alcance; por lo tanto, se debe redefinir la ubicación del sensor capacitivo para que identifique el material antes de que éste sea calentado. Se decide colocar el sensor capacitivo posterior al primer sensor fotoeléctrico y antes del horno. De esta forma, la información obtenida acerca del material detectado será guardada en la memoria del PLC para que, al llegar al final de la banda, sea organizado dependiendo del valor leído anteriormente.

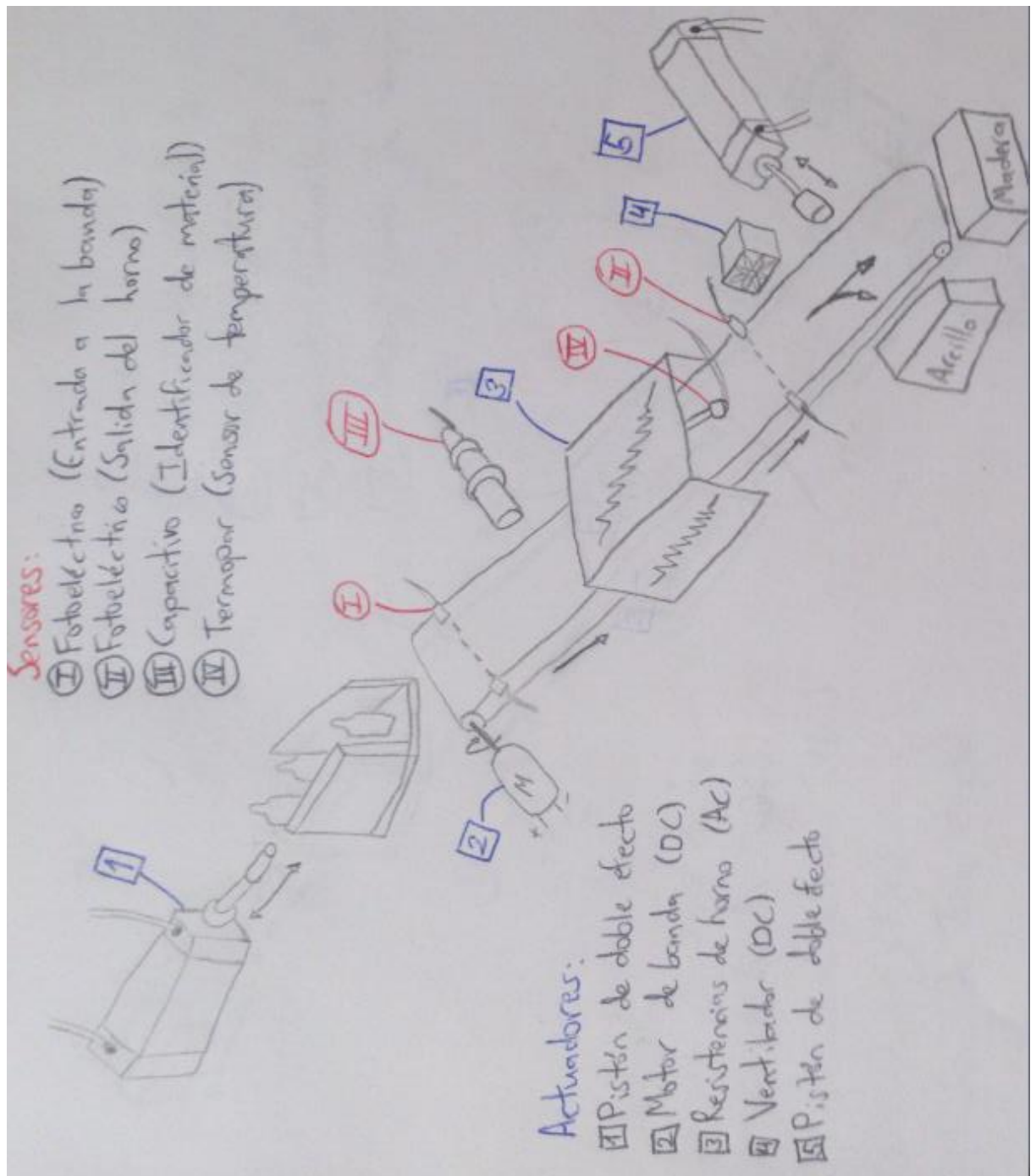


Imagen 13. Nueva propuesta de boceto de modelo funcional

3.1.2 Adquisición de señales

El circuito electrónico que se implementará para adquirir señales con los sensores fotoeléctricos fue obtenido de la página web <http://www.circuitoselectronicos.org> y solo

requiere de una resistencia de $180\ \Omega$, una de $220\ \Omega$ y otra de $10\ k\Omega$ [17]. El diagrama de este circuito, realizado en un programa de simulación de circuitos es:

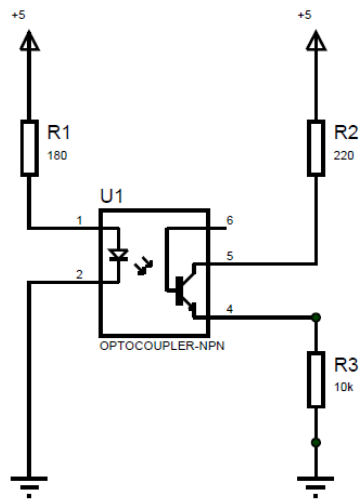


Imagen 14. Circuito para adquirir señal de sensor fotoeléctrico emisor-receptor desacoplado

Como *Proteus ISIS* no cuenta directamente con sensores fotoeléctricos entre los dispositivos que puede simular, se sustituyó este por un optoacoplador-NPN por motivos ilustrativos. Los nodos 1 y 2 corresponden al emisor de luz infrarroja y los 5 y 4 al receptor.

El sensor capacitivo no requiere otro circuito electrónico para ser conectado al PLC. El sensor BALLUFF solo requiere alimentarse con una fuente de 24 VDC, con las cuáles se cuenta en el Laboratorio de Automatización Industrial, y que su salida se conecte al negativo del canal de entrada analógica del PLC. El cable café del sensor (BN) se conecta a voltaje positivo (V+) y el cable color azul (BU) a tierra de la fuente de alimentación del sensor (V-). El positivo de la entrada analógica del canal en uso también se conecta V+. El diagrama de conexiones se muestra a continuación:

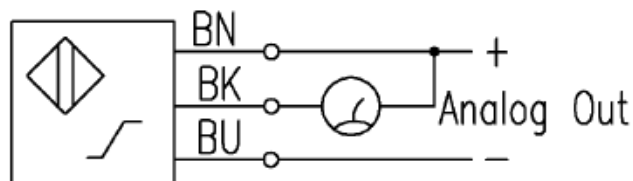


Imagen 15. Diagrama de conexiones del sensor capacitivo

Como se estableció anteriormente, el termopar es un sensor autoexcitador, por lo que no requiere ningún circuito eléctrico para poder adquirir una señal de él. Sin embargo, los voltajes producidos son muy pequeños, por lo que se requerirá una etapa de acondicionamiento de señal. La relación entre la temperatura medida y el voltaje producido se encuentra en tablas comparativas de la empresa ARIAN Control & Instrumentación [18].

Esta relación no es lineal por lo que el PLC debe procesar la información del termopar después de pasar por una etapa de acondicionamiento y efectuar la linealización interna para aportar al usuario el dato de temperatura del horno. El valor de la pendiente resultante de la linealización se le conoce como Coeficiente Seebeck. De forma muy básica, el bosquejo de la linealización de tal relación es el siguiente.

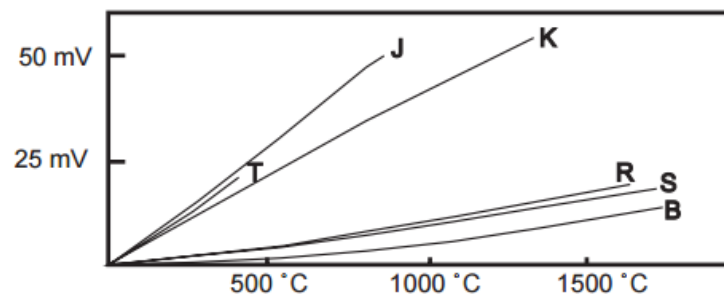


Imagen 16. Linealización de la relación temperatura-voltaje de diferentes termopares [19]

3.1.3 Etapa de acondicionamiento de señal

Para utilizar las señales de los sensores fotoeléctricos como señales de entrada para los PLC, será necesario utilizar relevadores que permitan cerrar el circuito a las entradas del PLC. Por disposición de material y facilidad de uso, se utilizarán relevadores RAS-0510, los cuales requieren un voltaje en su embobinado de 5V para conmutar.

Adquiriendo experimentalmente el valor de la corriente producida por el receptor al tener de frente al emisor a una distancia de 7 cm, el sensor fotoeléctrico produce 1.5 mA de corriente, lo cual es insuficiente para activar el relevador RAS-0510, que requiere corriente de 72 mA para conmutar [15]. Por lo tanto, se requiere una etapa de acondicionamiento de señal que aumente la corriente y permita conmutar el relevador.

Se elige el transistor NPN de usos generales BC538B, debido a que ya se contaba con un par de estos y a que tiene una ganancia de 150, la cual es suficiente para la conmutación [16]. Para calcular la resistencia de base (R_b) a utilizar, se utiliza la fórmula:

$$(V_{cc} - 0.7)/(I_c / h_{Fe}) = R_b$$

Sabiendo que $V_{cc} = 5 \text{ V}$, $I_c = 72 \text{ mA}$ y $h_{Fe} = 150$, se calcula que $R_b = 8.958 \text{ k}\Omega$. Puesto que no existe un valor comercial exacto para la R_b calculada, se utilizará una resistencia de $8.2 \text{ k}\Omega$.

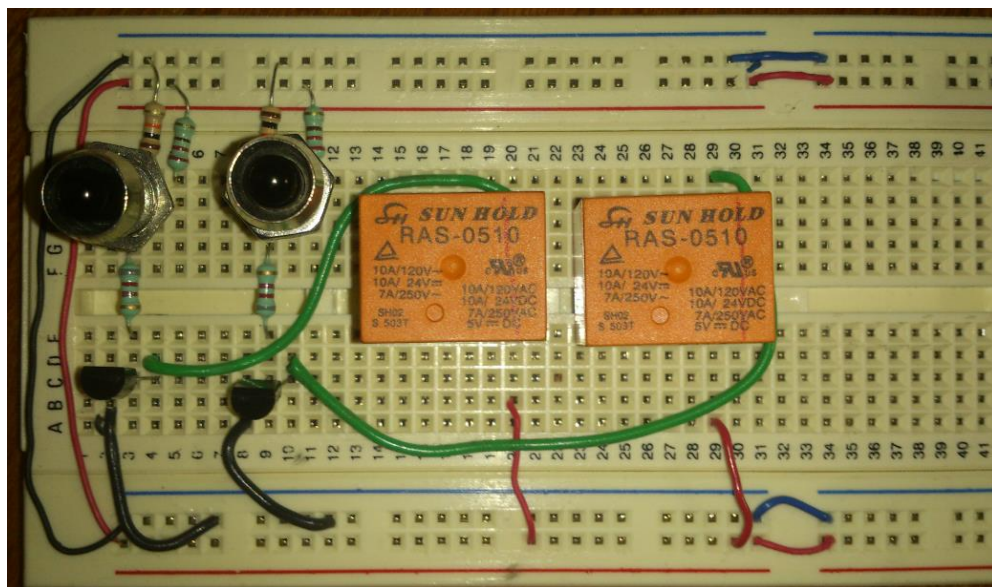


Imagen 17. Circuito completo para sensores fotoeléctricos

El sensor capacitivo no requiere una etapa física de acondicionamiento, mas sí necesita una de software. En otras palabras, las lecturas del sensor varían dependiendo de la distancia a la que se encuentra el material, la densidad y temperatura del mismo, por lo que incluso manteniendo el mismo objeto (por ejemplo, una caja de madera) a la misma distancia del sensor, se tendrán lecturas diferentes en cada instante, aun cuando el cambio sea pequeño entre ellas. Por lo tanto, se caracterizarán los rangos de lectura de este sensor para la arcilla y la madera, con el fin de que siempre se detecten los objetos sobre la banda transportadora y se pueda tener una distinción entre ellos.

Por último, el error más común que se presenta en el uso de termopares es el de compensación de unión fría (CJC, por sus siglas en inglés *Cold Junction Compensation*)

[23]. Este error es la diferencia entre la temperatura medida por la punta del termopar y la temperatura a la que se encuentra donde se conecta el termopar a su etapa de acondicionamiento, es decir, si la temperatura real donde se encuentra el termopar es de 200 °C pero se está midiendo el voltaje producido a una temperatura ambiente de 25 °C, el voltaje medido aparentará que la temperatura real es de 175 °C.

Generalmente, se implementan circuitos donde algún otro dispositivo lector de temperatura suma un voltaje para compensar ese error. Un elemento electrónico de alta precisión para la medición de temperaturas menores de 50 °C es el sensor de temperatura LM35 y se utilizará como apoyo para eliminar el error de CJC.

El circuito utilizado para acondicionar la señal del termopar se encuentra en la página web <https://sites.google.com/site/electronicabasicayavanzada/home/amplificador-operacional/compensacion-union>. Para este circuito se requiere un amplificador de instrumentación AD620 (alimentado con un voltaje positivo y negativo, es decir, es un amplificador operacional bipolar), un sensor de temperatura LM35, el termopar tipo K y una resistencia de ganancia [24].

En resumen, el amplificador AD620 suma los voltajes obtenidos del sensor LM35 y del termopar, aunque este último voltaje se amplifica de acuerdo a una resistencia R definida por la ecuación $R = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G-1}$, donde G es la ganancia deseada [25]. Puesto que el sensor LM35 entrega 10 mV por cada °C medido, la ganancia debe ser tal que el factor de escala del termopar tipo K sea igual a la del LM35 y así poder medir ambos voltajes con la misma proporción de voltaje-temperatura. Esto facilitará bastante la linealización realizada por el PLC en su programación.

Considerando que un termopar tipo K tiene un coeficiente de Seebeck igual a 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ y que, idealmente, no cambia conforme a la temperatura, la ganancia necesaria para que los voltajes del termopar tengan la misma constante de proporcionalidad que 10 mV/°C es de $G = 243.9$. Sustituyendo este valor en la ecuación de ganancia del amplificador AD620, el valor de la resistencia es $R = 203.37 \Omega$. Se utiliza un trimpot para tener un valor muy cercano de $R_g = 204 \Omega$.

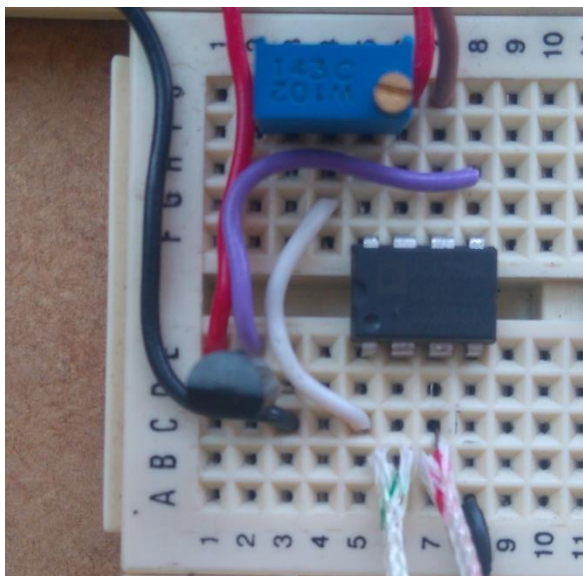


Imagen 18. Circuito acondicionador de señal del termopar

El funcionamiento de este circuito se comprueba en un programa de simulación de circuitos, teniendo los resultados esperados. Para la simulación, se definió que el termopar midiera una temperatura de horno de 150 °C y que la temperatura ambiente es de 30 °C, medida por el sensor LM35.

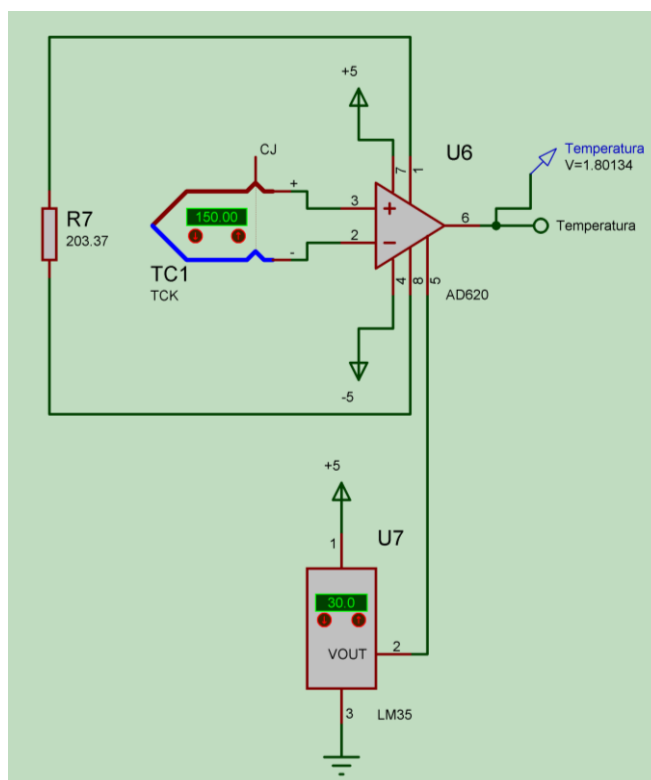


Imagen 19. Simulación de acondicionamiento de termopar en Proteus ISIS

3.2 Elección de actuadores

3.2.1 Pistones

Los pistones de doble efecto tienen su posición bien definida en el proceso: uno, al ser encargado de introducir los materiales a la banda transportadora, es el primer elemento del proceso en activarse y el otro, al ser el organizador, es el último elemento del proceso en actuar. Por lo tanto, un pistón se encontrará al comienzo del almacén de materiales y el otro al final de la banda, de forma perpendicular a la misma.

La unidad de mantenimiento funge como acondicionamiento de entrada a los pistones pues permite la regulación de la presión del aire, filtrado de impurezas y lubricación del mismo. El aire comprimido se entrega a una presión aproximada de 6 bares.



Imagen 20. Unidad de mantenimiento

Para tener un mejor control del proceso, es indispensable definir una velocidad de entrada y salida del vástago. Debido a esto, se utilizarán racores para determinar, mediante experimentación, la velocidad de acción deseada en el pistón neumático. El ajuste de los racores se hará manualmente, antes del inicio del proceso. Para el control de los pistones, se hará uso de las electroválvulas 5/2 con las que se cuenta en el laboratorio. Estas son de la marca Parker y operan con 24 VAC.



Imagen 21. Electroválvulas 5/2

3.2.2 Motor de DC

Se cuenta actualmente con un motor Faulhaber, modelo 2342L012CR (mostrado en la *Imagen 10*), de 12 VDC y par de 17.54 Kg cm [20], el cual se utilizará para girar el eje de la banda transportadora y que ésta se desplace. Su velocidad, sin carga, a su voltaje nominal, es de 120 rpm. Como se requerirá una velocidad muy lenta en la banda, se realizaron pruebas con diferentes alimentaciones del motor para determinar el voltaje que se necesitará para tener la velocidad idónea. La posición del motor de la banda en el proceso está descrita en la *Imagen 11*.

3.2.3 Resistencias para horno y ventilador

Tal como se mencionó anteriormente, el ventilador no requiere una etapa de potencia, puesto que solo se tendrá un control de encendido y apagado mediante una entrada discreta del PLC. Es decir, los 12 V llegarán al ventilador si se cierra la salida del PLC donde se encontrarán interconectados el ventilador y la fuente. Cabe destacar que la potencia del ventilador TFB9225H es de 2.4 W, que la velocidad angular que tiene es de 2500 rpm y que la corriente que consume son 0.2 A, por lo que el relevador de la salida discreta del PLC soporta sin problema alguno la alimentación directa del ventilador [14].

Debido a su bajo costo, las resistencias eléctricas del horno son de tipo resorte con recubrimiento cerámico, como las utilizadas en parrillas eléctricas. Las resistencias elegidas por su fácil adquisición y su potencia son de la marca RONAHE, calibre 18 y de 927 W [21]. Sin embargo, debido al recubrimiento cerámico, la potencia final se reduce a 850 W. Se utilizarán dos de estas resistencias para calentar dentro del horno abierto.

El horno se encontrará ubicado en la parte media de la banda transportadora, a una distancia suficientemente lejana del sensor capacitivo y del ventilado, que son los elementos más próximos al mismo. Puesto que la estructura (paredes y base) y la banda serán metálicas, no resultarán afectadas por las altas temperaturas que se alcancen.

3.2.4 Acondicionamiento de salida

Al motor Faulhaber 2342L012CR, de 17 W de potencia [20], no se le quiere alimentar con su voltaje nominal de 12 V, sino encontrar el voltaje de alimentación adecuado para una velocidad lenta de la banda. Después de realizar una caracterización de la velocidad del motor a un voltaje definido, se encontró que la velocidad lenta deseada para la banda se tiene cuando se alimenta con 5 VDC al motor. Sin embargo, el PLC solo permite corrientes continuas de 0.5 A en sus salidas discreta de voltaje y el motor con carga llega a consumir hasta 1.4 A, por lo que se requerirá el uso de un relevador externo que se conecte a la salida digital relacionada con el motor para que éste se active y permita que la fuente externa alimente directamente a nuestro motor y este dispositivo pueda demandar la corriente necesaria libremente. El relevador RAS-0510 cumple con los requisitos para alimentar el motor.

Al común de las salidas del PLC se conectará la tierra de VDC. Por otro lado, las electroválvulas utilizan corriente alterna; por lo tanto, no pueden compartir común con las demás salidas, así que, de igual forma que con el motor, se requerirán 4 relevadores que cierren el circuito y permitan que las electroválvulas se activen o desactiven.

El ventilador no requiere acondicionamiento de salida, pues se alimentará directamente con 12 V, utilizando una salida del PLC como *switch* para este control ON/OFF.

Por otro lado, las resistencias eléctricas se encenderán todas a la par, por lo que solo se requiere un elemento de control para todas. Al requerir AC para su funcionamiento, no se realizará un control PID con variables de control analógicas; es necesario recurrir a la naturaleza discreta de las señales para controlar el encendido y apagado de las resistencias. Por lo tanto, la señal de salida del controlador PID (o, lo que es lo mismo, la señal de control de las resistencias) será una señal de *PWM* (en inglés, *Pulse-Width Modulation*).

Se propondrá un tiempo de muestreo suficiente para adquirir información de las entradas del PLC, el procesamiento de las mismas, la evaluación del control PID y la conversión de una señal analógica a una discretizada, denotada con un porcentaje de 0 a 100 %, donde un 0 % significa que se tiene la temperatura deseada en el horno o donde un 50 % denota que las resistencias se encienden durante la mitad del tiempo de muestreo.

El tiempo de *scan* del PLC Allen-Bradley SLC 500 es de 1 ms/K, así que se propone un tiempo de muestro para el sistema de control de 1 segundo, para así poder establecer el porcentaje de tiempo encendido/apagado de las resistencias con holgura.

Respecto a la relación entre las resistencias y el PLC, las primeras no se pueden alimentar directamente con una salida discreta del PLC, debido a que el módulo de entradas y salidas con el que se cuenta para el SLC 500, el 1746-OW16, tienen un valor recomendado de hasta 1 A por cada canal de salida [22] y las resistencias requerirán en algún momento hasta 6.7 A. Además, la necesidad de conmutar cada segundo al menos en dos ocasiones (el encendido y apagado por cada tiempo de muestreo), desgastaría rápidamente los relevadores de las salidas del PLC o cualquier relevador mecánico.

Por lo tanto, se decide utilizar la salida analógica. El módulo que manipula las entradas y salidas analógicas en el SLC 500 es el 1746-NIO4V y en el S7-300 es el SM332 AO 4X16 BIT 332-7ND02-0AB0. La salida analógica se utilizará para activar o desactivar un dispositivo que tenga la robustez suficiente para soportar la corriente de 6.7 A en AC y que no tenga desgaste mecánico por las conmutaciones. Este dispositivo puede ser un triac o un relevador de estado sólido.

Un relevador de estado sólido es en sí mismo un arreglo de triac con una etapa de control para la puerta del dispositivo ya implementada, siendo esta generalmente un optoacoplador. Esto significa que las terminales de control están aisladas eléctricamente de las terminales que conducirán la corriente alterna. Además de las ventajas antes mencionadas, el relevador de estado sólido no produce arcos eléctricos como un electromecánico y no requiere más circuitos externos, contrario a utilizar solo un triac. Su desventaja es que el circuito interno de activación es muy sensible a perturbaciones y requiere un tiempo para asentarse dependiendo de la corriente en sus contactos.

En el Laboratorio de Automatización Industrial se cuenta con un relevador de estado sólido GB I 5000-148 de la marca Gordos Arkansas, el cual permite un flujo de AC hasta de 25 A y su terminal de control se activa con voltajes de 3 V hasta 32 V.



Imagen 22. Relevador de estado sólido

3.3 Material

3.3.1 Madera

La madera es uno de los materiales que más comúnmente se les extrae la humedad. Este proceso de secado es indispensable pues permite tener distintas características físicas en la madera y su posterior uso en diversas aplicaciones, dependiendo de la temperatura y tiempo de secado. La temperatura a alcanzar con el control PID para la madera se elige en 100 °C, que es la temperatura máxima que se tiene en un secado convencional de cualquier tipo de madera (rango que abarca de 40 a 100 °C). [26]

Se proponen objetos de madera que puedan humedecerse, que puedan manipularse fácilmente y, a la vez, que tengan el grosor suficiente para que puedan introducirse al horno y que no se quemen fácilmente. Otra característica importante deseada es que sean fáciles de adquirir y a un costo muy bajo, debido a la naturaleza destructiva de las pruebas del proceso, que requerirá tener una cantidad considerable de repuestos disponibles.

También se requiere que el objeto de madera tenga un buen soporte de base, es decir, que la base tenga el área necesaria y la proporción base-altura correcta para poder ser desplazado desde su almacén de inicio, a través de la banda transportadora y que no se vuelque al entrar a la banda. Finalmente, se requiere que el centro de gravedad del objeto no se encuentre más alto que el vástago del pistón; de lo contrario, existirá una mayor probabilidad de que el objeto se vuelque en el cambio del almacén inicial a la banda transportadora.

Se decidió utilizar cajas de madera con las siguientes dimensiones: 6.5 x 4.9 cm de base y 4.6 cm de altura. Estas se encuentran en tiendas de manualidades a un precio aproximado de \$11 M.N. por unidad y cumplen con los requisitos físicos mencionados.



Imagen 23. Objetos de madera a secar

3.3.2 Arcilla

Otro material que comúnmente se somete a un proceso de secado mediante horno es la arcilla. En este caso, pasta o polvo de arcilla se les agrega agua con el fin de volverlos un elemento moldeable que se solidifica un poco después de un tiempo y solo se endurece totalmente al someterse a temperaturas mayores que la del medio ambiente.

Siendo determinados los objetos de madera, los objetos de arcilla deben tener una forma similar a los primeros con el fin de asegurar que el proceso distinga correctamente los objetos sólo con base en su material y sin que se afecte el organizador por la forma de los objetos. Por lo tanto, se decidió que los objetos de arcilla serían fabricados manualmente a partir de arcilla en pasta.

Esto aporta múltiples ventajas, como asegurar que las dimensiones son semejantes a las de los objetos de madera, que la arcilla podrá ser humedecida hasta la saturación deseada o que se podrá utilizar arcilla con tipo de secado mediante calor, es decir, que las cajas de este material se solidifiquen por completo solamente cuando se tiene una fuente de calor y no a temperatura ambiente, como es el caso de este proceso.

Con el fin de disminuir costos, no se tendrán dos paredes en las cajas de arcilla ni relleno dentro de las mismas; esto no afecta el proceso pues se tiene la suficiente rigidez en los objetos para ser manipulados. La arcilla será FIMO Classic, de la marca STAEDTLER, y su temperatura recomendada de endurecimiento total es de 120 °C por 10 minutos o de 150 °C por 5 minutos, con una tolerancia de hasta 175 °C sin presentar deformación por calor. Para este caso se utilizará la temperatura de 120 °C.

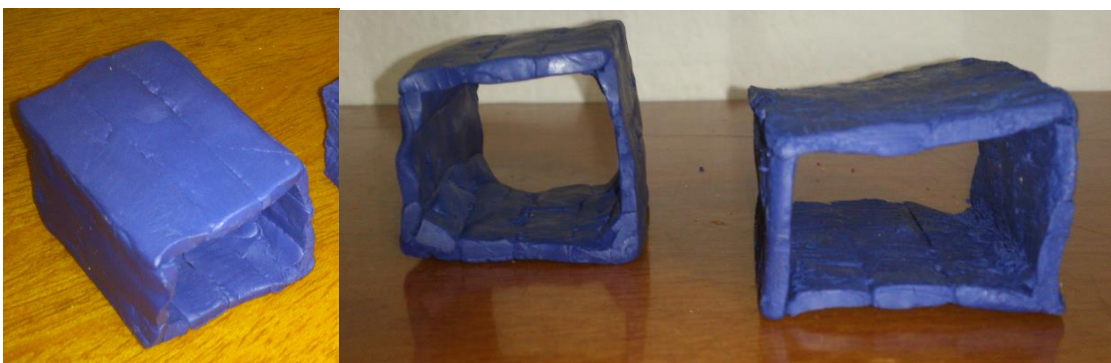
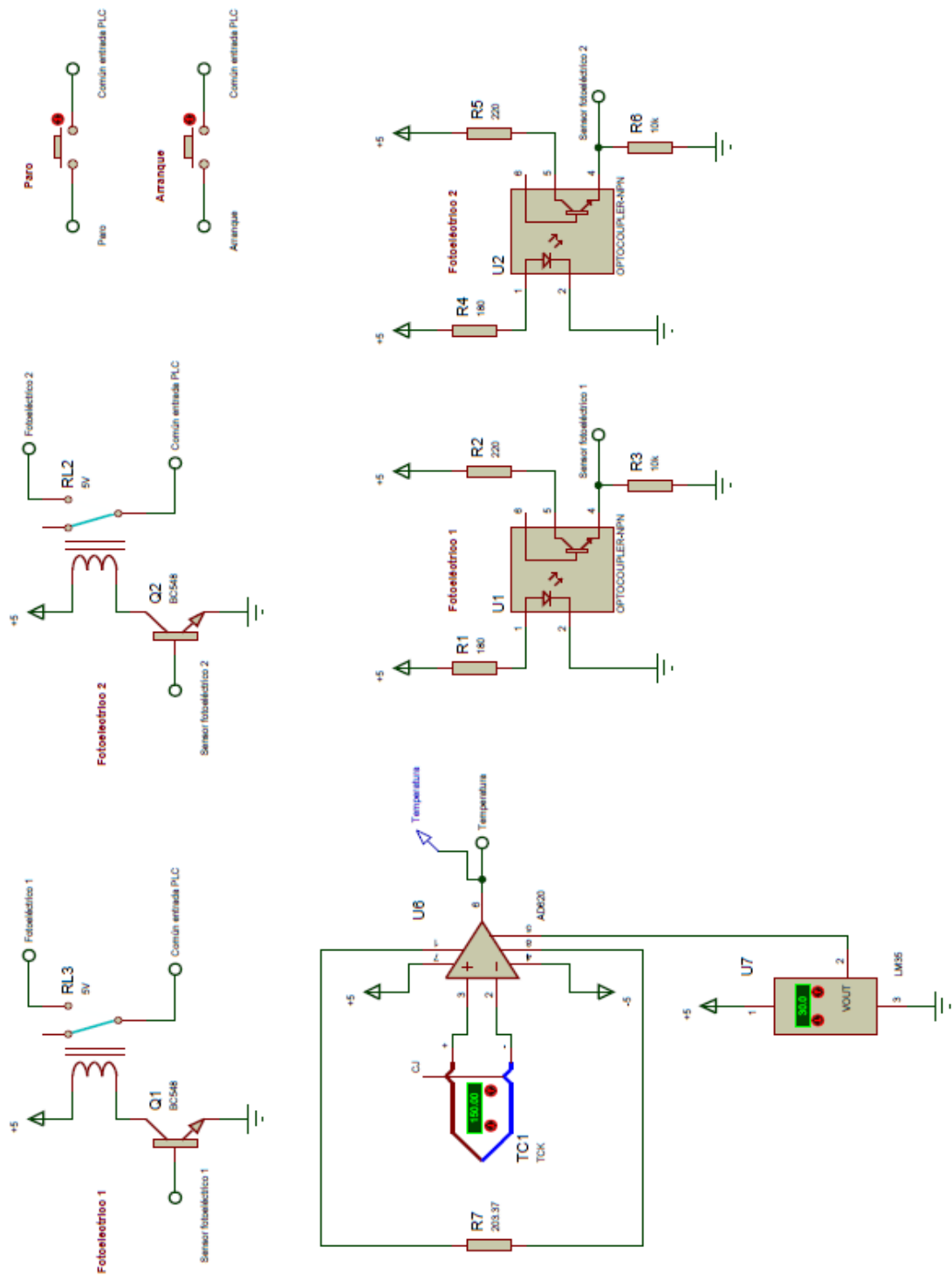


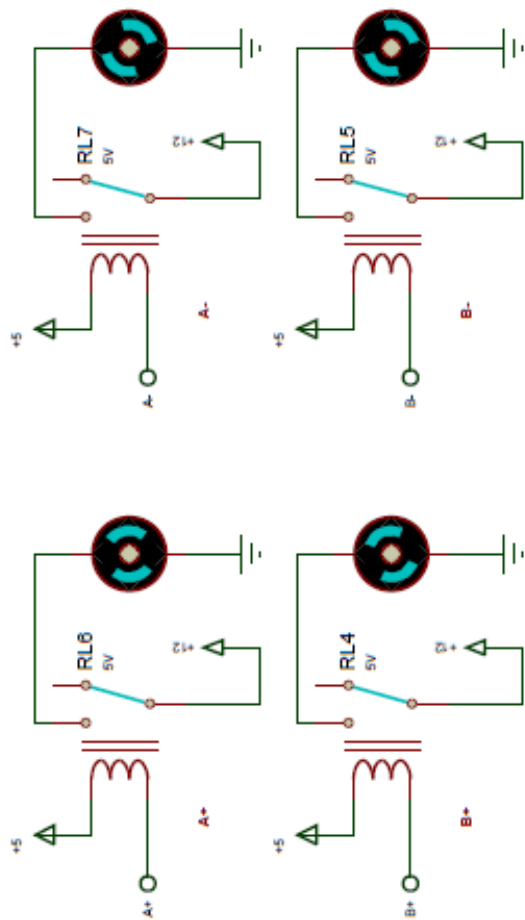
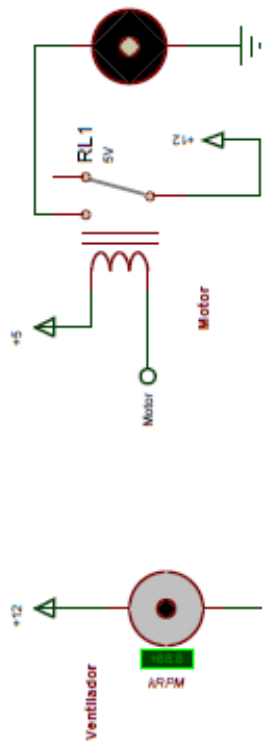
Imagen 24. Objetos de arcilla a secar

Existen múltiples variables que modifican el tiempo de cocción, como qué tan dura se requiere la arcilla, el grosor de las paredes, cuánta humedad eliminar en ella, etc. El operador definirá las características del objeto que necesitará (tanto en la arcilla como en la madera) y será el encargado de elegir la temperatura deseada y el tiempo de secado, siendo necesario que esto se programe al menos una vez antes del inicio del proceso.

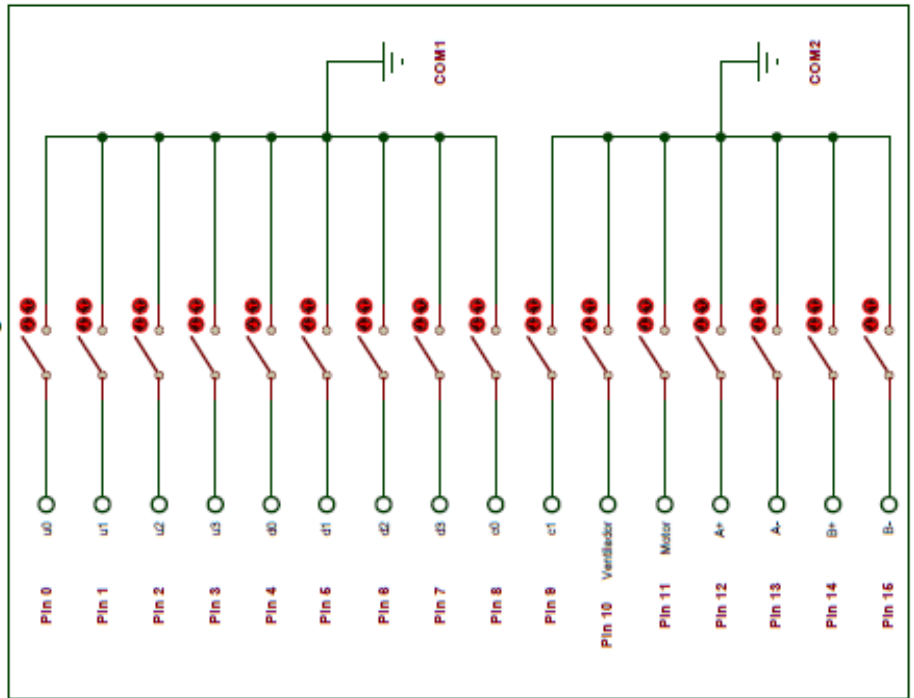
En resumen, el operador programará una temperatura deseada para la madera y una para la arcilla y un tiempo de calentamiento para cada uno de los materiales, dependiendo de sus necesidades de humedad y dureza. Estos datos podrán ser cambiados cuando se desee sin que se altere la lógica del proceso, siempre y cuando se cumpla con los límites de temperatura propuestos anteriormente.

3.4 Diagrama de conexiones eléctrico-electrónicas y neumáticas

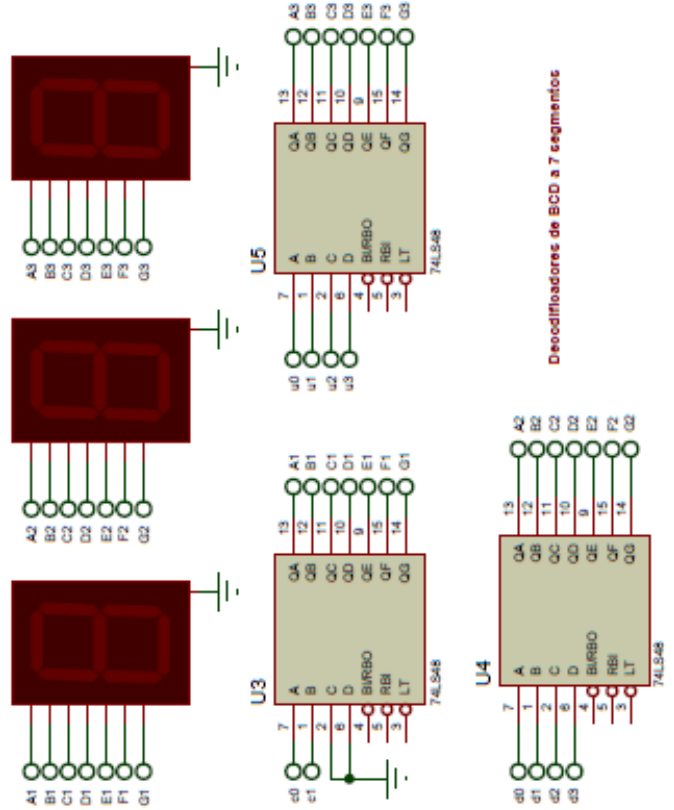


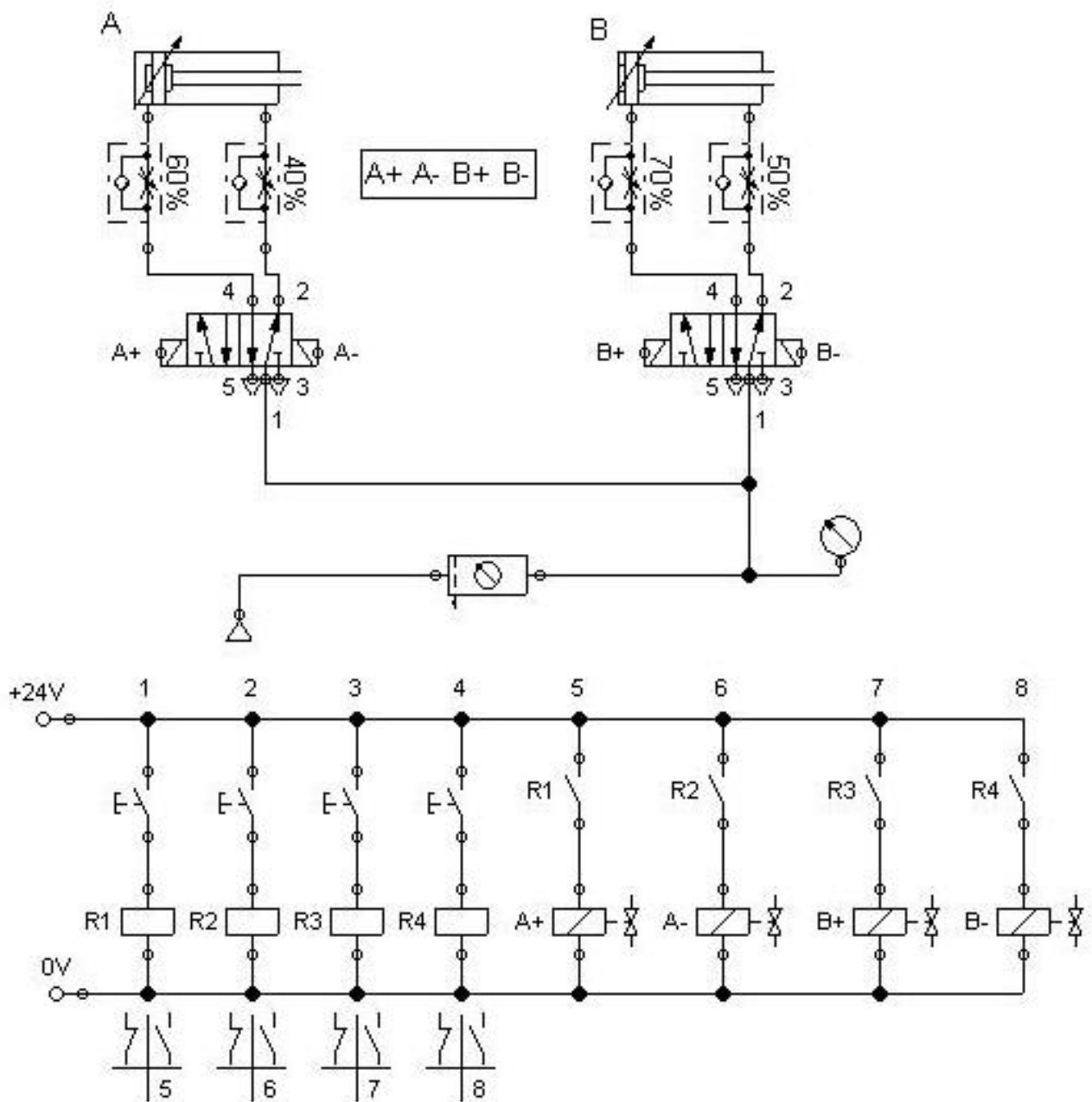


Salidas digitales PLC



Despliegues de 7 segmentos





3.5 Construcción del modelo funcional

La construcción del modelo funcional se puede dividir, fundamentalmente, en dos partes: El horno y la línea de proceso. Primero se elabora la línea de proceso para determinar las dimensiones generales del sistema y el acomodo de todos los sensores y de todos los actuadores, salvo las resistencias eléctricas. La primera parte a definir es la construcción de la banda transportadora.

Se diseñó una banda transportadora a partir de ejes (comúnmente conocidos como masas) de bicicletas, con doble estrella y dos cadenas de bicicleta. Las masas tienen un tamaño estándar y solo una rosca para insertar una estrella.



Imagen 25. Masa de bicicleta con estrella

Puesto que se requería colocar otra estrella del otro lado de la masa para tener una banda transportadora sin inclinación, se soldó una estrella idéntica a la primera, en ambas masas. Las estrellas son de la marca *American Cycle Systems (ACS)* y son compatibles con cadenas de 1/2" x 1/8". Las estrellas tienen 18 dientes cada una.

Para tener una rotación del eje de las masas independiente a las paredes que lo soportan, se colocaron rodamientos en ambos lados de los ejes de las masas. El diámetro interior de los baleros es 1 1/32" y el exterior de 7/8".



Imagen 26. Estrella de bicicleta

La banda transportadora será hecha con rejilla de acero, como la utilizada en mecheros de laboratorio, puesto que puede soportar grandes temperaturas y tiene la elasticidad suficiente para doblarse y acoplarse a los giros de las estrellas. La longitud de la rejilla a utilizar será determinada por la longitud de las cadenas de bicicleta. Las cadenas con las que se trabajará son de la marca SunRace de 1/2" x 1/8", con 112 eslabones.

Al colocar las cadenas sobre las estrellas, se tensan al alejar las masas la mayor distancia posible y ahí se determina la posición de los ejes, por lo que se procede a fabricar las paredes que sostendrán toda la estructura. Para soportar las temperaturas del horno y el peso de la estructura, se utilizará lámina de acero de 3 mm de grosor con los barrenos ubicados de forma que ahí se introduzcan los ejes de las masas, los cuales tendrán una separación de 57.8 cm. Las dimensiones de las paredes son de 67 X 13 cm.

El motor se suelda al eje de la banda en el lugar considerado en la *Imagen 11*, se utiliza una abrazadera para que se sostenga fijo a su soporte.

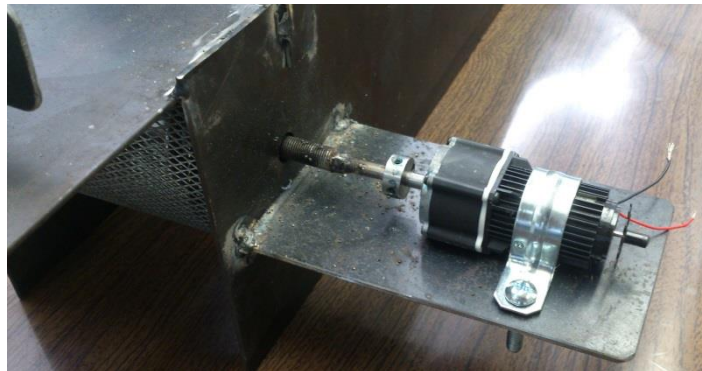


Imagen 27. Motor unido al eje de la banda

Se fabrican estructuras de soporte para los dos pistones, realizando los barrenos necesarios para que se puedan insertar tornillos y asegurar que el pistón no se desplace. Se coloca un acoplamiento al vástago de los pistones, el cual se basa en una tuerca con una lámina soldada para abarcar una mayor área de contacto con los objetos y que éstos no tiendan a girar.

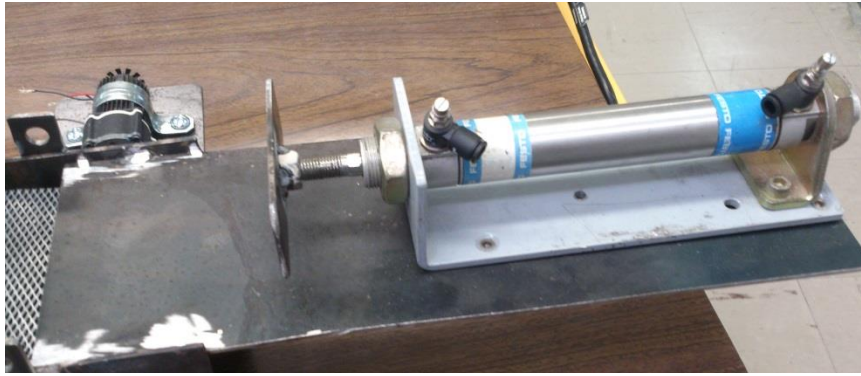


Imagen 28. Pistón al inicio de la banda

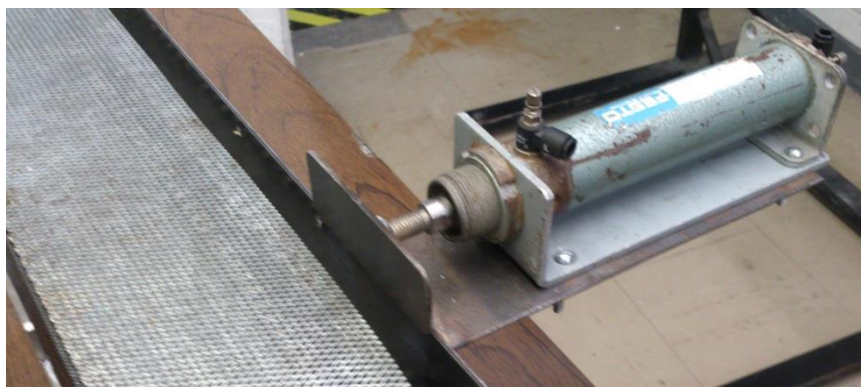


Imagen 29. Pistón para organizar material

Es necesario elaborar un soporte para el sensor capacitivo, pues se debe procurar que las detecciones de material sean realizadas siempre bajo las mismas condiciones siempre, y el acercarse o alejarse de un objeto a un sensor capacitivo arroja diferentes lecturas. El diámetro del sensor capacitivo es de 29.5 mm y las tuercas de sujeción pueden sostener al sensor en el agujero del soporte, que se eligió hacer de 33.5 mm. También se pueden construir pequeños soportes para los sensores fotoeléctricos, con barrenos de 5/16" en pequeñas láminas soldadas a las paredes de la base.



Imagen 30. Soportes del sensor capacitivo (izquierda) y sensores fotoeléctricos (derecha)

Se muestra la apariencia general de la estructura del proceso, sin colocar los sensores o el horno.

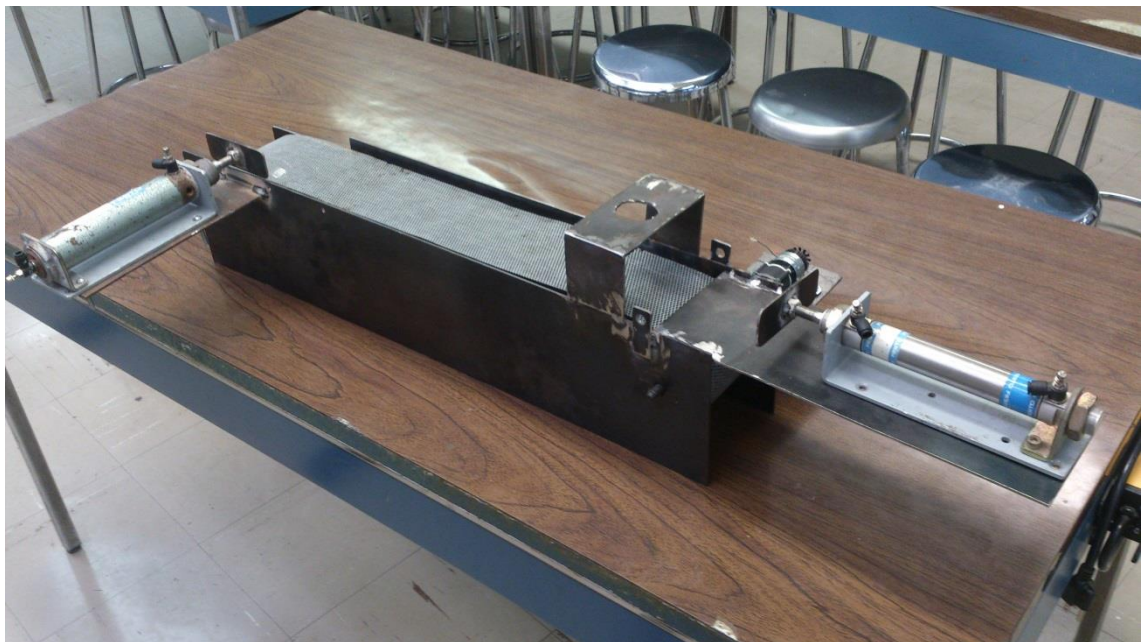


Imagen 31. Modelo físico sin horno ni sensores

Para la construcción del horno, se utilizaron dos placas metálicas del mismo grosor que las utilizadas en la base. La forma del horno se basó en la forma del sostén del sensor capacitivo, solo que el agujero en la parte superior es mucho más pequeño del tamaño necesario para que solamente pueda pasar el termopar por dentro de él. Las resistencias se montaron en bases de hornilla eléctrica y estas fueron soldadas sobre las paredes

laterales del horno. Las terminales de las resistencias se soldaron en pares, puesto que ambas recibirán la misma señal de control del relevador de estado sólido. Para reducir la disipación del calor al ambiente, solo se dejó un espacio en la parte inferior del horno para que las cajas de arcilla y madera pudieran pasar por debajo.



Imagen 32. Horno con resistencias montadas

Posteriormente, se montaron dos “almacenes”, donde se distribuirán las cajas dependiendo de su material, al final del proceso de secado. Todos los sensores (capacitivo, fotoeléctricos y termopar) se montaron sobre sus respectivas bases en la estructura. Por último, para una más fácil interacción entre PLC y el circuito electrónico y para ocultar los componentes eléctricos, se elaboró una bornera.



Imagen 33. Vista frontal de bornera

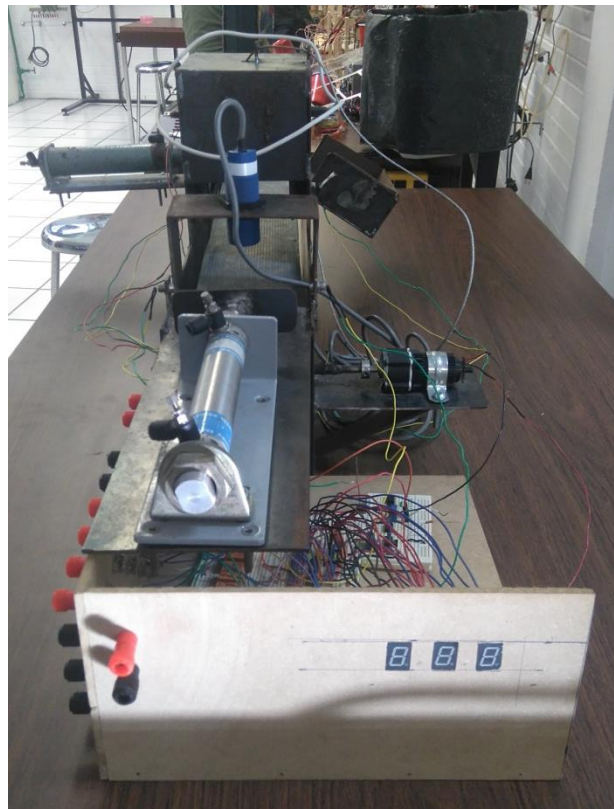
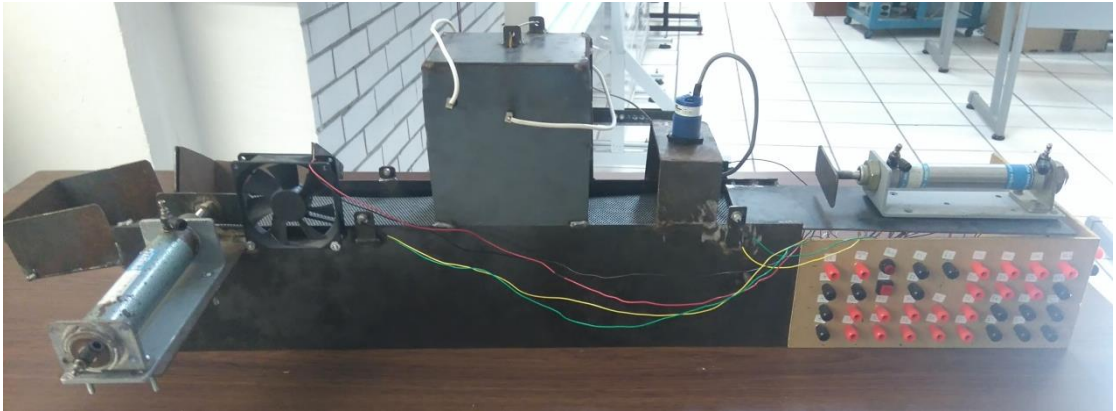


Imagen 34. Modelo físico final

Capítulo 4

Implementación del control

4.1 Propuesta de control PID de temperatura

Debido a la naturaleza del proyecto, en el cuál se controlará un sistema térmico, que es generalmente lento, se procurará que el sistema tenga una respuesta sobreamortiguada al control PID propuesto. Además, al tener solo un control del calentamiento pero no del enfriamiento dentro del horno, no es viable tener una respuesta subamortiguada y, mucho menos, una no amortiguada.

La planta del sistema de control es el horno, teniendo como variable de control la potencia entregada por las resistencias (que tiene una relación proporcional directa con el tiempo de encendido y apagado de las señales eléctricas de control del PLC) y como variable a controlar la temperatura del interior.

Existen tres objetivos de control presentes en el proyecto. El más fácil de identificar es el de regulación, es decir, la temperatura debe tender a un valor deseado y mantenerse constante en él, sin tener un error en estado permanente. Otro objetivo es el de seguimiento, que significa que la temperatura real tienda a seguir la trayectoria ideal propuesta para la variable a controlar. El último objetivo de control es el desempeño.

Debe procurarse un control sobreamortiguado con un tiempo de levantamiento y asentamiento deseado.

Para proponer los coeficientes P, I y D para el controlador, se requiere la función de transferencia de la planta, así como asumir que es un sistema lineal y dinámico. Existen dos formas de definir la función de transferencia de una planta, mediante experimentación o por modelado matemático. La forma a elegir es determinada por el número de suposiciones que se deben realizar; muchas de estas vuelven poco fiel al modelado matemático.

El horno es un prisma rectangular que no está cerrado. La cara inferior del prisma rectangular está abierta y en contacto directo con el ambiente, por lo que la disipación de calor por este lugar es mucho mayor que por las paredes de acero que delimitan el resto del horno. Esto complica de sobremanera el modelado matemático. Además, aunque las paredes de acero se puedan modelar como resistencias térmicas, se requiere del coeficiente de conducción del acero k y este cambia notablemente de acuerdo a la temperatura del horno. Puesto que se propuso un rango de temperatura amplio a manipular, estas variaciones ya no se pueden despreciar fácilmente.

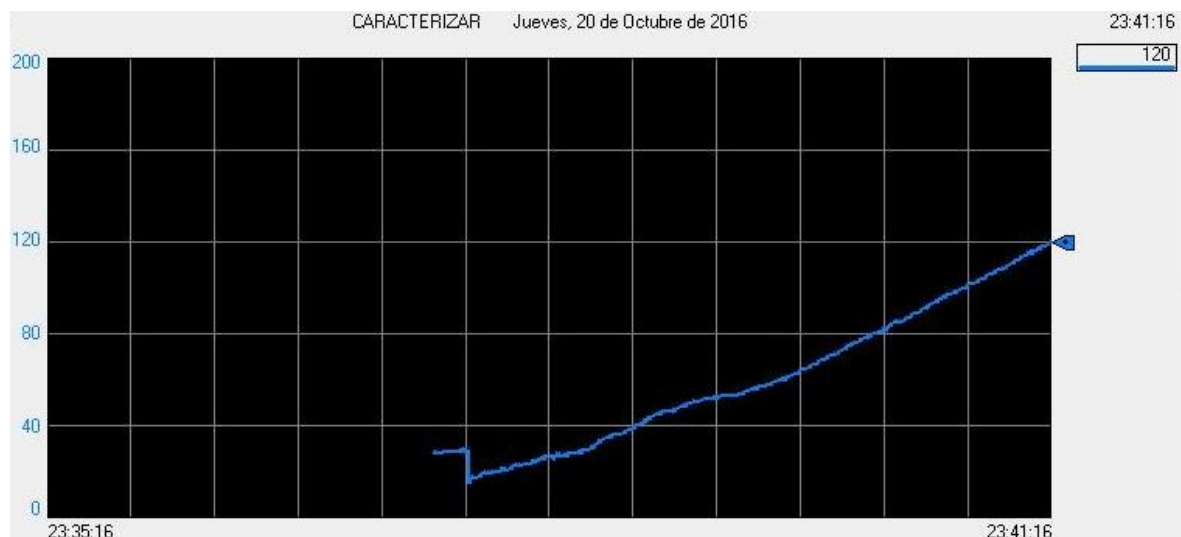
Aunque se pudiera idealizar el horno como un capacitor térmico con ecuación de energía interna $v = C_p \cdot m(\theta_i - \theta_e)$, la capacidad calorífica C_p y la masa m es diferente cuando se tiene el horno vacío, a cuando se tiene madera o cuando se tiene arcilla dentro. Por lo tanto, no se puede modelar matemáticamente de la misma forma para arcilla que para madera.

Por último, si se usa el método de modelado matemático, generalmente se asume que la temperatura dentro del horno es igual en todos los puntos interiores; sin embargo, los objetos de madera o arcilla pasan por la parte baja del horno, la parte más lejana de la fuente de calor. En cambio, el método experimental ofrece más ventajas en este aspecto, ya que el termopar que mide la temperatura interna se encuentra también en la parte baja y ofrece lecturas confiables por estar cerca de los objetos que atraviesen el horno. Por lo antes mencionado, se elige obtener la función de transferencia del horno mediante experimentación.

Se aplica un escalón de 1700 de magnitud, que representa el tener una señal de control que tenga encendidas ambas resistencias (de 850 W cada una) todo el tiempo. Con esto, se puede graficar el cambio de la temperatura interna del horno y obtener distintos parámetros de la función de transferencia, como el tiempo de levantamiento, tiempo de asentamiento y el valor en estado permanente.

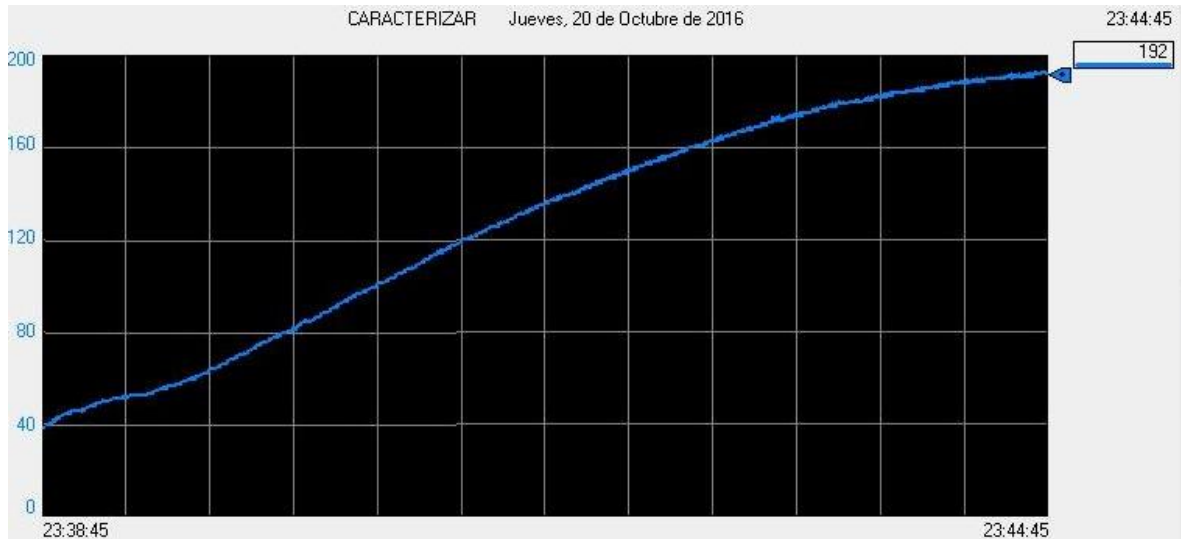
Mediante la medición de la temperatura con el módulo de entrada analógica conectado al PLC SLC 500 y la función *Trend* del software RSLogix 500, se obtuvieron gráficas de la evolución de esta variable a través del tiempo aplicando la entrada escalón de 1700 de magnitud.

Para las primeras tres gráficas, la escala de temperatura es de 0 a 200 °C, mientras que para la última es de 0 a 240 °C. Cada segmento horizontal, en todas las gráficas, equivale a 30 segundos.



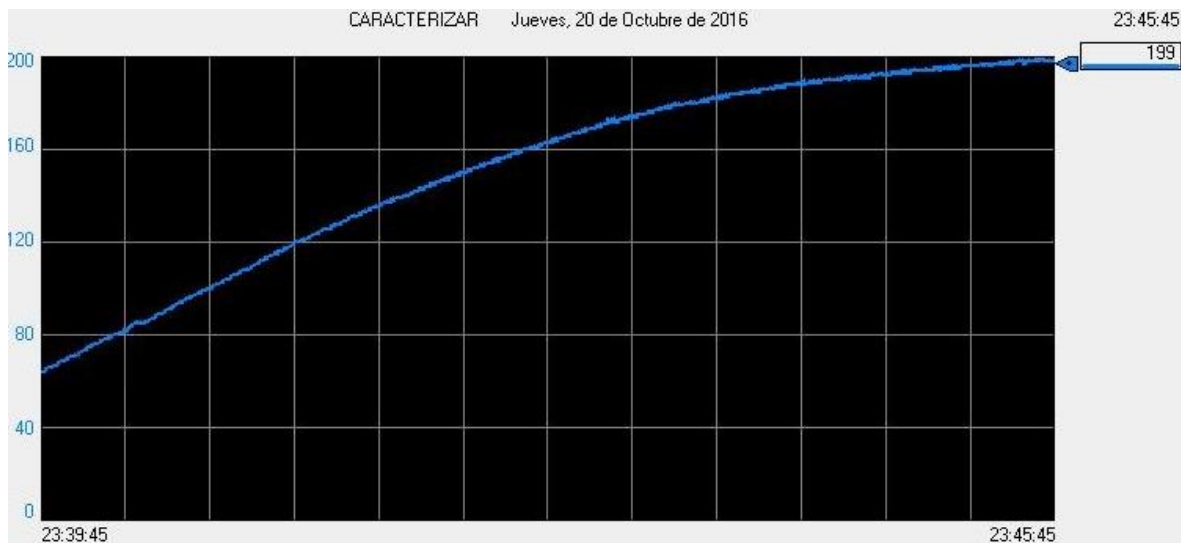
Gráfica 1. Caracterización del horno 1

Se observa que al momento de que se encienden ambas resistencias eléctricas, las condiciones iniciales de temperatura medida son de 22 °C. En tres minutos y medio, la temperatura aumenta en casi 100 °C, hasta 120 °C.



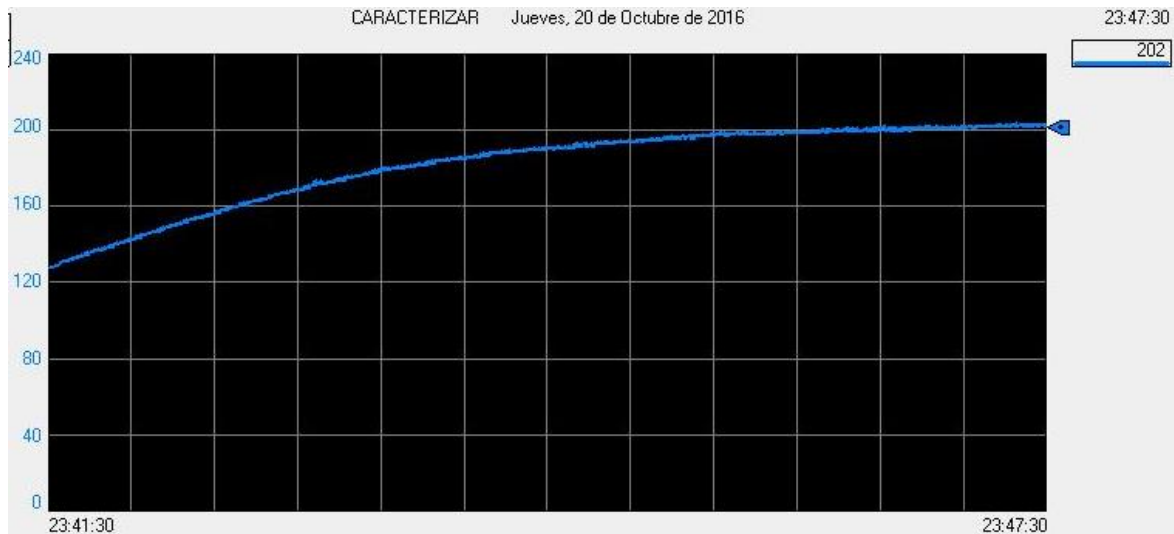
Gráfica 2. Caracterización del horno 2

Luego de 7 minutos del inicio de la experimentación, la temperatura alcanzada en el horno es de 192 °C y se observa que existe un punto de inflexión en la gráfica, indicando que se está llegando a su valor final de estado permanente.



Gráfica 3. Caracterización del horno 3

Después de que pasa otro minuto (es decir, 8 minutos totales desde el inicio), la temperatura solo aumenta 7 °C y la trayectoria de la variable adquiere una dirección casi horizontal.



Gráfica 4. Caracterización del horno 4

Después de 9 minutos y 45 segundos de iniciar la experimentación, la temperatura llega a su valor en estado permanente, de 202 °C.

De estas gráficas, se obtiene la función de transferencia. Como la temperatura inicial es de 22 °C, esta se toma como temperatura de condiciones iniciales T_0 para el cálculo de la función de transferencia. Entonces, se define una variable $\theta = T - T_0$ que representa la diferencia entre la temperatura real mostrada en las gráficas y la temperatura de condiciones iniciales. La función de transferencia se obtiene conforme a θ como la salida $Y(s)$, en lugar de utilizar la variable T , asegurando así condiciones iniciales nulas.

Existe bibliografía que define al tiempo de levantamiento (t_r) para sistemas de segundo orden como el tiempo que se tarda en alcanzar el 90% del valor en estado permanente [27] pero, para este proyecto, se definirá t_r como el tiempo en que la variable a controlar alcanza el 63% valor en estado permanente, como si fuera de primer orden, debido a la lentitud del sistema. Se observa que el valor en estado permanente es $\theta_\infty = 180$ °C, la diferencia entre 202 °C y 22 °C. El 63% de 180 °C es 113.4 °C, es decir, cuando $\theta = 113.4$ °C equivale a decir que $T = 135.4$ °C, lo cual se alcanza luego de aproximadamente 234 segundos de aplicar la entrada al escalón de 1700 de amplitud.

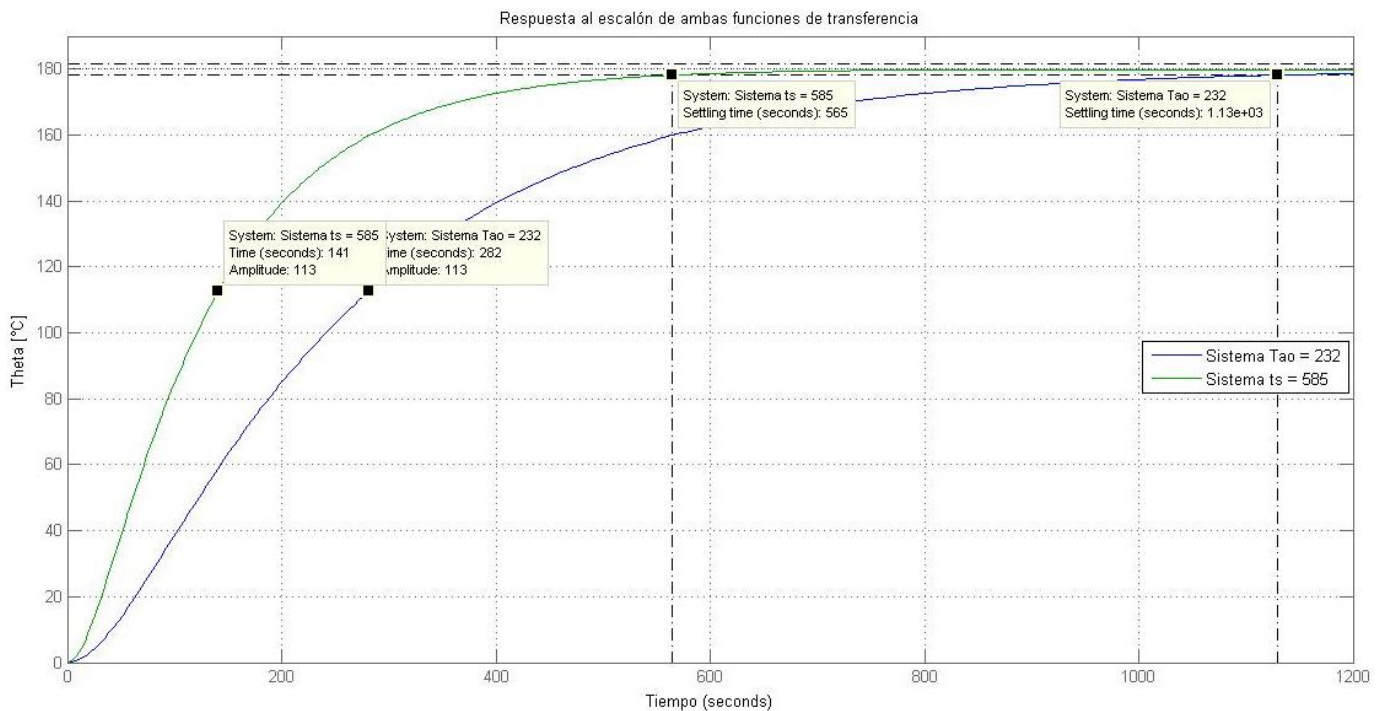
Con estos parámetros, se obtiene una función de transferencia de segundo grado que cumpla de la mejor forma con las características antes mencionadas. La ecuación general de una función de transferencia de segundo grado es:

$$G(\underline{s}) = \frac{k \cdot \omega_n^2}{\underline{s}^2 + 2\varepsilon \cdot \omega_n \cdot \underline{s} + \omega_n^2} = \frac{k \cdot \omega_n^2}{(\underline{s} + \alpha)(\underline{s} + \beta)}$$

Tal como se observa en las gráficas, la respuesta al escalón es de tipo críticamente amortiguada o sobreamortiguada, es decir, el valor del factor de amortiguamiento ε es igual o mayor a 1.

Generalmente, en un sistema sobreamortiguado, se tiene una constante de tiempo τ que representa el tiempo de levantamiento (t_r) cuando se tiene un polo dominante. Esto conlleva que el tiempo de asentamiento (t_s) sea aproximadamente 4 o 5 veces τ , dependiendo de si se utiliza el criterio del 2% o del 1% para valor en estado permanente, respectivamente. Sin embargo, como $t_r = 234$ s y $t_s = 585$ s, se observa que esta relación no se cumple.

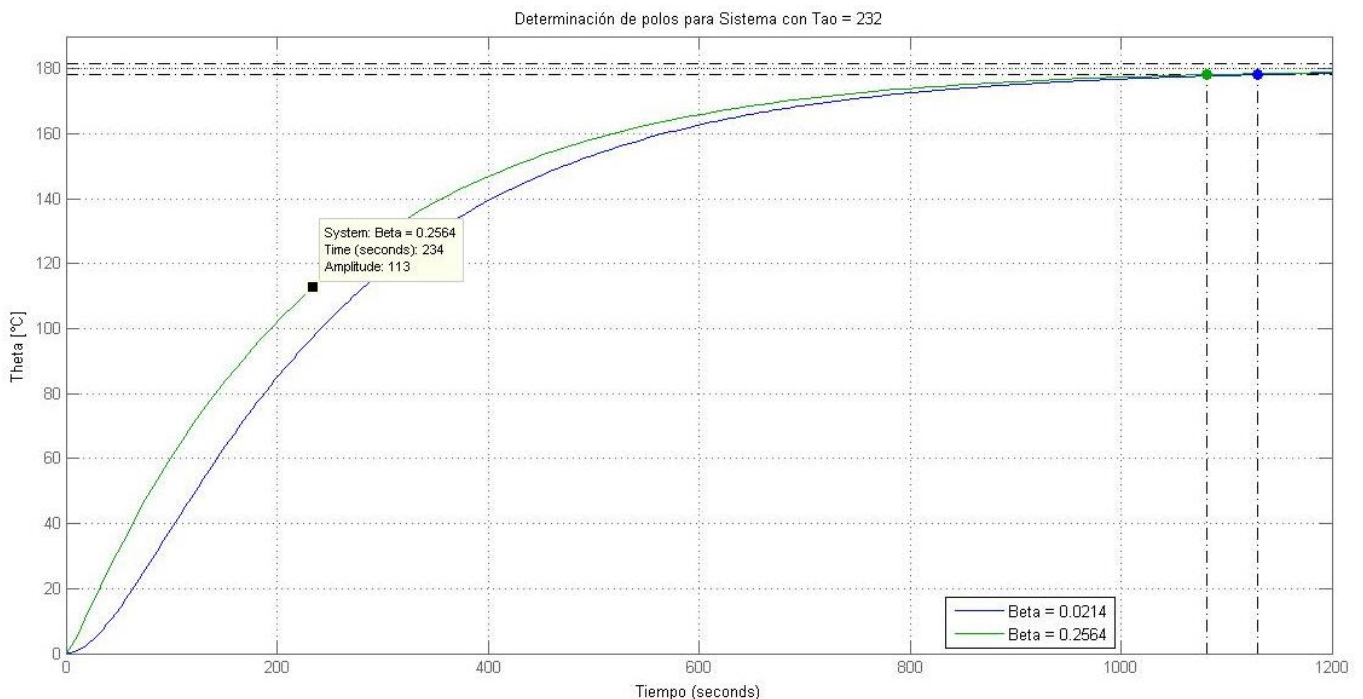
Se simula en un programa de procesamiento numérico la respuesta al escalón de amplitud de 1700 a dos sistemas: Uno donde $\tau = t_r = 234$ s y otro en el que $t_s = 5 \tau = 585$ s. Ambos sistemas determinarán un polo dominante $-\alpha$ diferente, pues $\alpha = 1/\tau$. Para el primer sistema $\alpha = 0.0043$ y para el segundo sistema $\alpha = 0.0085$. Como polo no dominante $-\beta$, se propone que $\beta = 5\alpha$. Entonces $\beta = 0.0214$ y $\beta = 0.0427$.



Gráfica 5. Respuesta al escalón de 1700 de amplitud de ambos sistemas propuestos

Tal como se observa, si se obtiene una función de transferencia con $\tau = 234$ s, la respuesta es relativamente parecida a la real los primeros 300 segundos (pues la constante de tiempo es de 282 s en lugar de 234 s) pero después se vuelve muy lenta a comparación del sistema verdadero, pues su tiempo de asentamiento es de más de 1000 segundos. En cambio, el sistema que utiliza $t_s = 585$ s, cumple casi perfectamente con el tiempo de asentamiento, pero es mucho más rápido que el comportamiento real. Esto nos indica que se debe manipular el valor propuesto para el polo más lejano al origen $-\beta$ y así tener un comportamiento más fiel.

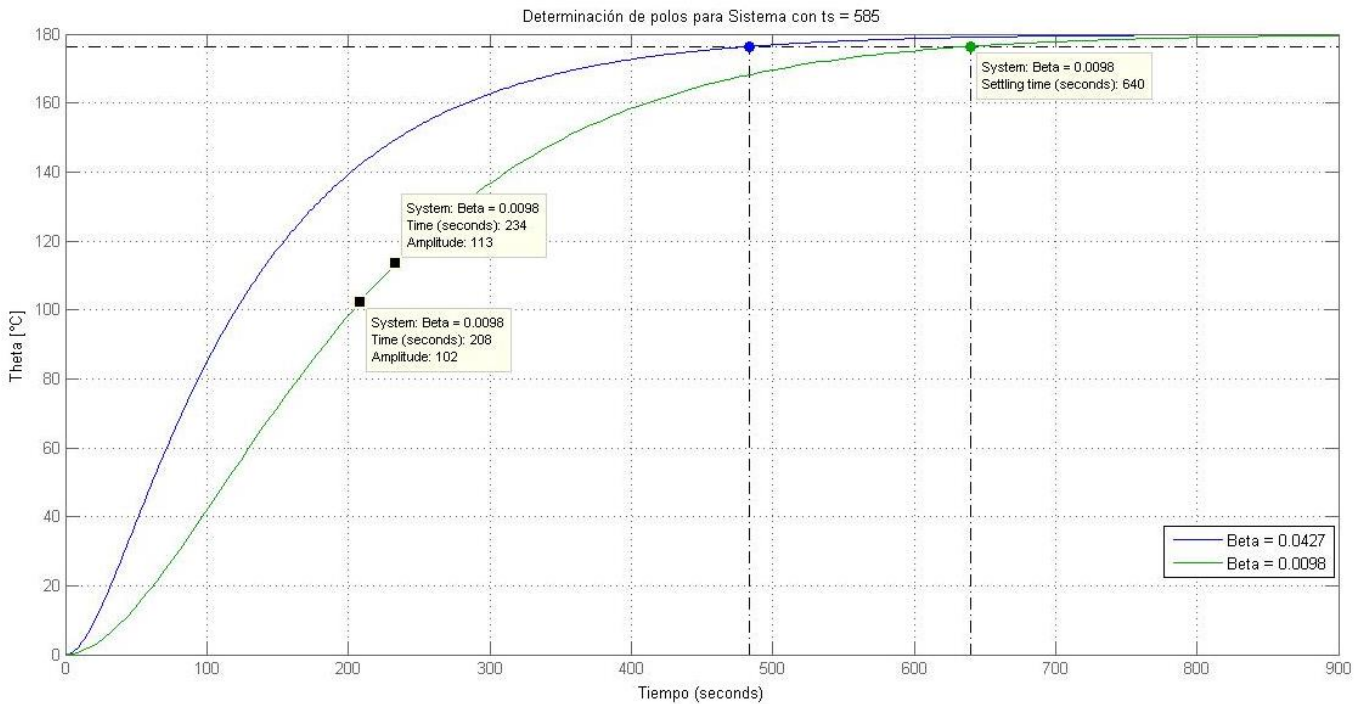
Primero, se toma el sistema con $\tau = 234$ s y se aleja a $-\beta$ del origen para que el comportamiento del sistema sea más rápido que el mostrado en la gráfica anterior. Cuando $\beta = 25$ $\alpha = 0.1068$, la respuesta es la siguiente.



Gráfica 6. Comportamientos de sistemas con $\tau = 234$ s al variar β

Con este cambio, el sistema se volvió un poco más rápido, pues $\tau = 234$ se cumple pero se observa como el tiempo de asentamiento disminuyó de una forma mínima comparada con los 585 segundos que se requieren. Por lo tanto, se procede a variar el polo $-\beta$ para el sistema con $t_s = 585$ s.

Tal como quedó comprobado anteriormente, si el valor de β se incrementa, el polo más lejano del origen se aleja aún más y el sistema se vuelve más rápido; entonces, para este caso se disminuirá el valor de β . Si $\beta = 1.15 \alpha = 0.0098$, se tiene esta respuesta.



Gráfica 7. Comportamientos de sistemas con $t_s = 585$ s al variar β

Si $\alpha = 0.0085$ y $\beta = 0.0098$, se tiene un sistema con el comportamiento sobreamortiguado que deseamos: El tiempo de levantamiento (t_r) es de 234 segundos exactos y el tiempo de asentamiento es de 640 segundos, mucho más cercano a los 585 segundos deseados, comparado con la propuesta anterior. Como otro ejemplo, después de tres minutos y medio de actuar el escalón, se tiene un $\theta = 102$ °C o $T = 124$ °C, muy cerca de los $T = 120$ °C obtenidos en las gráficas de la experimentación. Por lo tanto, se realizará el análisis y diseño de control PID con la función de transferencia que se obtiene con estos valores de α y β .

La ecuación característica de la función de transferencia es $(s + \alpha)(s + \beta)$, es decir, $s^2 + 0.01838s + 8.401 \times 10^{-5}$. Además se sabe que $\omega_n^2 = \alpha \cdot \beta = 8.401 \times 10^{-5}$. El valor de la ganancia $k = Y_\infty / U_\infty$, es decir, dividiendo el valor en estado permanente $\theta_\infty = 180$ entre la entrada en estado permanente, que en nuestra experimentación siempre fue

constante y de 1700. Entonces, $k = 0.1059$ y el numerador de la función de transferencia es igual a 8.8951×10^{-5} .

Por lo tanto, la función de transferencia del horno es:

$$G(\underline{s}) = \frac{8.895 \cdot 10^{-6}}{\underline{s}^2 + 0.01838 \cdot \underline{s} + 8.401 \cdot 10^{-5}}$$

Teniendo esta función de transferencia, se observa, mediante el criterio de Newton, que no existen cambios en el signo del denominador de la función de transferencia, por lo que la planta es estable (comprobable, pues los polos del sistema son negativos: -0.0085 y -0.0098). Sin embargo, al ser una función de transferencia de tipo 0, una entrada escalón produce un error en estado permanente e_{∞} .

La ecuación del controlador PID en el dominio de Laplace es:

$$H(\underline{s}) = \frac{\underline{s}^2 \cdot D + \underline{s} \cdot P + I}{\underline{s}}$$

Para determinar el objetivo de control de regulación, se calcula la función de transferencia en lazo abierto del sistema $\text{GH}(\underline{s})$:

$$\text{GH}(\underline{s}) = \frac{8.895 \cdot 10^{-6}(\underline{s}^2 \cdot D + \underline{s} \cdot P + I)}{\underline{s}(\underline{s}^2 + 0.01838 \cdot \underline{s} + 8.401 \cdot 10^{-5})}$$

Como esta función de transferencia es de tipo 1 y la entrada será un escalón, el error en estado permanente $e_{\infty} = 0$. Para comprobar la estabilidad del sistema con un controlador PID, se obtiene la función de transferencia en lazo cerrado del sistema, $T(\underline{s})$:

$$T(\underline{s}) = \frac{\underline{s}^2 \cdot D + \underline{s} \cdot P + I}{112422 \cdot \underline{s}^3 + (2065.87 + D) \cdot \underline{s}^2 + (9.44 + P) \cdot \underline{s} + I}$$

Se propone que el sistema controlado tenga un parámetro de desempeño de tiempo de asentamiento de 9 minutos o 540 segundos, además de que tenga un comportamiento sobreamortiguado y que tenga un tiempo de levantamiento de dos minutos y medio o 150 segundos.

Por lo tanto, si $\tau = 150$ s, el primer polo deseado será $P_1 = -1/\tau = -0.00666667$. Iterando en Matlab para proponer los otros dos polos de lazo cerrado que cumplan de la mejor manera con los requisitos antes mencionados, $P_2 = -0.01$ y $P_3 = -0.00936667$.

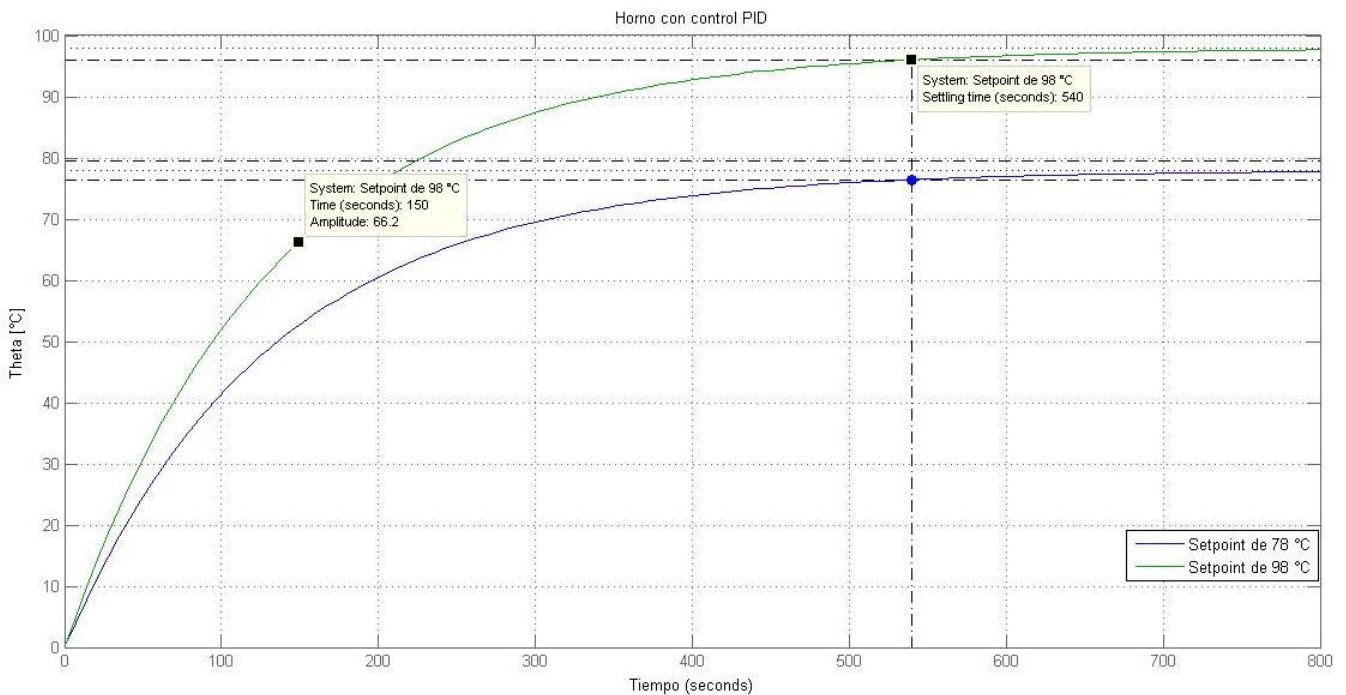
El denominador de $T(s)$ se iguala con la ecuación de tercer grado:

$$(s - P_1)(s - P_2)(s - P_3) = s^3 + 0.0260333 s^2 + 0.000222778 s + 6.2444 \times 10^{-7}$$

Resolviendo las igualdades entre los términos, se obtiene que $I = 0.0702012$, $P = 15.6$ y $D = 860.849$. Estos son los coeficientes del control PID. La ecuación de lazo cerrado con los valores PID sustituidos es:

$$T(s) = \frac{2096.42 s^2 + 37.9923 s + 0.170961}{273780 \cdot s^3 + 7127.42 s^2 + 60.9923 s + 0.170961}$$

Este sistema controlado se simula con una entrada al escalón de $T = 100$ °C y con otra de amplitud $T = 120$ °C (es decir, $\theta = 78$ °C y $\theta = 98$ °C), que son los *Setpoint* de la madera y la arcilla, respectivamente.



Gráfica 8. Horno con control PID

Se observa que para ambas entradas al escalón, el tiempo de asentamiento es de 540 segundos, además que el comportamiento es sobreamortiguado y el tiempo de

levantamiento solo un poco menor de 150 segundos. En resumen, los coeficientes PID calculados son indicados para la propuesta hecha y se utilizarán en las funciones de control PID de ambos PLC.

4.2 Características PLC Allen Bradley SLC 500

4.2.1 Control PID en RSLogix 500

Dentro del menú *File/Misc* del programa RSLogix 500, se tiene la instrucción PID. Este bloque de instrucciones requiere varios parámetros para su funcionamiento: unos se escriben directamente sobre el bloque y otros en la pantalla de configuración de control PID. Para este control de temperatura, esta instrucción permite tener una salida ON/OFF durante un lapso de tiempo propuesto, proporcional a la salida analógica calculada por el control PID. De esta forma, se podrá representar la salida del control PID mediante un *PWM* y se podrán manipular las resistencias eléctricas.

La ecuación de control PID que rige esta instrucción es:

$$\text{Output} = K_c [(E) + 1/T_I \int (E)dt + T_D D(PV)/df] + \text{bias}$$

Por lo tanto, relacionando esta ecuación con la ecuación de PID dada en el apartado de *Conceptos básicos*, es importante resaltar que los parámetros P, I y D se definirán en la programación con $P = K_c$, $I = K_c \cdot 1/T_I$ y $D = K_c \cdot T_D$, siendo el *bias* un offset en la salida del controlador, aunque no se le asignará valor para este proyecto.

Sobre el bloque de PID, se pide seleccionar un bloque de control (*Control Block*), el cual es un grupo de 23 palabras que son reservadas para los cálculos de la salida. Se elige que este grupo de palabras inicie en N7:10. También se debe declarar una variable de proceso (*Process Variable*) que es la temperatura medida, es decir, la entrada analógica del PLC procesada para tener una lectura en °C. Se declara la variable de control (*Control Variable*) en N7:40, que es donde se mostrará el resultado del cálculo PID mediante un entero entre 0 y 16383, siendo 16383 el 100% de ON.

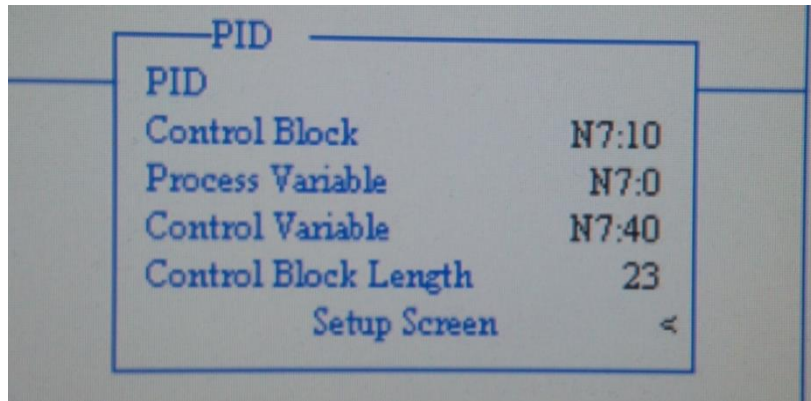


Imagen 35. Instrucción PID en RSLogix 500

En la pantalla de configuración, se definen los parámetros de sintonización, es decir, los valores de K_c , T_I , T_D , el tiempo de muestreo (*Loop update*), el modo de control (*Control Mode*, en este caso el error se calculará como el *Setpoint – Process Variable*) y otras características. Los valores de K_c , T_I y T_D pueden tener valores reales pero solo tienen resolución de un decimal.

En el área de entradas, se declara la temperatura deseada o *Setpoint*. Cabe recalcar que esta característica se encuentra en la palabra 2 del bloque de control y que será modificada dependiendo de si el material detectado es madera o arcilla (100 o 120, respectivamente). Estos valores es necesario escribirlos en la programación antes del inicio del proceso y, posteriormente y de forma automática, el controlador PID modificará este valor dependiendo del material identificado.

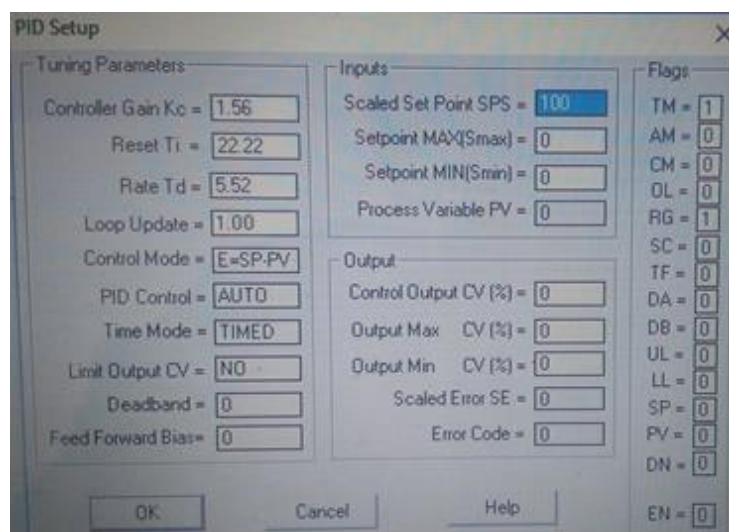


Imagen 36. Pantalla de configuración de la instrucción PID

Como $P = K_c = 15.6$, $T_i = K_c / I = 222.2284$ y $T_d = D / K_c = 55.1802$.

Como se mencionó anteriormente, debido a la resolución de la instrucción, el valor de T_i y T_d se deben redondear al primer decimal, pues no se puede escribir el valor exacto calculado. La configuración final de todos los parámetros del control PID se muestra en la *Imagen 36*.

4.2.2 Distribución de entradas y salidas

El SLC 500 es un PLC modular, es decir, se agregan módulos o tarjetas electrónicas al CPU del PLC para manipular los dispositivos de campo, manejar datos o adquirir propiedades de elementos del proceso. Cada uno de estos módulos se coloca en un *SLOT* o posición y se deben declarar en la programación cada uno de los módulos conectados al PLC:

Para el SLC 500, el *SLOT 0* está reservado para el procesador del PLC, el cual es un procesador 5/03. Se cuenta con un módulo de 16 entradas discretas a 24 VCD tipo *sink* en el *SLOT 1*. En el siguiente *SLOT*, se encuentra el módulo de 16 salidas discretas a relevador. Por último, se tiene el módulo 1746-NIO4V en el *SLOT 3*, el cual tiene dos canales analógicos, con una entrada y una salida por canal. De forma predeterminada, la entrada analógica del canal 0 está configurada para corriente y la entrada analógica del canal 1 está configurada para voltaje.

Físicamente, las entradas discretas 0 a 7 comparten el mismo común, mientras que las entradas discretas de 8 a 15 comparten otro común entre ellas. Las entradas analógicas tienen una terminal de *shield* y cada una tiene un común independiente. Se debe cuidar que las entradas analógicas no reciban más de 20 mA o 10 V o se puede dañar el módulos de entradas analógicas.



Imagen 37. Entradas analógicas y discretas del PLC SLC500

Las salidas discretas del SLC 500 pueden permitir corrientes de hasta 1 A de pico por pequeños lapsos de tiempo y 0.5 A continuos. Los pines 0 a 7 de las salidas discretas comparten común, así como los pines de 8 a 15. En el común de ambas filas se conectará la tierra única de VDC de todos los circuitos del sistema.

Las salidas analógicas del PLC solo pueden producir corrientes muy pequeñas, del orden de decenas de miliamperios, por lo que se requiere generalmente acondicionar estas salidas para utilizarlas en actuadores que controlarán, en este caso, será el relevador sólido el que activará las resistencias eléctricas. El voltaje de salida puede ser desde 0 hasta 10 VDC.



Imagen 38. Salidas analógicas y digitales del PLC SLC500

Se realiza una tabla de entradas y salidas con el fin de definir los bits de salida o de entrada que ocupará cada uno de los sensores o actuadores del sistema, así como el símbolo con el que se les reconocerá en la programación. Todos los sensores discretos

son normalmente abiertos y pulsadores, excepto el botón de paro, el cual es enclavado normalmente abierto. El pistón A es el pistón al inicio de la banda transportadora y el pistón B el encargado de realizar la separación de materiales.

Entrada	Descripción	Símbolo
0	Paro de emergencia	Paro
1	Arranque	Arranque
2	Fotoeléctrico de entrada a la banda	Fotoeléctrico 1
3	Fotoeléctrico de salida del horno	Fotoeléctrico 2
IN0	Sensor capacitivo	Capacitivo
IN1	Sensor de temperatura	Temperatura

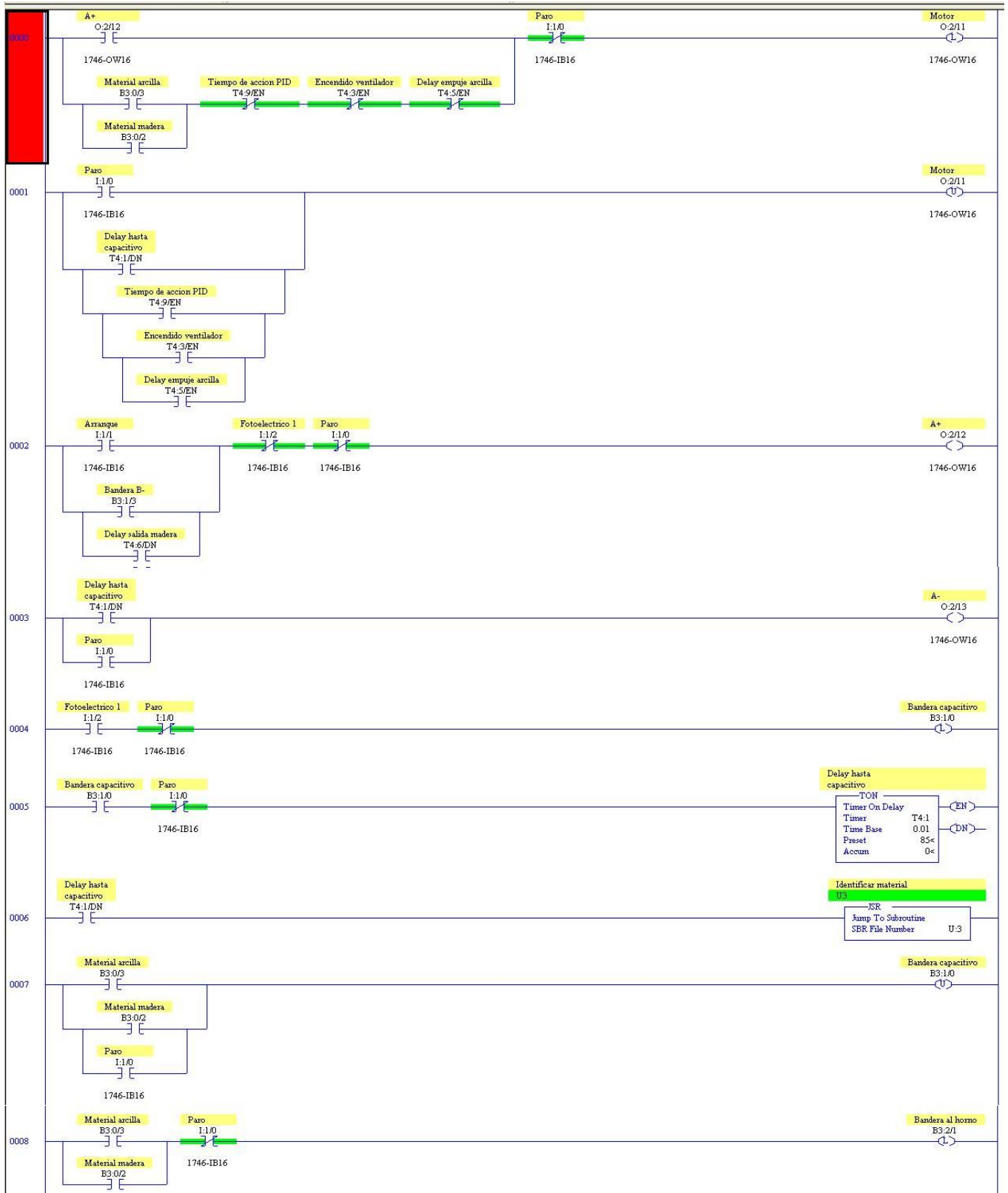
Salida	Descripción	Símbolo
0	Bit 0 del despliegue de 7 segmentos de las unidades	u0
1	Bit 1 del despliegue de 7 segmentos de las unidades	u1
2	Bit 2 del despliegue de 7 segmentos de las unidades	u2
3	Bit 3 del despliegue de 7 segmentos de las unidades	u3
4	Bit 0 del despliegue de 7 segmentos de las decenas	d0
5	Bit 1 del despliegue de 7 segmentos de las decenas	d1
6	Bit 2 del despliegue de 7 segmentos de las decenas	d2
7	Bit 3 del despliegue de 7 segmentos de las decenas	d3
8	Bit 0 del despliegue de 7 segmentos de las centenas	c0
9	Bit 1 del despliegue de 7 segmentos de las centenas	c1
10	Ventilador de 12 VDC	Ventilador
11	Motor de banda de 12 VDC	Motor
12	Pistón A con vástago fuera	A+
13	Pistón A con vástago dentro	A-
14	Pistón B con vástago fuera	B+
15	Pistón B con vástago dentro	B-
OUT1	Resistencias eléctricas del horno	Horno

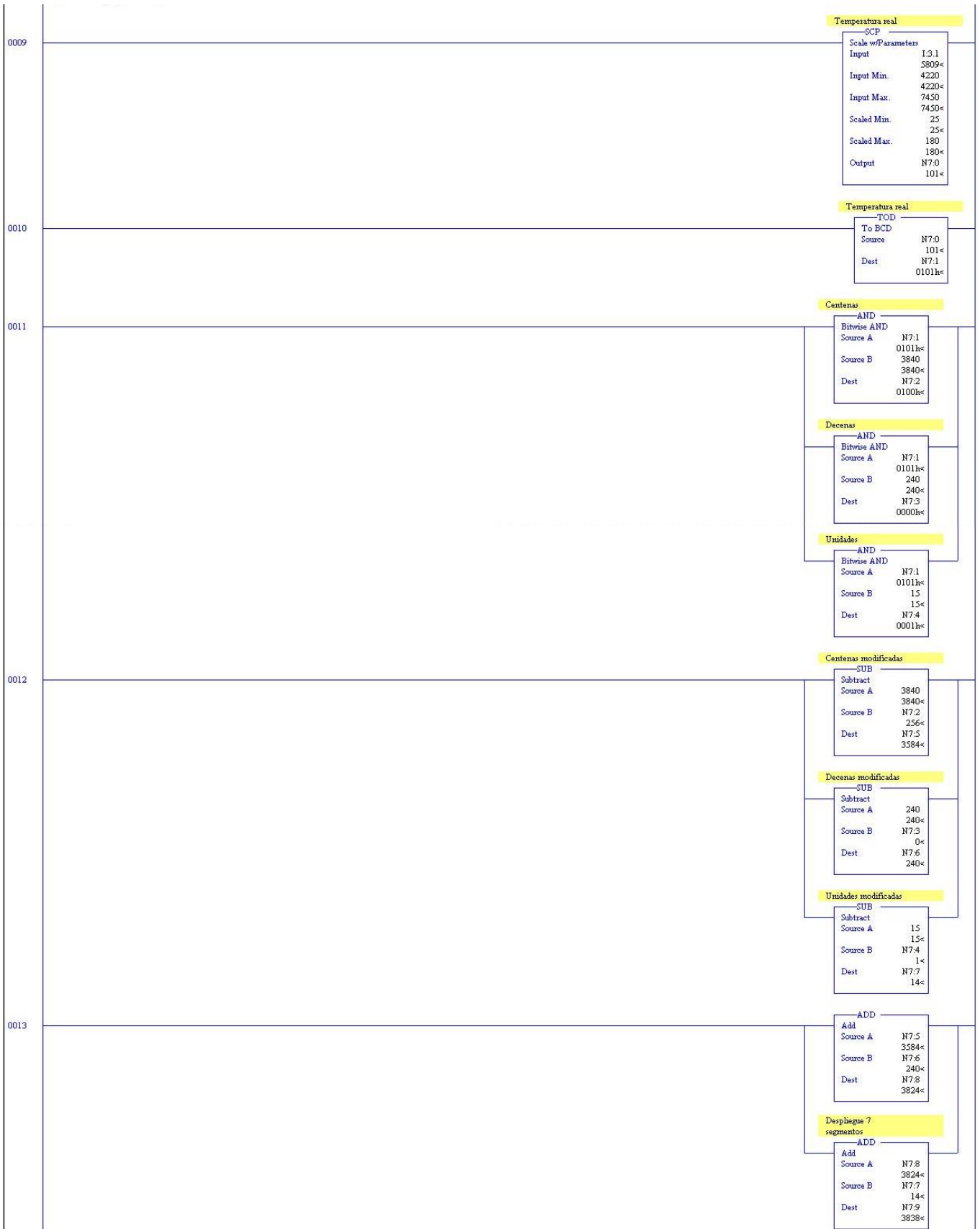
Tabla 4. Tablas de entradas y salidas del PLC SLC 500

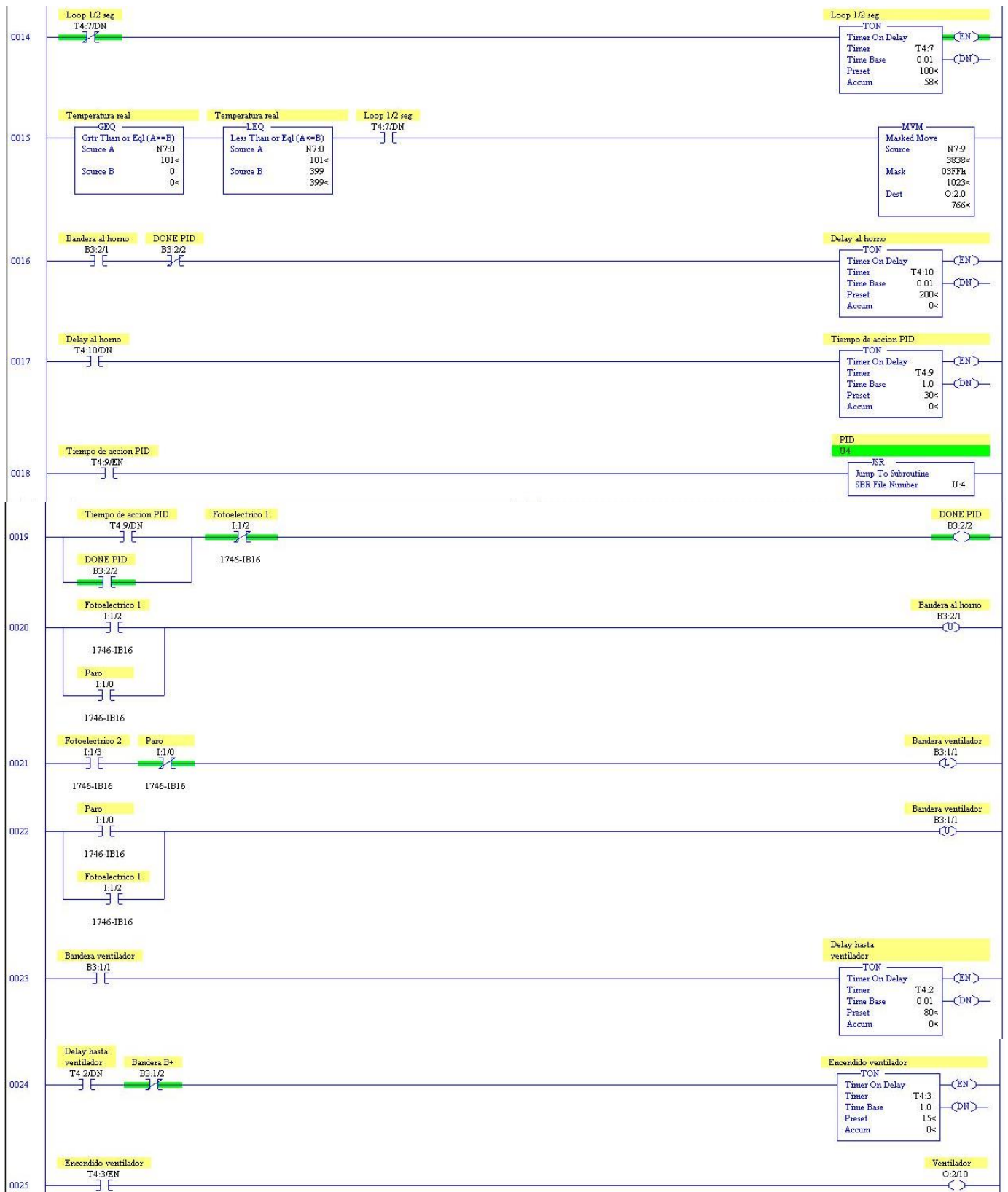
Cabe recalcar que, puesto que la temperatura máxima que se puede manejar es de 200 °C, solo se requieren de tres despliegues de 7 segmentos para mostrar la temperatura en tiempo real y actualizada constantemente y que el despliegue de 7 segmentos que muestra las centenas solo necesita dos bits de control para mostrar un 0, 1 o 2.

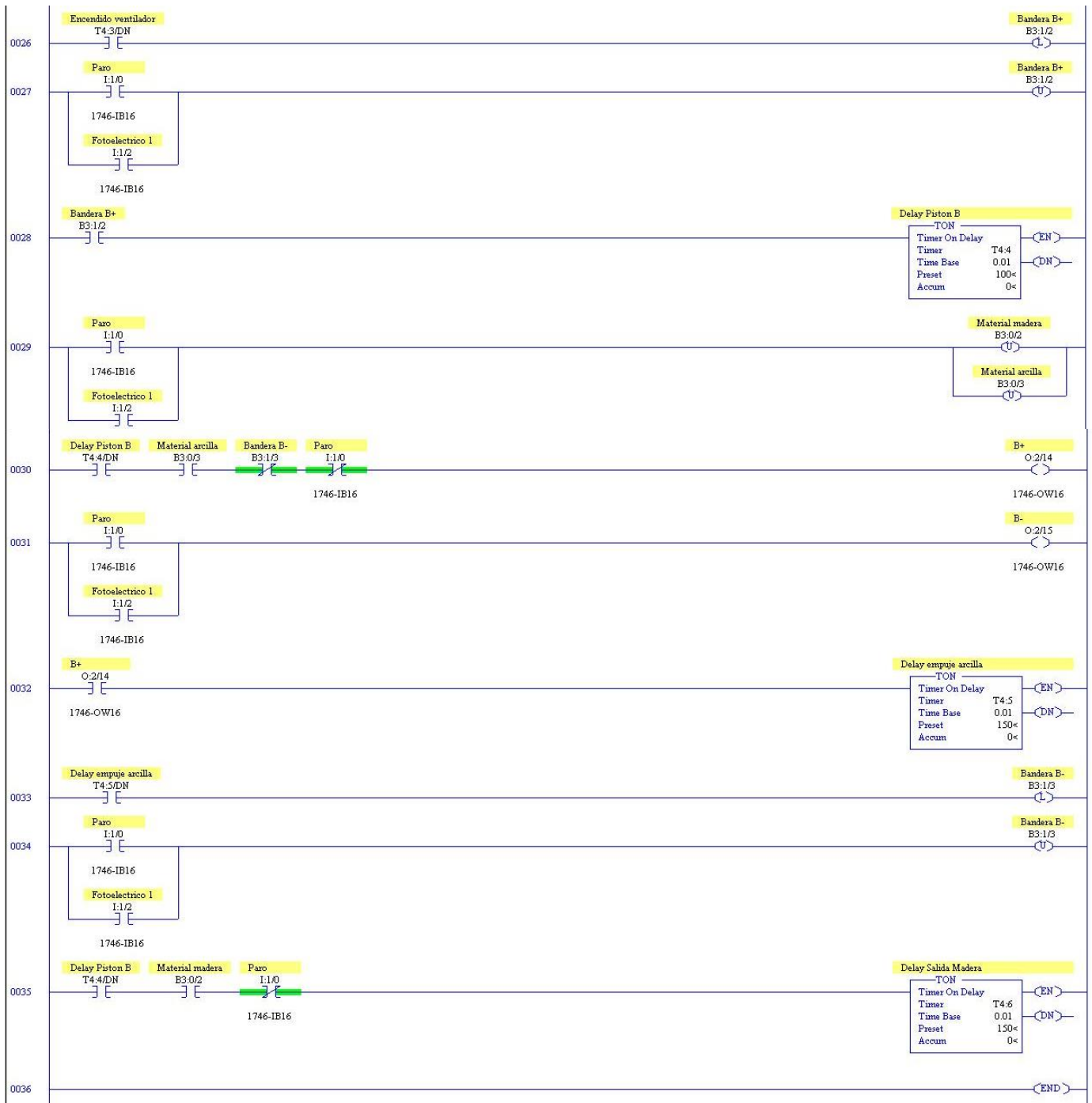
4.2.3 Programación para PLC SLC 500

Programa principal

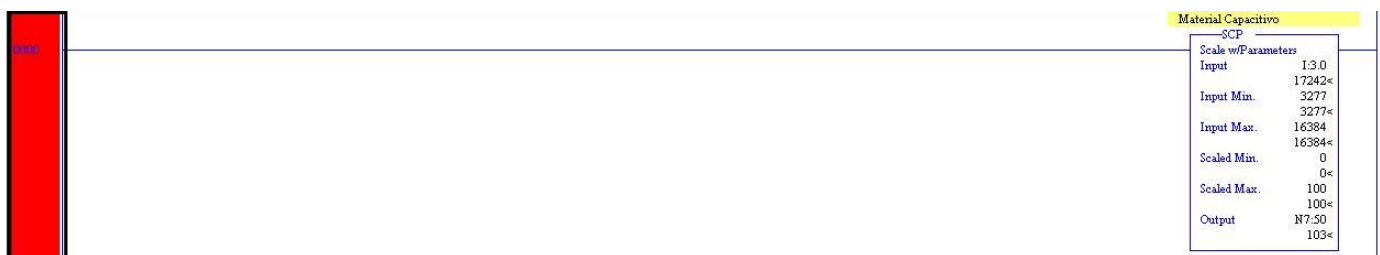


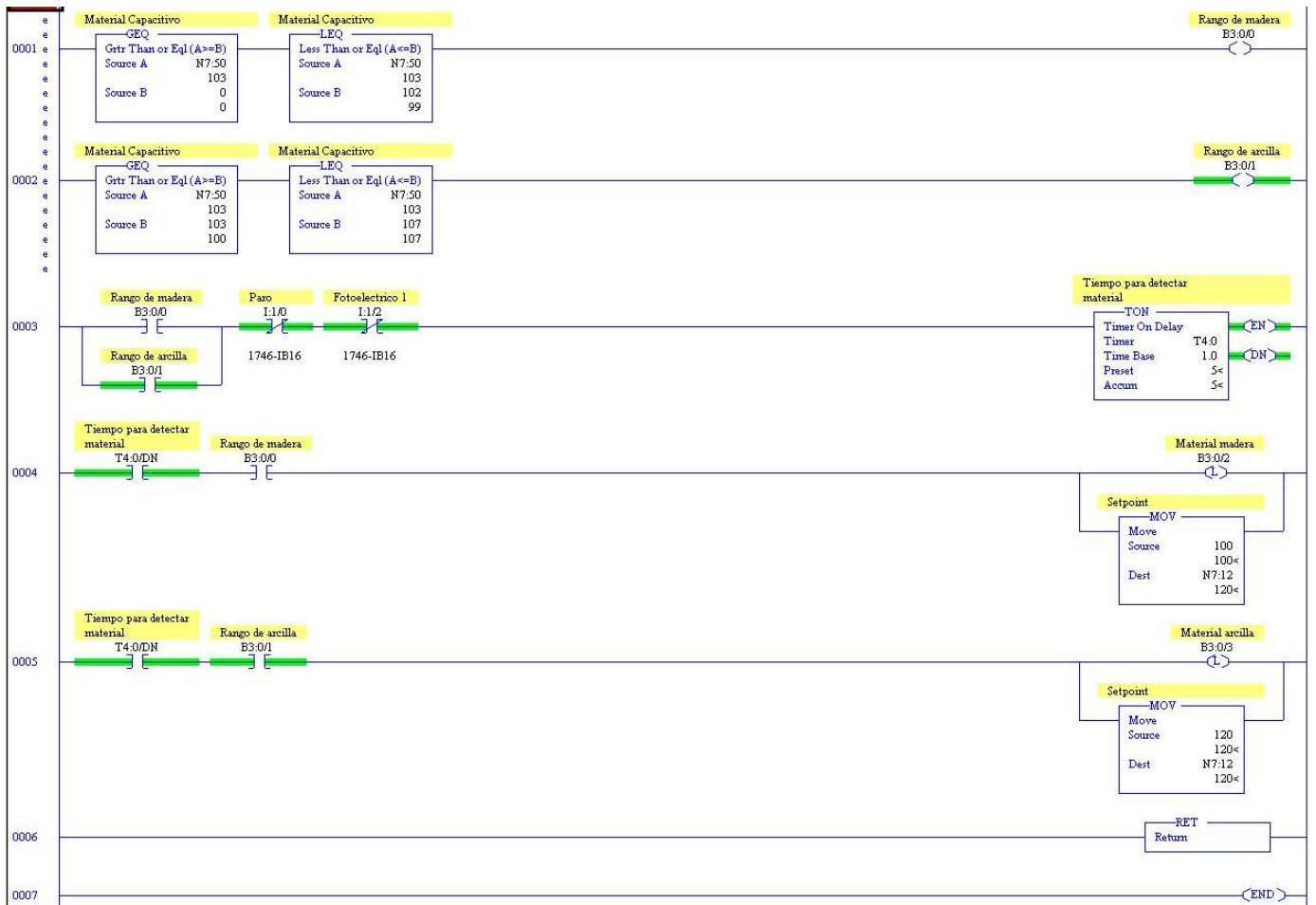






Subrutina de detección de material con sensor capacitivo U:3





Subrutina de control PID U:4





4.3 Características PLC Siemens S7-300

4.3.1 Control PID en STEP 7

En SIMATIC STEP7 se manipulan bloques para la programación de un PLC, ya sean bloques de objetos, de funciones, de datos, etc. Existe un bloque, el FB41, donde se tiene programada la instrucción PID para variables analógicas continuas. Este bloque de función requiere también de distintos parámetros para su funcionamiento pero, a diferencia del bloque en RSLogix 500, todos se escriben directamente sobre el bloque, que se encontrará en la subrutina de cálculo PID.

Para poder tener una comparación fiel entre ambos bloques de programación, también se genera una salida ON/OFF que actúe en el mismo lapso de tiempo que el definido en la experimentación con el SLC 500, es decir, en un segundo se tendrá una acción ON y una OFF de las resistencias dependiendo del valor de salida calculado con la ecuación de control PID. A diferencia del bloque en RSLogix 500, el FB41 puede mostrar directamente la proporción de tiempo de ON (de 0 a 100%) como salida del bloque, solo escribiendo un 0 en el parámetro de LMN_LLM (*Manipulated Value Low Limit*) y un 100 en LMN_HLM (*Manipulated Value High Limit*), sin tener que escalar valores digitales manualmente con otra instrucción.

La ecuación de control PID que rige este bloque es idéntica a la del PLC SLC 500. Por lo tanto, los coeficientes K_c , T_I y T_D calculados anteriormente y utilizados en RSLogix 500, se introducen idénticos en los parámetros GAIN, TI y TD del FB41, respectivamente.

Otra diferencia notable entre ambos bloques de PID es que el FB41 utiliza variables locales para su funcionamiento, contrario al PID en RSLogix 500 que requiere variables globales que después el usuario no puede modificar en su totalidad o haría fallar a esta

instrucción. El FB41 no reserva espacio de memoria global y se debe programar necesaria y obligatoriamente en una subrutina de interrupción que asegure que el tiempo de muestreo es el mismo en todo momento, contrario el bloque PID en RSLogix 500.

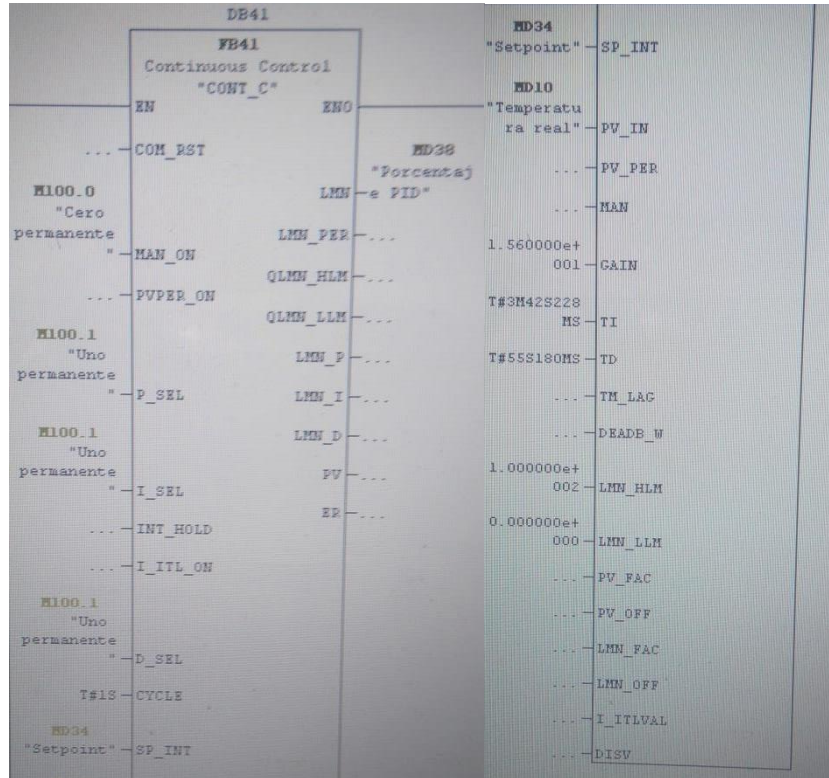


Imagen 39. Instrucción PID en STEP7

Aunque el FB41 tiene muchos parámetros de entrada y señales de salida, no todos los campos son utilizados. En resumen, se deben introducir los coeficientes del controlador PID ($GAIN = 15.6$, $TI = 222.228$ y $TD = 55.18$), desactivar el modo manual (MAN_ON), declarar la variable a controlar (PV_IN) y el *Setpoint* (SP_INT), así como los límites de escalamiento de la salida a 0 y 100 (LMN_HLM y LHN_LLM) y el tiempo de muestreo a 1 segundo ($CYCLE$).

Cabe mencionar que el FB41 tiene parámetros para encender o apagar la acción P, I o D del controlador, es decir, se puede manipular como un controlador P, I, D, PD o PI con solo declararlo en las entradas del bloque, así como utilizar un controlador PID donde se enciendan o apaguen ciertas acciones correctivas dependiendo de lo que busque el programador. Esto es muy útil para eliminar el efecto *Windup* producido por el término

integral, al solo activar la esta acción cuando se encuentre cerca la variable a controlar del *Setpoint*.

Sin embargo, puesto que el RSLogix no ofreció esta facilidad y se requiere una comparación del control con igualdad de circunstancias, no se manipularán estos parámetros del FB41.

4.3.2 Distribución de entradas y salidas

El PLC S7-300 es, al igual que el SLC 500 de tipo modular. Cada módulo se debe declarar antes de iniciar la programación, así como el elemento Rack-300, que representa el riel sobre el cual está montado este PLC.

Para el S7-300, el *SLOT 1* es el CPU del PLC, el cual está dentro del apartado de CPU-300, bajo el nombre de CPU 315F-2 DP. Posteriormente, se declara la fuente de poder PS 307 5A, que se encuentra dentro del menú de PS-300, en el *SLOT 2*. El siguiente *SLOT* está reservado para las comunicaciones del PLC, así que no se declara nada sobre él. En el *SLOT 4*, se determina el módulos de entradas y salidas discretas: En el menú de SM-300 se busca el módulo SM 323 DI/DO 16xDC24V. Este módulo cuenta con 16 entradas discretas tipo *sink* a 24 VDC y 16 salidas discretas a transistor, por lo que solo puede circular VDC a través de ellas. Para el *SLOT 5* y 6, se declaran los módulos de entradas y salidas analógicas, respectivamente. Estos son el SM 331 AI 8x16 BIT y el SM 332 AO 8 X 16 BIT.

Físicamente, todas las entradas comparten el mismo común, teniendo un voltaje de 24 V entre cada entrada con el común. Las entradas analógicas se dividen en dos partes: dos canales para medición de corriente para sensores de 4 hilos (o 2 hilos si se interconectan algunos bornes) y 6 canales para medición de VDC. Al igual que el SLC 500, los valores máximos recomendados son de 20 mA o 10 V, aunque estos módulos pueden soportar en pico hasta 32 mA o 13.3 V.



Imagen 40. Entradas analógicas y discretas del PLC S7-300

Las salidas discretas del S7-300 son a transistor, por lo que cuando se activa una salida, se tiene una diferencia de potencial de 24 V entre cada salida activada con el común. Este voltaje no se puede conectar directamente a nuestro circuito electrónico tal como se hizo con el SLC 500, se requerirá de utilizar dos bancos de relevadores externos que se activen con 24 VDC.

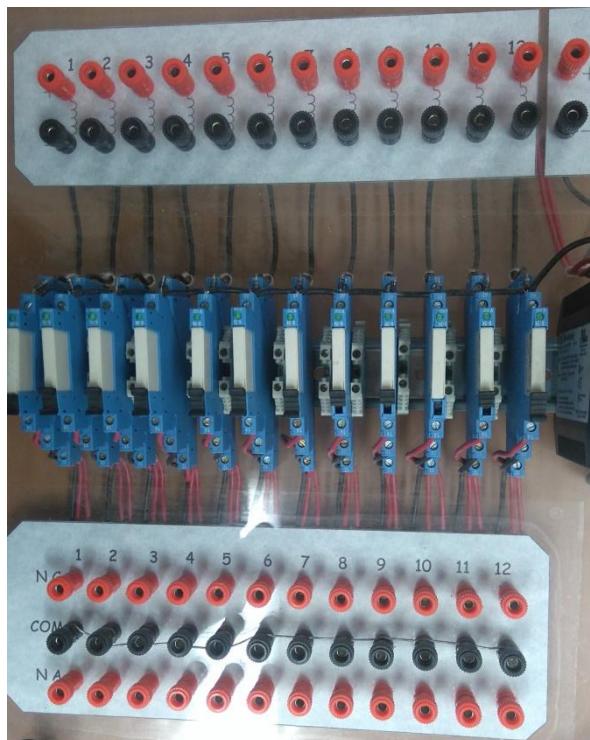


Imagen 41. Banco de relevadores

4.3.3 Programación para PLC S7-300

Mientras que el PLC SLC 500 tiene palabras de 16 bits en sus registros internos, el S7-300 maneja registros de 8 bits, así que se cambia un poco la programación con respecto al primero aunque se utilice lenguaje escalera en ambos PLC.

Puesto que es el mismo modelo físico de pruebas para los dos PLC, se elige reutilizar los símbolos y las descripciones mostrados en la tabla de entradas y salidas descrita en el apartado del PLC SLC 500; con la diferencia de que su ubicación será diferente en el S7-300, debido a que su tamaño de registro es menor que al del SLC 500. Por lo tanto, la tabla de entradas y salidas, definidas en el programa STEP7, es:

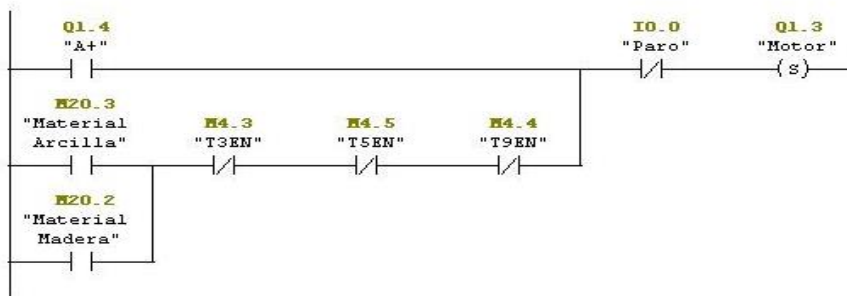
	Status	Symbol	Address	Data type	Comment
1		Paro	I 0.0	BOOL	
2		Arranque	I 0.1	BOOL	
3		Fotoelectronico 1	I 0.2	BOOL	
4		Fotoelectronico 2	I 0.3	BOOL	
5		u0	Q 0.0	BOOL	
6		u1	Q 0.1	BOOL	
7		u2	Q 0.2	BOOL	
8		u3	Q 0.3	BOOL	
9		d0	Q 0.4	BOOL	
10		d1	Q 0.5	BOOL	
11		d2	Q 0.6	BOOL	
12		d3	Q 0.7	BOOL	
13		c0	Q 1.0	BOOL	
14		c1	Q 1.1	BOOL	
15		Ventilador	Q 1.2	BOOL	
16		Motor	Q 1.3	BOOL	
17		A+	Q 1.4	BOOL	
18		A-	Q 1.5	BOOL	
19		B+	Q 1.6	BOOL	
20		B-	Q 1.7	BOOL	
21		Capacitivo	IW 10	WORD	
22		Temperatura	IW 12	WORD	
23		Horno	QW 10	WORD	

Imagen 42. Tabla de entradas y salidas del S7-300 en STEP7

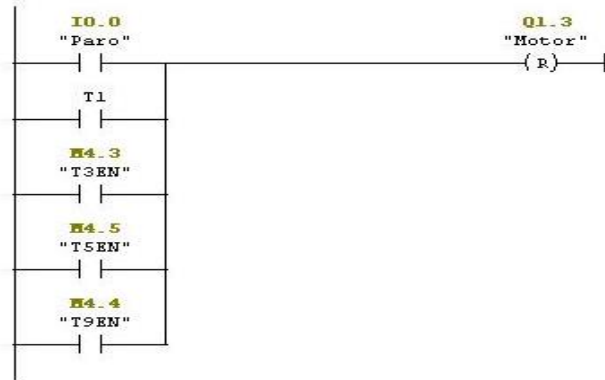
La programación utilizada en el proceso es:

Programa principal – OB1

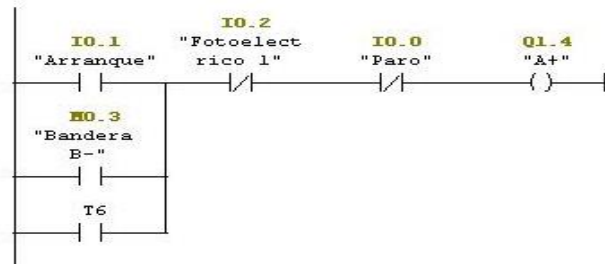
OB1 : Programa principal
Network 1 : Set Motor



Network 2: Reset Motor



Network 3: A+



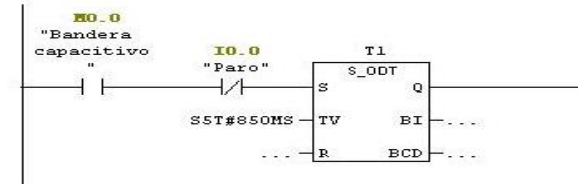
Network 4: A-



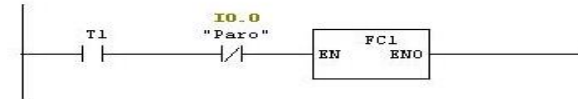
Network 5: Set Bandera capacitivo



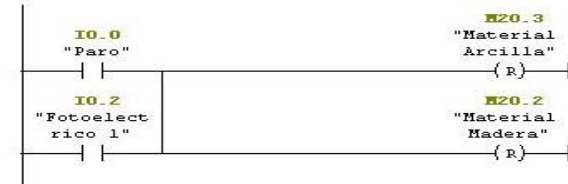
Network 6: Delay para activar subrutina capacitiva



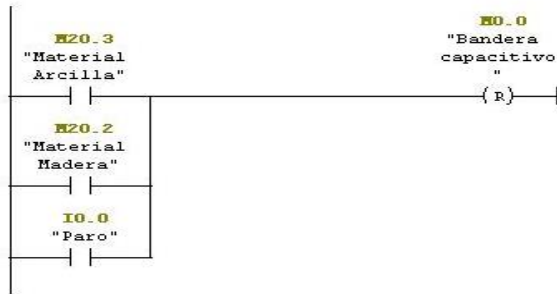
Network 7: Subrutina capacitiva FC1



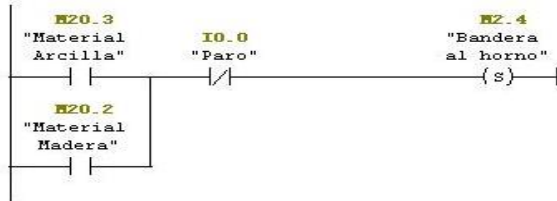
Network 8: Reset Materiales



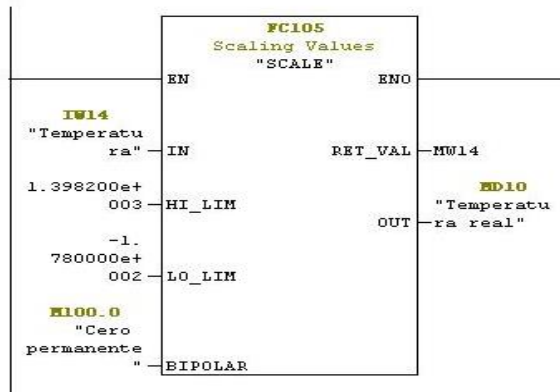
Network 9 : Reset Bandera Capacitivo



Network 10 : Set Bandera al horno



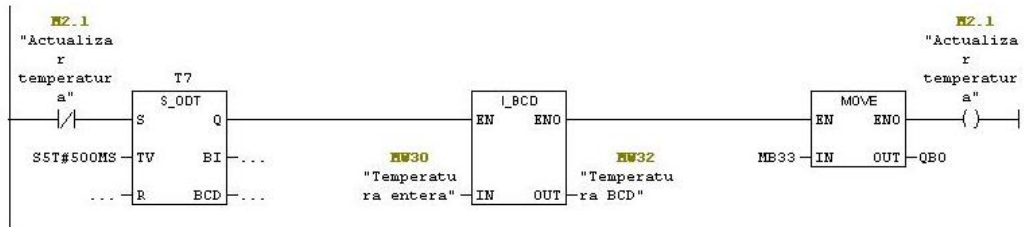
Network 11 : Escala Temperatura



Network 12 : Temperatura a BCD



Network 13 : BCD a salida



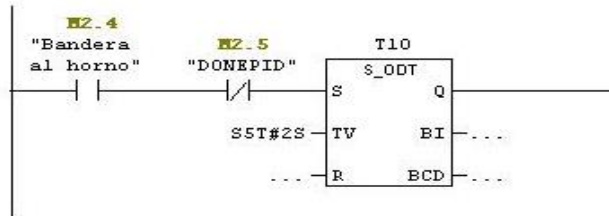
Network 14 : CO a salida



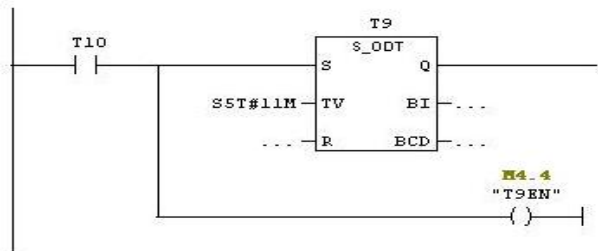
Network 15 : C1 a salida



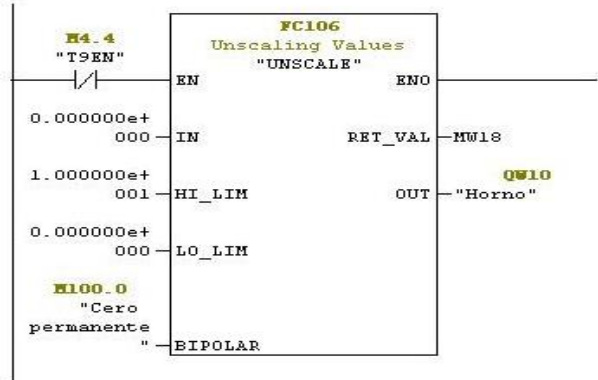
Network 16 : Delay al horno



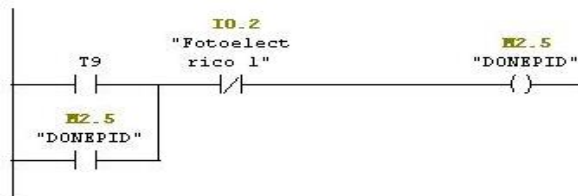
Network 17 : Accion del PID



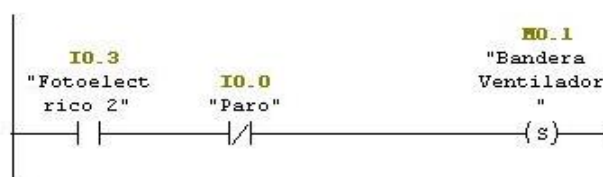
Network 18 : Apagar PID fuera de subrutina



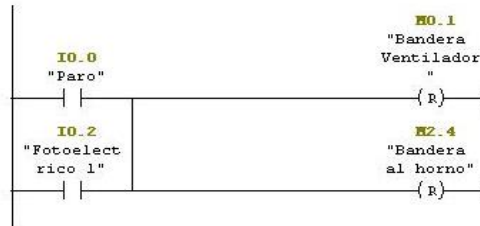
Network 19 : Termina ciclo PID



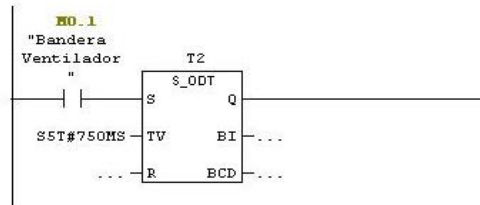
Network 20 : Set Bandera Ventilador



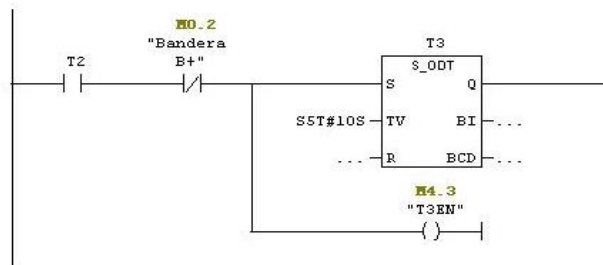
Network 21: Reset Bandera Ventilador



Network 22: Delay hasta ventilador



Network 23: Encendido ventilador



Network 24: Ventilador



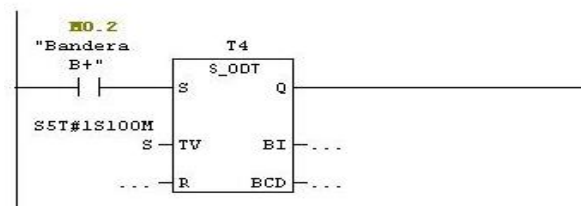
Network 25: Set Bandera ventilador



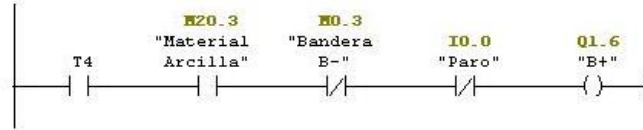
Network 26: Reset Bandera ventilador



Network 27: Delay Piston B



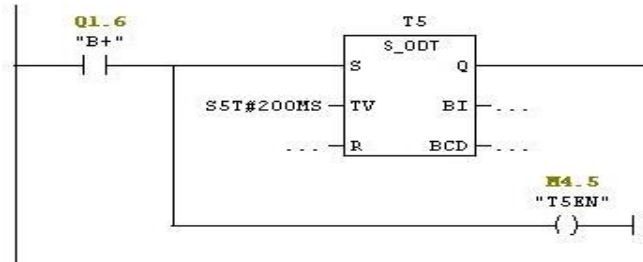
Network 28 : B+



Network 29 : B-



Network 30 : Delay salida arcilla



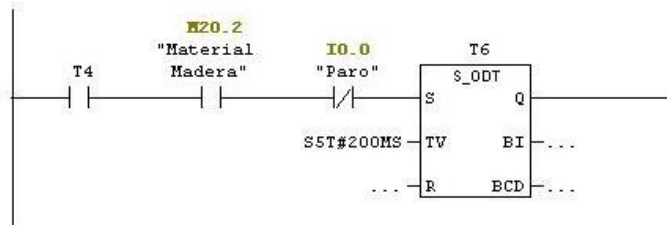
Network 31 : Set Bandera B-



Network 32 : Reset Bandera B-



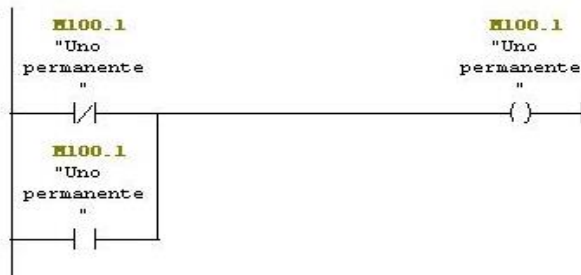
Network 33 : Delay Salida Madera



Network 34 : Cero permanente



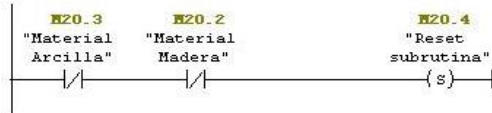
Network 35 : Uno permanente



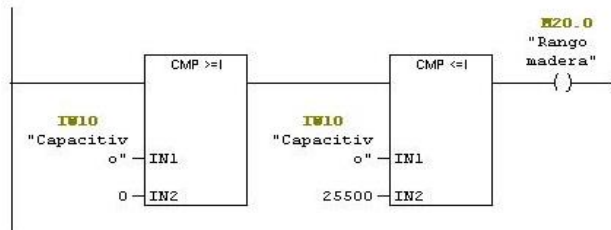
Subrutina de detección de material con sensor capacitivo – FC1

FC1 : Subrutina para identificar material

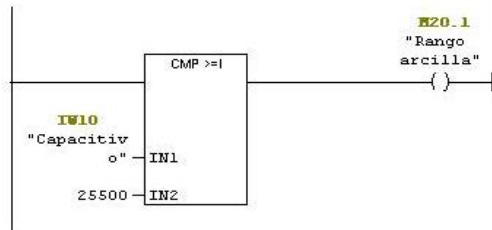
Network 1: Reinicio de subrutina



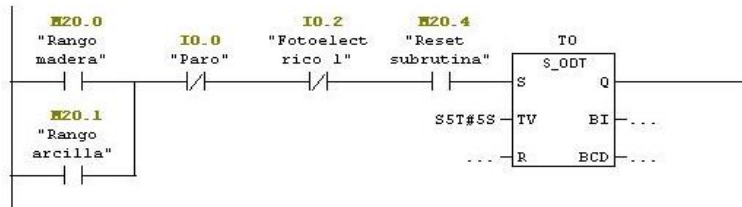
Network 2 : Rango madera



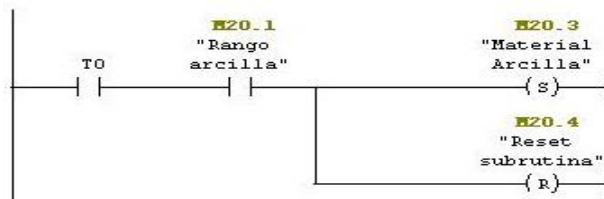
Network 3 : Rango arcilla



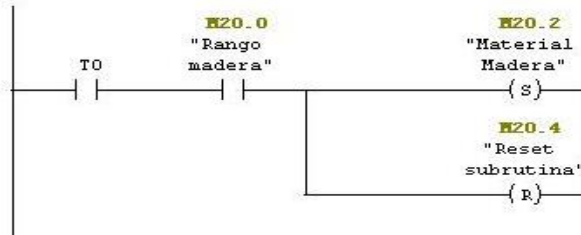
Network 4 : Delay detectar material



Network 5 : Es Arcilla



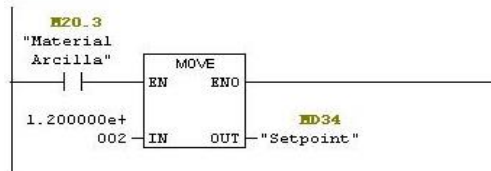
Network 6 : Es Madera



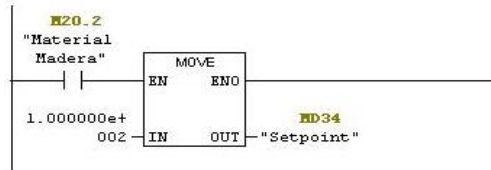
Subrutina de interrupción del control PID (se ejecuta cada 10 ms) – OB35

OB35 : Subrutina de control PID

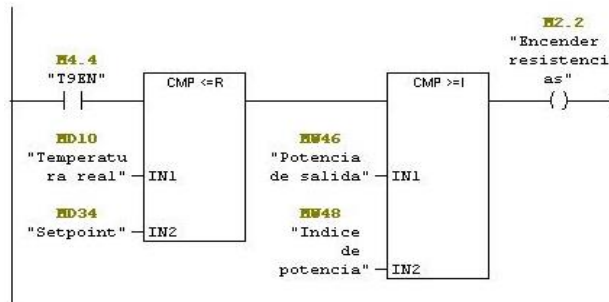
Network 1: Setpoint arcilla



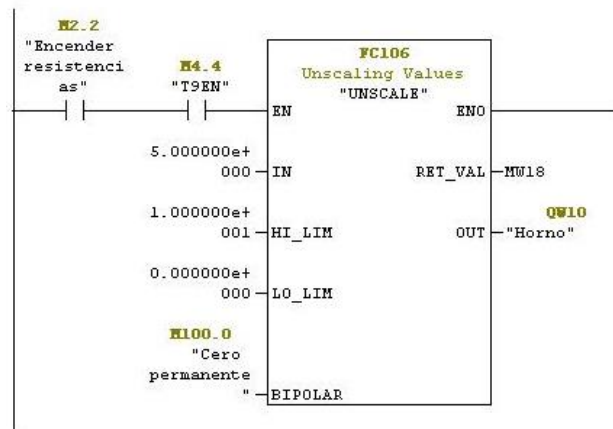
Network 2: Setpoint madera



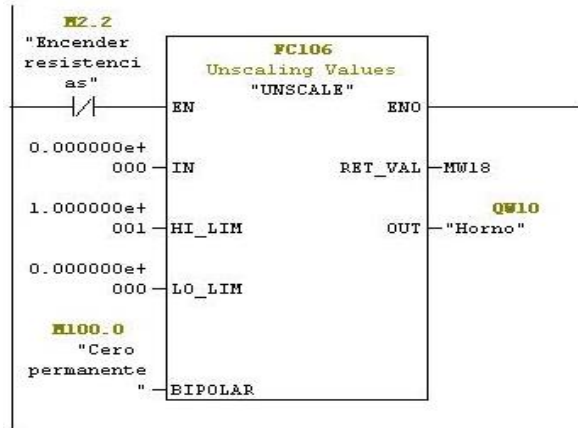
Network 3: Señal de control



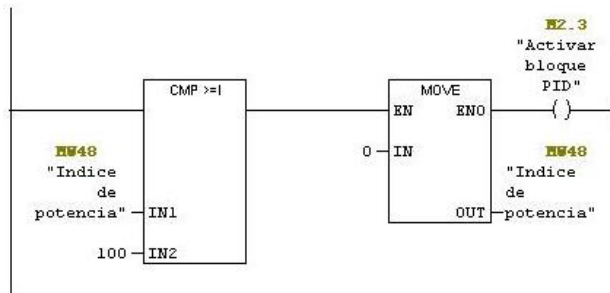
Network 4: Encendido resistencias



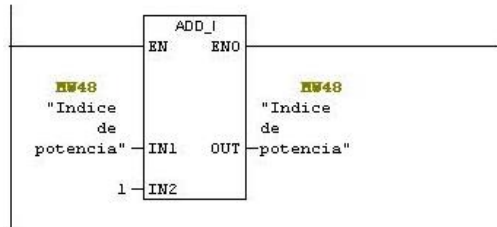
Network 5 : Apagado resistencias



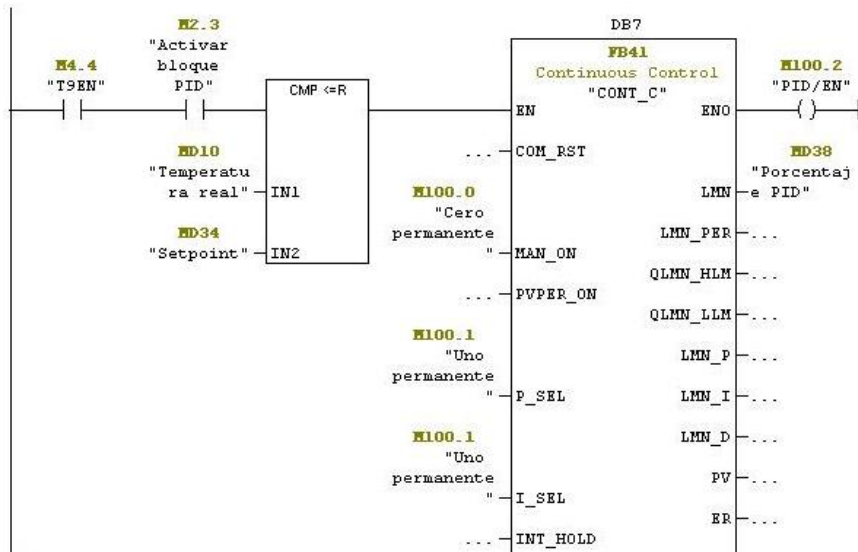
Network 6 : Reset de indice y activar PID

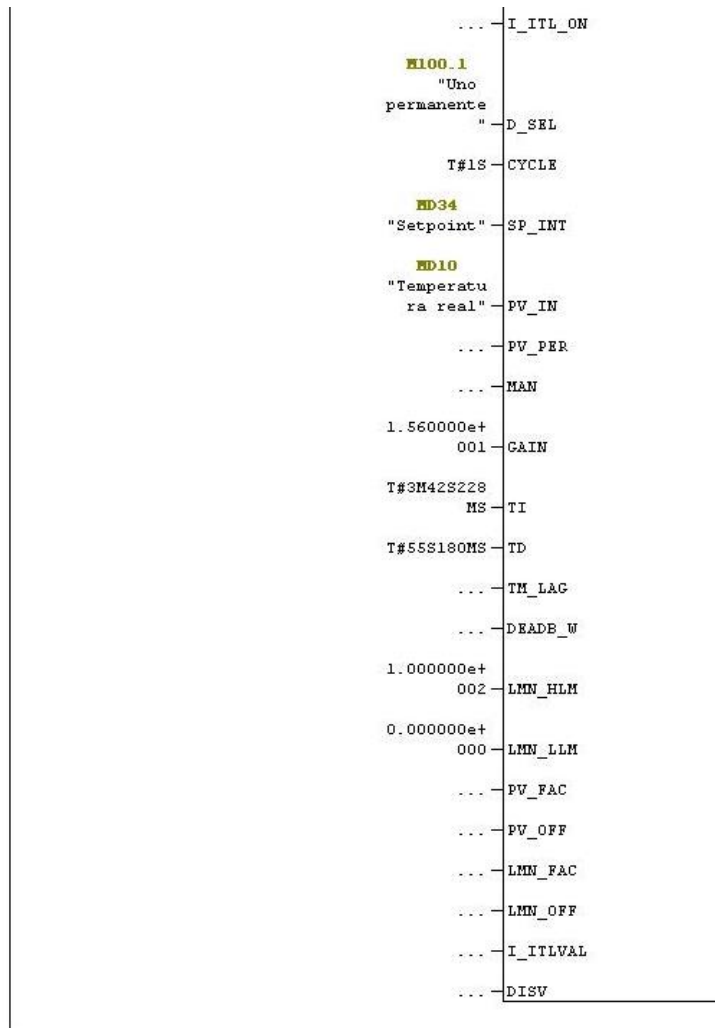


Network 7 : Aumento de indice

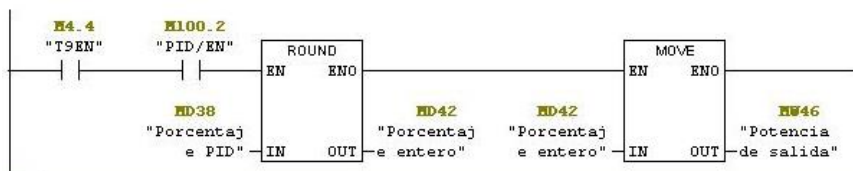


Network 8 : Calculo PID cada segundo





Network 9 : Acondicionar señal de control

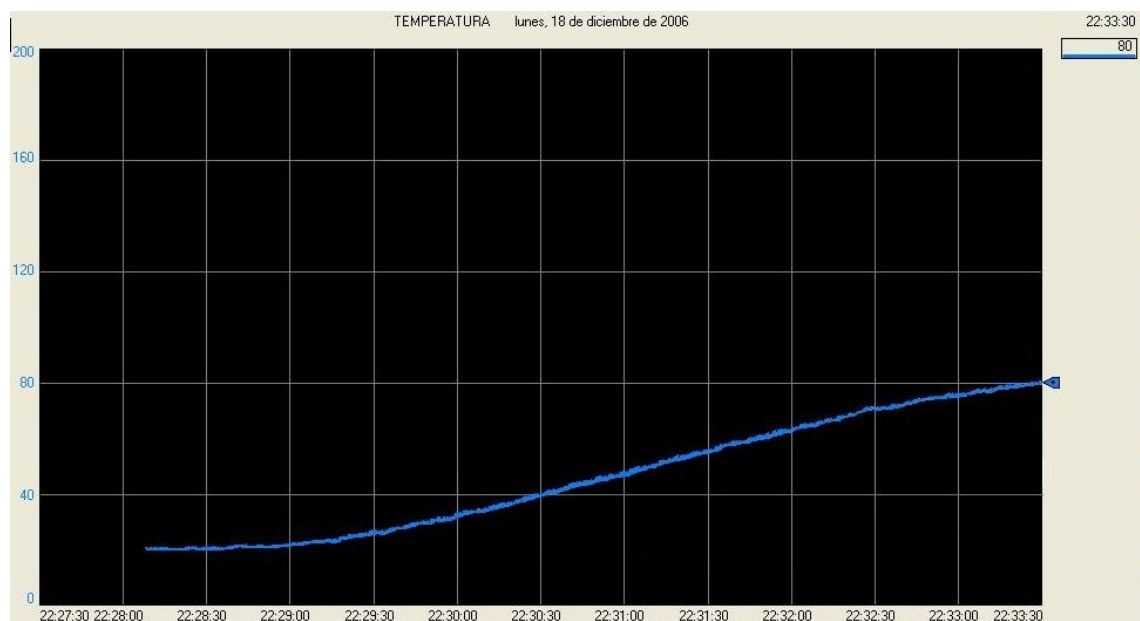


Capítulo 5

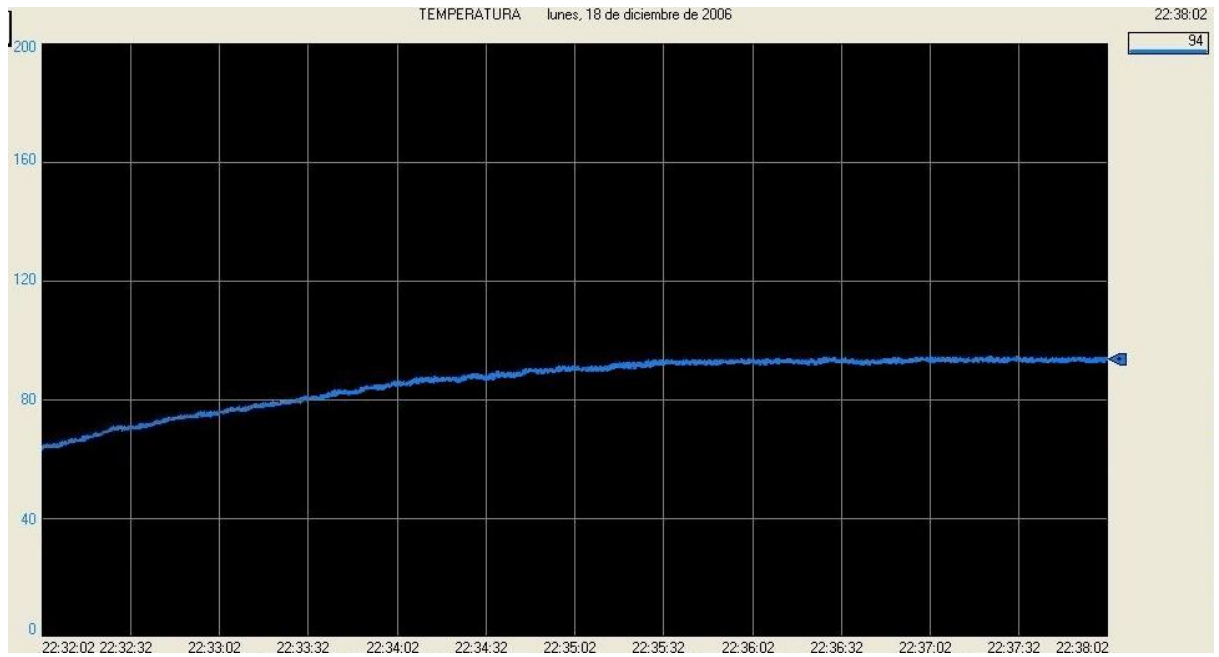
Resultados

5.1 Pruebas con PLC Allen Bradley SLC 500

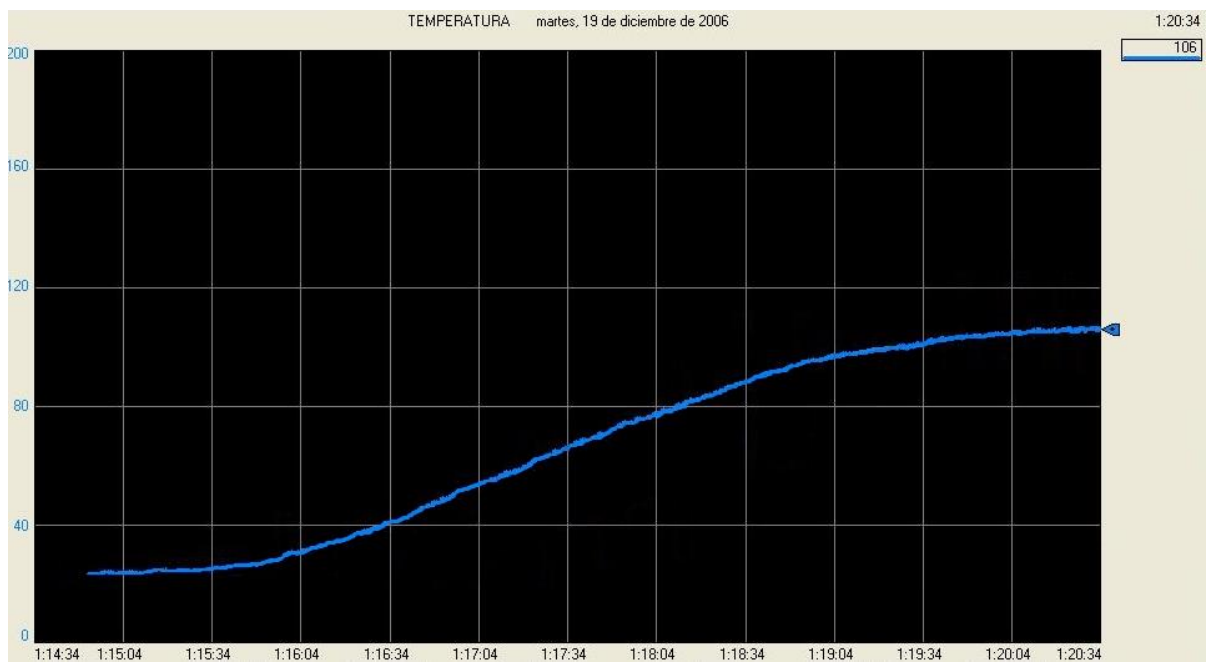
Se utilizó la función *Trend* para graficar el comportamiento de la temperatura al aplicar el control PID al proceso final, tanto para madera como arcilla.



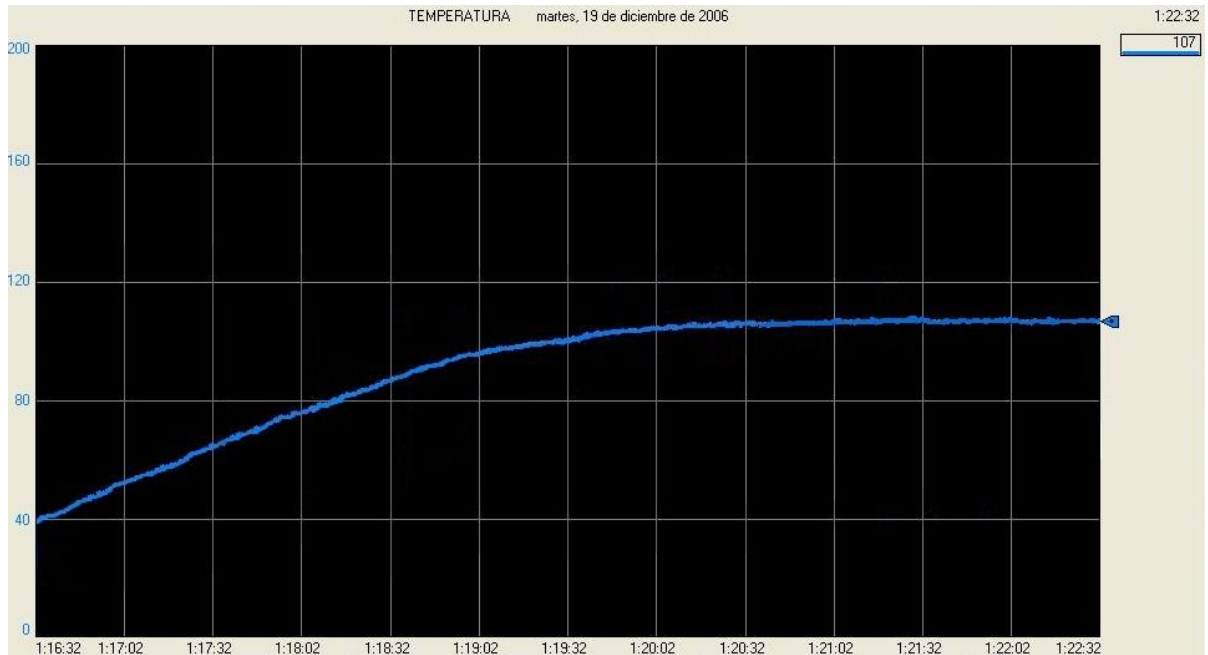
Gráfica 9. Control PID para material madera 1 – Setpoint 100 °C



Gráfica 10. Control PID para material madera 2 – Setpoint 100 °C



Gráfica 11. Control PID para material arcilla 1 – Setpoint 120 °C



Gráfica 12. Control PID para material arcilla 2 – Setpoint 120 °C

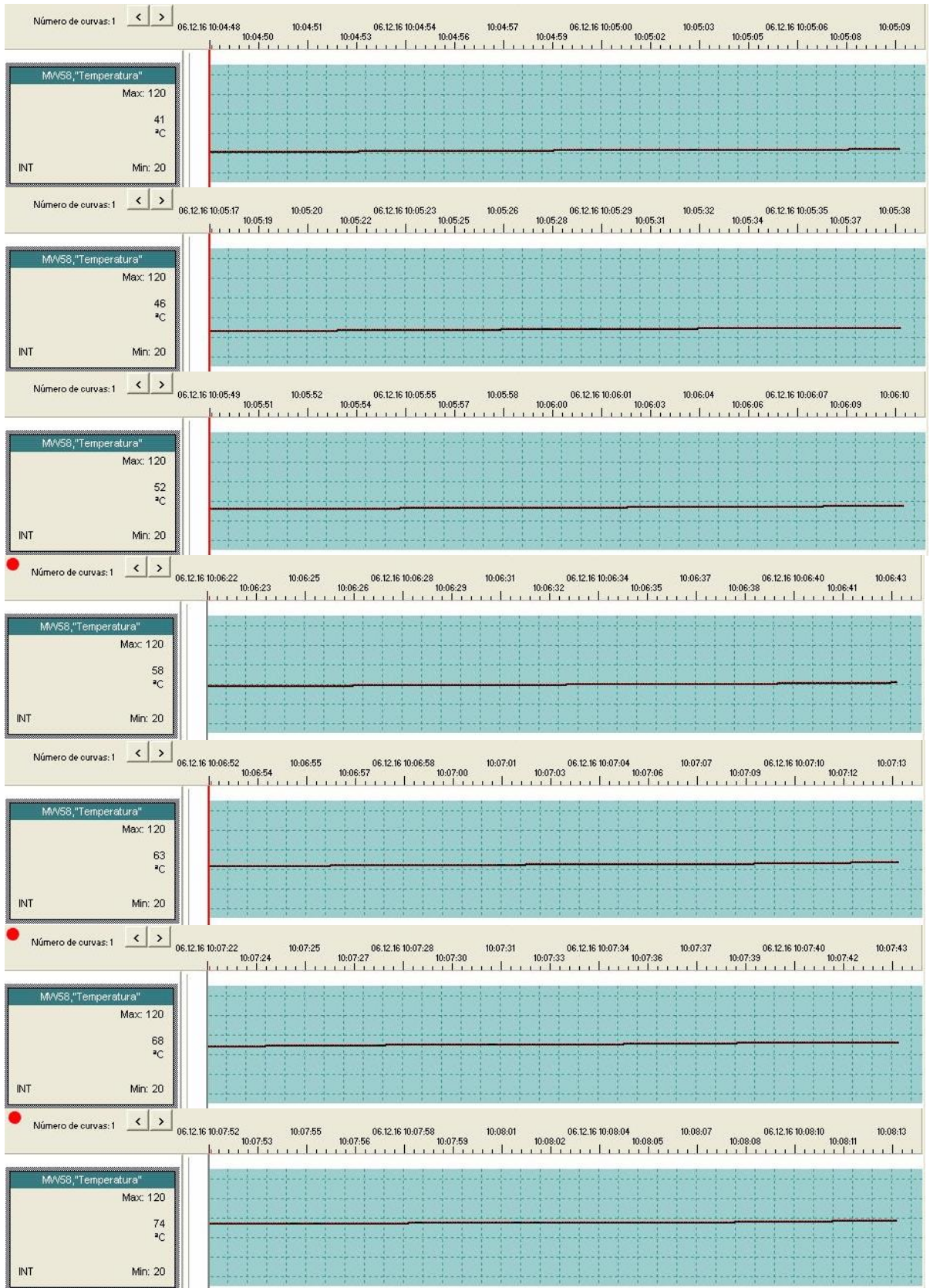
5.2 Pruebas con PLC Siemens S7-300

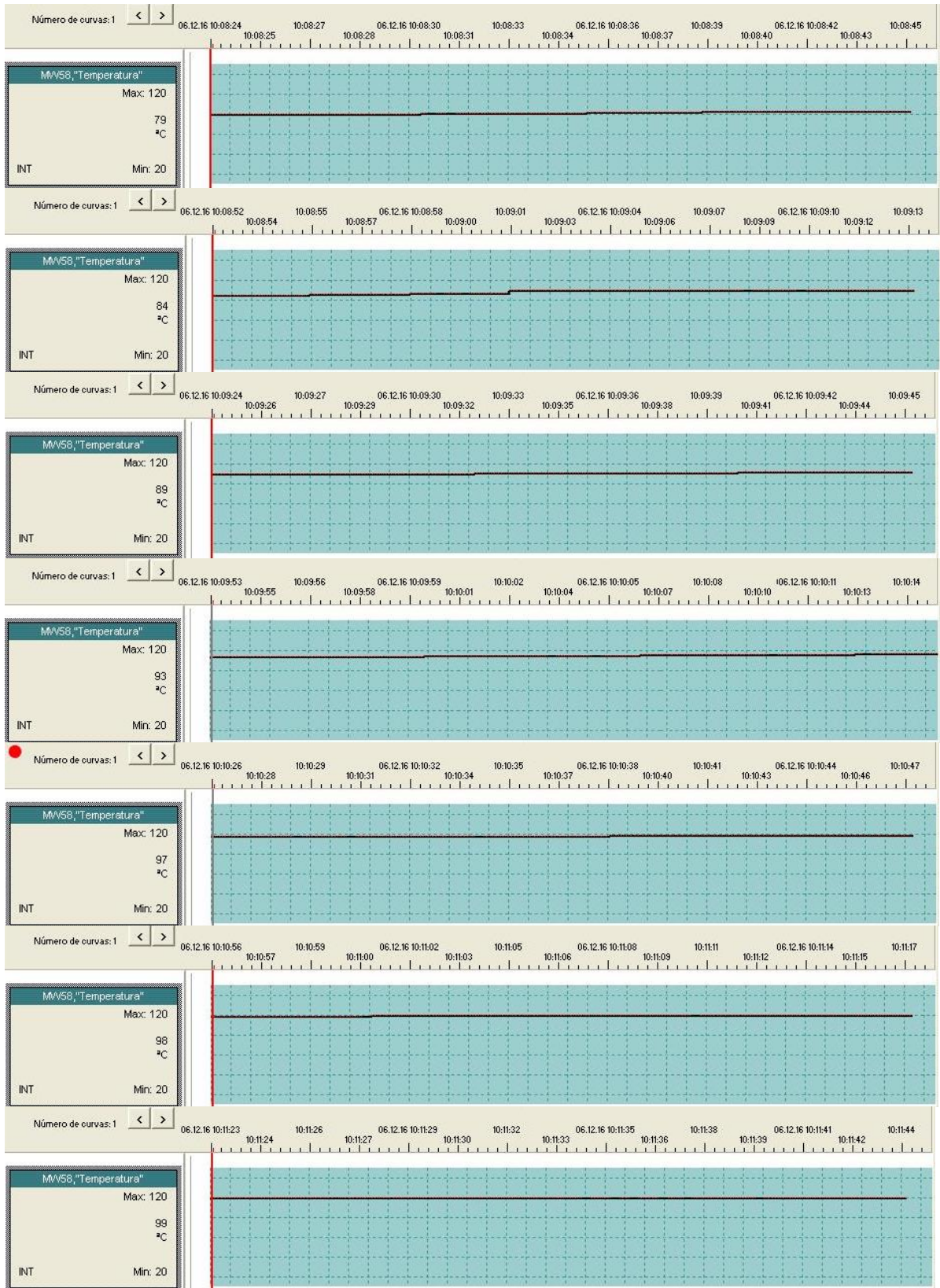
A diferencia del programa RSLogix 500, el software de programación de Siemens (STEP7) no tiene una función integrada para monitorear alguna variable o dato almacenado. Existe varios software de complemento para STEP7 que permiten realizar gráficas o histogramas de valores almacenados en el PLC, tanto en modo *online* como *offline* del PLC; sin embargo, ninguno es gratuito y se debe pagar por ellos para tener su versión completa. Algunos ejemplos de estos son PLC-Analyzer Pro 5, WinPLC-Analyzer V3 o SIMATIC WinCC Flexible RT.

Ante la imposibilidad económica de adquirir un software para graficar utilizando el PLC S7-300, se decide utilizar un software *demo* de WinPLC-Analyzer V3. En su versión de prueba, se pueden monitorear *online* variables del PLC S7-300, con la limitante de que solo puede realizarse una graficación por máximo 30 segundos, después de los cuáles se detiene el software y se debe reiniciar la graficación para volver a comenzar. Tampoco es posible almacenar las gráficas en esta versión.

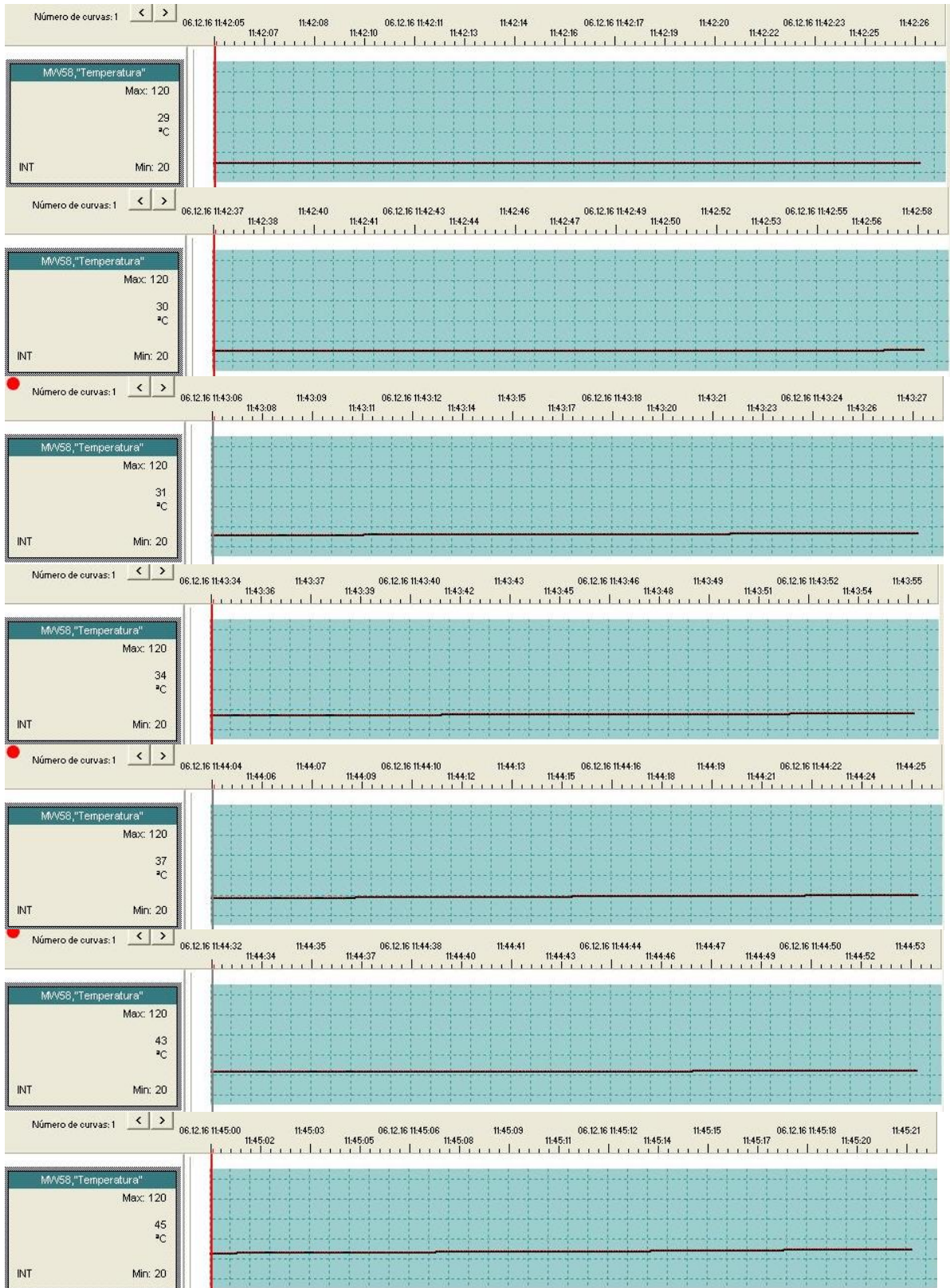
Por lo tanto, los resultados son mostrados en varias gráficas en lugar de solo una, debido a que se tuvo que reiniciar el software cada 22 segundos aproximadamente y así tener la mayor parte de los datos de temperatura por los casi 10 minutos de control PID del horno. Para tener una idea total del comportamiento de la temperatura, la escala de tiempo absoluta se encuentra en la parte superior de cada gráfica y relaciona una con otra, así como se muestra el valor de temperatura al inicio de cada lapso de medición en la parte central del cuadrado de la izquierda.

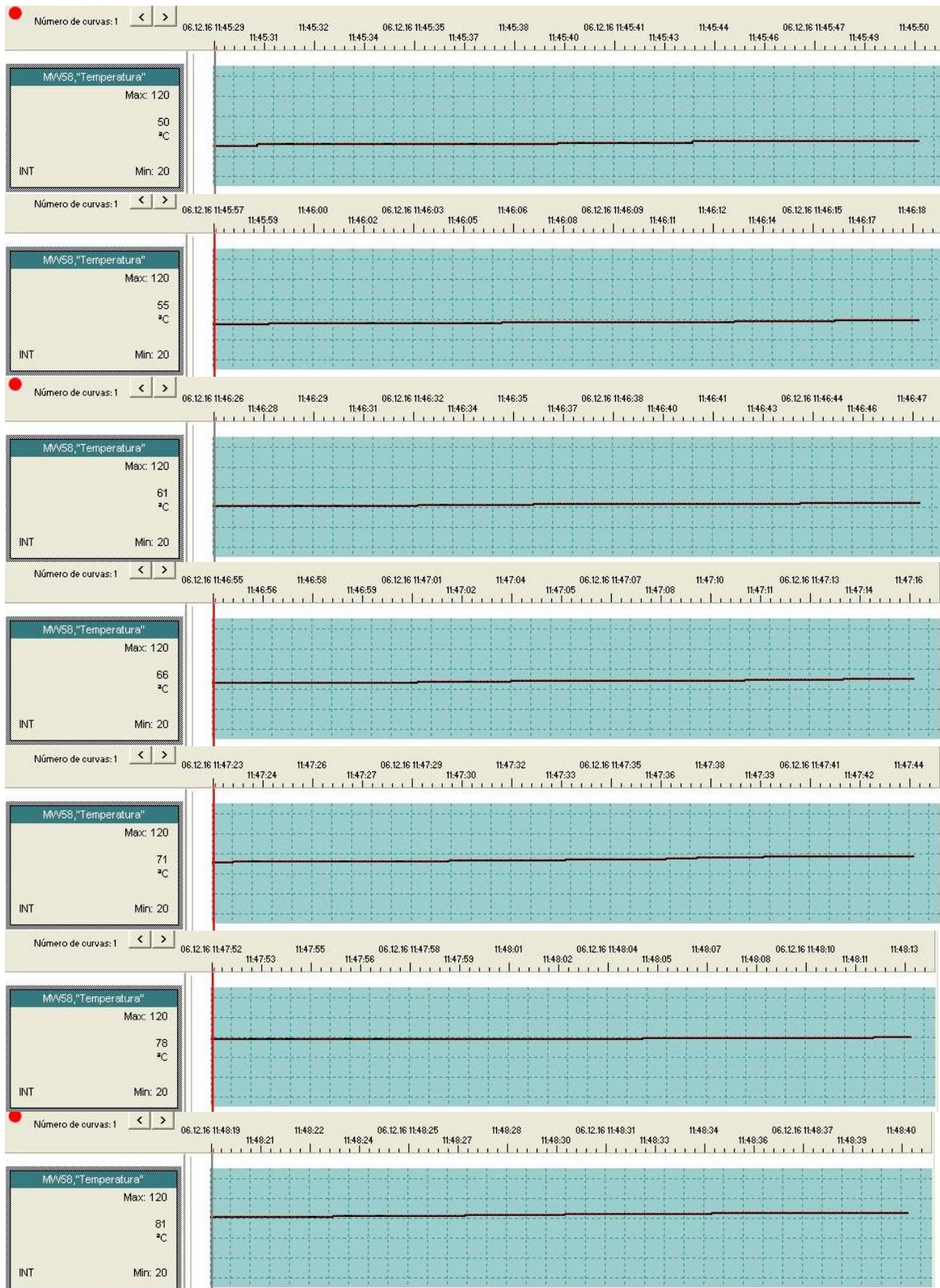


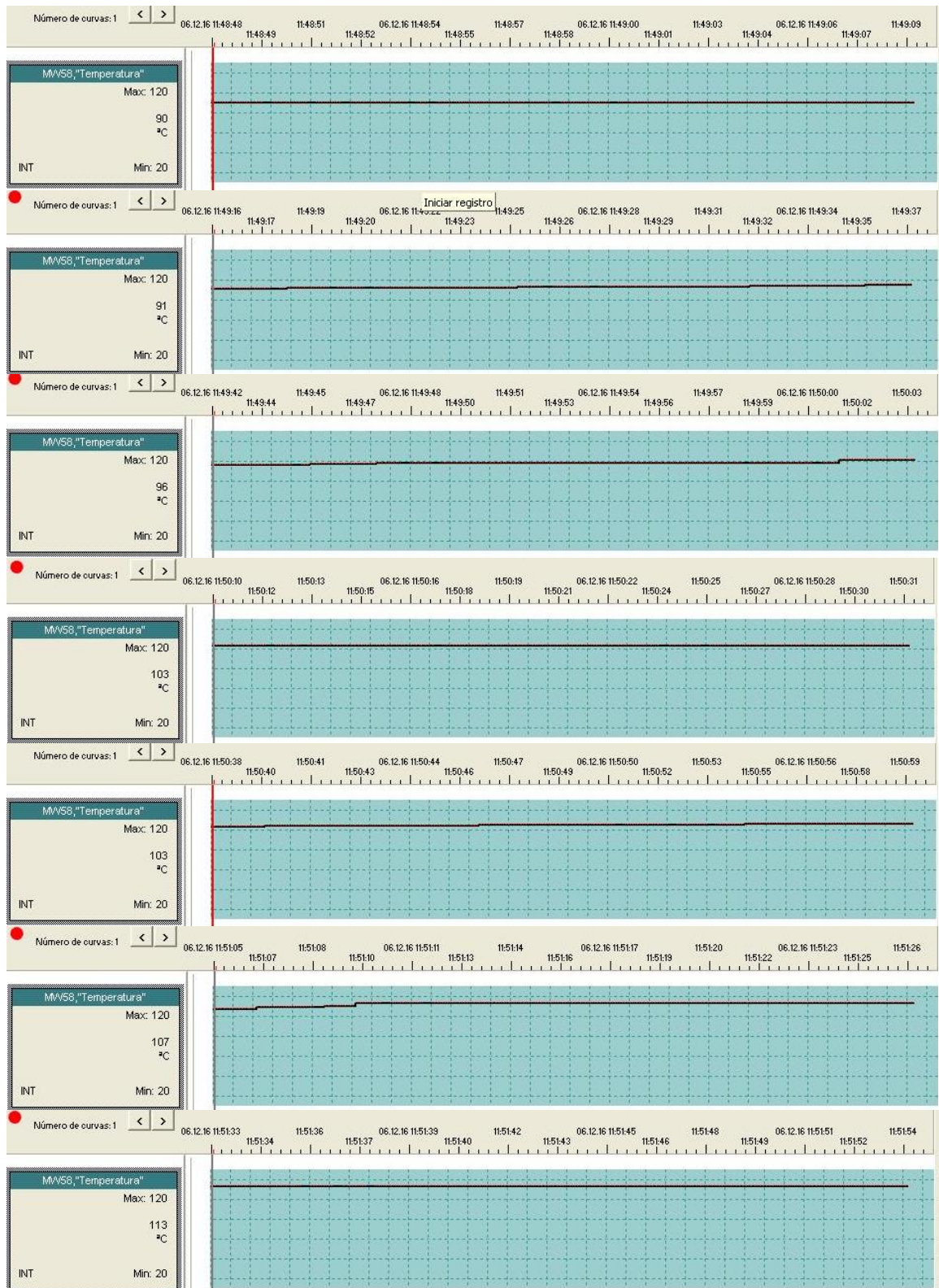




Gráficas 13. Control PID con S7-300 para material madera – Setpoint 100 °C







Gráficas 14. Control PID con S7-300 para material arcilla – Setpoint 120 °C

5.3 Comparación final de desempeño

Al tener las gráficas de temperatura resultantes del control PID para ambos PLC, se puede realizar una comparación entre el comportamiento de la temperatura del horno para la madera y para la arcilla.

Iniciando con la comparación de los resultados obtenidos para la madera, el control PID del PLC Allen-Bradley inició en 22 °C, la temperatura ambiente en ese momento, y alcanzó los 94 °C en estado permanente, lo que significa un error en estado permanente de 6 °C para un *Setpoint* de 100 °C. El tiempo de asentamiento es de aproximadamente 8 minutos y el tiempo de levantamiento (cuando se alcanzan los 67.4 °C) de este comportamiento es de poco más de 4 minutos.

Analizando la tendencia de las gráficas obtenidas al aplicar el control PID con el PLC Siemens, se tiene una temperatura ambiente de 27 °C y se llegó a una temperatura final de 99 °C, teniendo solo 1 °C de error en estado permanente. El tiempo de asentamiento es de 8 minutos y 50 segundos (el control inicia a las 10:02:10 y alcanza 99 °C a las 10:11:00) y el tiempo de levantamiento es de 5 minutos y 29 segundos (se alcanzan los 72 °C en 10:07:39).

Recordando los parámetros de diseño propuestos en el capítulo anterior, el tiempo de asentamiento propuesto fue de 9 minutos, con comportamiento sobreamortiguado y un tiempo de levantamiento de dos minutos y medio. Comparando el comportamiento de la temperatura al aplicar el control PID con el PLC SLC 500 al obtenido con el PLC S7-300, se concluye que el segundo fue mucho más fiel al desempeño ideal propuesto, teniendo solo 10 segundos de diferencia en su tiempo de asentamiento, mientras que en el SLC 500 fue de un minuto. Además, solo existe 1 °C en error en estado permanente contra 6 °C. En cuestiones del tiempo de levantamiento, ambos resultados no fueron lo suficientemente rápidos para cumplir con el valor propuesto.

Observando los resultados obtenidos con el PLC SLC 500 para la arcilla, la temperatura inicial del proceso es de 24 °C y la temperatura en estado permanente es de 107 °C. El tiempo de asentamiento es de poco más de 6 minutos y el tiempo de levantamiento es de alrededor de 3 minutos (cuando alcanza 76.3 °C).

Por otro lado, en la experimentación con el PLC S7-300 se inició con una temperatura de 29 °C y se llegó a una temperatura final de 113 °C. El tiempo de asentamiento es de 9 minutos y 24 segundos (el control inicia a las 11:42:06 y alcanza 113 °C a las 11:51:30) y el tiempo de levantamiento es de 6 minutos y 17 segundos (se alcanzan los 82 °C en 11:48:23).

Nuevamente el control PID ejercido con el PLC de Siemens es más parecido al diseñado con los parámetros propuestos: La diferencia entre el tiempo de asentamiento de diseño y el real es de 24 segundos, mucho menor al del SLC 500, y el error en estado permanente es de 7 °C contra 13 °C, pues el *Setpoint* para la arcilla es de 120 °C.

En resumen, para ambos materiales y los dos PLC utilizados, hizo falta una mayor acción de control en los primeros 2 minutos y medio del proceso para que durante ese lapso se alcanzara el 63% de los valores en estado permanente. Además, aunque fueron valores cercanos, la temperatura en estado permanente de todos los casos no fue igual a sus respectivos *Setpoint*, lo que indica una necesidad de una mayor componente integral de control. Sin embargo, para ambos materiales tuvo un mejor desempeño el PLC S7-300 que el SLC 500.

Capítulo 6

Conclusiones

El control PID continua siendo utilizado en la industria, debido a su facilidad para ser programado y entendido en comparación con muchos tipos de control, además de que un ingeniero con experiencia puede sintonizar los coeficientes PID y obtener los resultados deseados.

Debido a esto, es de gran utilidad comparar dos PLC diferentes de las dos marcas comerciales más importantes en el ramo, Siemens y Allen-Bradley, en el control PID. Para este proyecto, se utilizaron dos PLC que se tenían en el Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería, UNAM, pero se puede extrapolar esta metodología de comparación a otros PLC de las mismas marcas.

Cabe recalcar que siempre pueden existir mejoras en cualquier proceso; en este caso, se puede realizar modelo físico mucho más robusto, un horno con una mejor capacidad de concentración de calor o utilizar un método para la caracterización del mismo más completo para tener una función de transferencia más fiel.

Para comparar el PLC SLC 500 y el S7-300, se debe analizar tanto la programación del control PID como el desempeño del mismo. Puesto que el Siemens S7-300 es un PLC

más moderno que el SLC 500, es natural que aporte más características la instrucción PID en STEP7 que en RSLogix 500.

Las principales ventajas que vuelven superior la instrucción PID de STEP7 a la de RSLogix 500 es que las variables manipuladas y los coeficientes del control pueden ser valores reales con hasta tres decimales, mientras que la variable a controlar en RSLogix 500 solo puede ser un valor entero y los coeficientes solo pueden tener hasta un decimal de resolución. Además, en STEP7 se puede cambiar de un control PID a uno PI, P, I, D, etc. con solo manipular un bit de control y esto da una mayor versatilidad en el control. En RSLogix 500 se tendría que cambiar algún coeficiente PID a 0 y después regresar su valor original con una serie de instrucciones *Move*.

Además, las salidas del bloque PID en el software de Siemens puede tener como salida la señal de control en tiempo continuo o en tiempo discreto, incluso se puede conocer que peso tienen las componentes proporcional, integral o derivativa independientemente dentro del control PID. Todo esto realizado automáticamente por la instrucción, sin necesidad de agregar más líneas de programación. También, la subrutina PID en STEP7 se programa como interrupción, asegurando un tiempo de muestreo idéntico siempre.

Sin embargo, una ventaja en la programación PID en RSLogix 500 es que se tiene una pantalla de monitoreo del bloque de control independiente a la programación, permitiendo observar paralelamente lo que sucede con el control PID y con el resto de la programación. Esta pantalla nos permite también modificar en línea los coeficientes, si es que alguna componente PID no nos satisface del todo.

Por último, la función *Trend* del RSLogix 500 es muy útil para observar el comportamiento de una o varias variables de la programación respecto al tiempo y está incluida en el software de programación, a diferencia de STEP7 que no ofrece ninguna función de graficación gratuita.

En relación con el desempeño del control PID en los dos PLC, es notorio como el S7-300 tiene un comportamiento más parecido al ideal: se acerca de mejor forma a los tiempo propuestos de diseño y la temperatura en estado permanente es más cercana al *Setpoint* que la alcanzada por el SLC 500.

A pesar de esto, se nota que los objetivos de regulación y desempeño no se cumplen completamente. Esto da lugar a que los coeficientes PID utilizados puedan cambiar para mejorar la obtención de estos objetivos.

Una propuesta es aumentar el coeficiente P, pues se requiere una mayor rapidez de respuesta para los primeros minutos del control y esto acercará la temperatura final al *Setpoint*. Además, se puede aumentar también el coeficiente I, pues el coeficiente calculado resultó ser muy pequeño para poder compensar los errores al tener una temperatura real cercana a la deseada. Al coeficiente D no se recomendaría cambiar, debido a que hay pequeñas oscilaciones en las mediciones del termopar y este ruido se amplifica proporcionalmente al aumento del coeficiente D, además de que no existen caídas notorias en la temperatura durante el proceso que justifiquen modificar este valor.

Como trabajo a futuro se tiene la sintonización de los coeficientes PID con el fin de realizar más pruebas que determinen los valores exactos de estos mismos para que las respuestas sean mucho más parecidas a las deseadas. De esta forma, se puede tener mayor información de qué PLC cuenta con una instrucción PID más eficiente.

Por último, dentro de la comparación entre un PLC SLC 500 y un S7-300 para realizar un control PID de temperatura en un horno, el segundo mostró mejor desempeño, definitivamente debido a que sus tiempos de muestreo de la instrucción son constantes siempre, al encontrarse este bloque dentro de una subrutina de interrupción. Esto asegura que no importa que tan largo sea el resto del programa, el control PID siempre tendrá prioridad para ejecutarse cada determinado tiempo. Aun así, es recomendable comprar un software de graficación para STEP7, de lo contrario el monitoreo de la variable dependerá solamente de algún agente de medición externo como los despliegues de 7 segmentos utilizados en este proyecto.

Referencias

- [1] K. Marx, *El Capital*, Tomo 1, Volumen 2, p. 386, México: Grupo editorial siglo veintiuno, 2013.
- [2] F. Galiani, *Della moneta*, pp. 158, 159, 1750.
- [3] Universidad de Málaga, *Master en Ingeniería Mecatrónica* (en línea), 11/08/15, <http://www.isa.uma.es/C6/mastermecatronica/default.aspx>
- [4] N. S. Nise, *Sistemas de control para ingeniería*, pp. 12, 13, México: Compañía editorial continental, 2006.
- [5] West Instruments, *Controladores de procesos industriales* (en línea), 24/08/15, http://www.tecnoficio.com/electricidad/instrumentacion_industrial4.php
- [6] W. Bolton, *Mecatrónica*, p.467, México: Alfaomega, 2013.
- [7] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, pp. 4, 5, México: Prentice Hall, 1998.
- [8] O. Silva Barrera y J. J. Pantoja Acosta, *Diseño de secador industrial continuo a presión atmosférica con microondas*, Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [9] J. Manrique de la Cruz, *Desarrollo de un control PID wavenet*, Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [10] Agro Waste, *Secado térmico* (en línea), 28/08/15, <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/SECADO-TERMICO.pdf>
- [11] BOLFOR, *Guía para el secado de la madera en hornos* (en línea), 28/08/15, <http://ritim.org.ar/espanol/Descargas/i007.pdf>
- [12] OMEGA, *Termopares – Introducción a los termopares* (en línea), 09/09/15, <http://mx.omega.com/prodinfo/termopares.html>

- [13] *M30 Analog Output Capacitive Sensor*, BCAW030NB1Y3 Datasheet, BALLUFF
- [14] G. M. ELECTRONICA S.A., *Ventiladores para DC* (en línea), 18/09/15, http://www.gmelectronica.com.ar/catalogo/vent_dc.html
- [15] *RAS Series*, RAS-0510 Datasheet, SUN HOLD
- [16] *Amplifier Transistors NPN Silicon*, BC548B Datasheet, ON Semiconductor
- [17] CIRCUITOS ELECTRONICOS, *Sensor de infrarrojos (emisor y receptor)* (en línea), 25/09/15, <http://www.circuitoselectronicos.org/2010/05/sensor-de-infrarrojos-emisor-y-receptor.html>
- [18] *Tablas de termocuplas y Pt100*, Nota técnica 3, <http://www.arian.cl>, ARIAN
- [19] *¿Qué son y cómo funcionan las termocuplas?*, Nota técnica 2, <http://www.arian.cl>, ARIAN
- [20] *DC-Micromotors*, 2342L012CR Datasheet, Faulhaber
- [21] RONAHE, *Solución – Comercial – Resistencias para parrilla* (en línea), 09/10/15, <http://ronahe.com/comercial/resistenciasparrilla.html>
- [22] *SLC 500 Systems – Selection Guide*, Boletín 1746 y 1747, Rockwell Automation
- [23] *Elegir un Dispositivo de Medidas de Termopares* (en línea), <http://www.ni.com/white-paper/7108/es/>, National Instruments
- [24] ELECTRONICA BÁSICA Y AVANZADA, *Compensación de unión fría* (en línea), 25/08/16, <https://sites.google.com/site/electronicabasicayavanzada/home/amplificador-operacional/compensacion-union>
- [25] *Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier*, AD620 Datasheet, Analog Devices
- [26] S. Viscarra, *Guía para el secado de la madera en hornos*, Documento técnico 69/1998, p. 21, Bolivia, Agosto de 1998
- [27] K. Ogata, *Modern control engineering*, p. 230, EEUU: Prentice Hall, 2002.