

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica

Proyecto Final de Graduación.

*Implementación de un sistema de Control con interfaz de usuario para
una tostadora de café Industrial TE-5 BENDIG*

Informe de Proyecto de Graduación para Optar por el Título de
Ingeniero en Mecatrónica con Grado Académico de Licenciatura

Ubicación:

Bendig Maquinaria, Desamparados, San José, Costa Rica.

Fabricio Solórzano Díaz

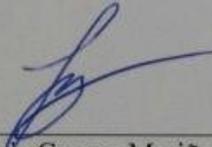
Carné: 201257424

Diciembre, 2016

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

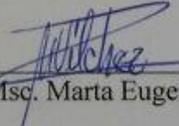
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Dr. Juan Luis Crespo Mariño

Profesor lector



Msc. Marta Eugenia Vilchez Monge

Profesor lector



Ing. Jaime Mora Meléndez

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Cartago, Diciembre 2016

Declaratoria de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 29 de agosto de 2016

Leonel Fabricio Solórzano Díaz

Ced: 2 – 0726 – 0158

Resumen

En el presente documento se presenta un proyecto de un sistema mecatrónica en el cual se automatizó una tostadora de café industrial la cual es fabricada y distribuida por la empresa BENDIG MAQUINARIA. El objetivo es diseñar un sistema de control para una tostadora de café TE-5, este sistema fue implementado en un sistema de interfaz humano máquina controlado por un HMC. También se presenta la configuración realizada para la adaptación del equipo y el interfaz creado.

Por otro lado, también se presenta la programación realizada, así como la justificación de los equipos elegidos para la implementación del control y los detalles de las modificaciones realizadas dentro del modelo de la máquina, para así poder optimizar el tostado de café.

Es importante destacar que el proyecto se realizó para la máquina TE-5 producida por la empresa Bendig Maquinaria, donde se tomó en cuenta el entorno en el cual se desempeñan las tostadoras TE-5 y cumpliendo los requerimientos solicitados por la empresa.

Palabras claves: Tostadora de café, PLC, HMI, HMC, Sensor infrarrojo, termocupla, variador de velocidad, válvula de gas.

Abstract

This document presents a project of a mechatronics system in an industrial coffee roaster which is manufactured and distributed by the company BENDIG MAQUINARIA, was automated. The objective is to design a control system for a coffee roaster TE-5, this system was implemented in a human machine interface system controlling by a human machine controller. Also presented is the configuration made for the adaptation of the equipment and the interface created.

On the other hand, the programming is presented as well as the justification of the equipment chosen for the implementation of the control and the details of the modifications made within the model of the machine, in order to optimize the coffee roasting.

It is important to note that the project was carried out for the TE-5 machine produced by the Bendig Machinery company, which took into account the environment in which the TE-5 toasters operate and fulfilling the requirements requested by the company.

Key words: Coffee roaster, PLC, HMI, HMC, Infrared sensor, thermocouple, speed variator, gas valve.

Dedicatoria

A Dios

Por haberme permitido llegar hasta este punto, haberme mantenido con salud y por su infinito amor y misericordia.

A mi madre Siria

Por ser un ejemplo constante, además de haberme llenado de esperanza y motivación en los momentos difíciles, porque ha sido una persona íntegra que me ha inculcado valores y me convirtió en un hombre de bien, pero principalmente, por su amor.

A mi padre Leonel

Por su ejemplo de perseverancia, por sus muestras de preocupación y por su amor.

A mis hermanas Fiorella y Francini

Por su compañía y empuje durante todo este tiempo, por su ejemplo de valentía, y por compartir momentos tanto de alegría como de sufrimiento.

Agradecimiento

Agradecimientos especiales a mi tutor Jaime Mora, por su ayuda durante este proceso, al profesor Juan Luis Crespo por sus consejos en las etapas críticas de mi proyecto y, por último, pero no menos importante al profesor Sergio Morales por brindarme su ayuda en las etapas de más agobio.

Gracias a la ingeniera Tatiana Bendig por ser mi mentora en la empresa BENDIG MAQUINARIA, además de brindarme hospitalidad y compartirme su conocimiento.

Gracias a todas las personas que de una u otra manera me ayudaron para poder realizar este proyecto y convertirme en una mejor persona.

¡GRACIAS!

Índice

1	Introducción.....	15
1.1	Entorno del proyecto	15
1.2	Planteamiento del problema:.....	16
1.3	Definición del Problema	17
1.3.1	Generalidades	17
1.3.2	Síntesis del problema	17
1.4	Enfoque de la solución	17
2	Objetivos del proyecto.....	19
2.1	Objetivo General:	19
2.2	Objetivos específicos	19
3	Alcance y limitaciones:.....	20
4	Marco teórico:	21
4.1	Tueste del café:.....	22
4.2	Instrumentación:.....	23
4.3	Clasificación de los sensores de temperatura:.....	23
4.3.1	Termocuplas	24
4.3.2	Termocupla K	24
4.3.3	Sensores infrarrojos.....	25
4.4	Instrumentación de control	25
4.4.1	Retroalimentación.....	25
4.4.2	Controlador	26
4.4.3	Actuador	26
4.4.4	Función de transferencia	26
4.4.5	Controlador PID.....	26

5	Ejecución de la solución.....	28
5.1	Estado de la máquina TE-5.....	28
5.2	Análisis de variables a controlar.....	30
5.2.1	Cálculo para elección del sensor.....	31
5.3	Instrumentación de control.....	37
5.4	Cronograma para la implementación del sistema de control.....	43
5.5	Configuración del sensor.....	43
5.6	Configuración del HMC.....	45
5.6.1	Incorporación de los módulos de expansión.....	46
5.7	Guía para implementación de las curvas de tueste manual y automático	50
5.8	Escalamiento de lectura del sensor a una variable ingenieril.....	51
5.9	Sistema de encendido y apagado de los motores.....	52
5.10	Configuración del sistema PID.....	54
5.10.1	Cálculos para constantes PID.....	54
5.10.2	Configuración de PID en HMC.....	60
5.11	Sistema de tueste implementado en la tostadora TE-5 y configuración del interfaz humano máquina para tueste manual.....	65
5.12	Requerimientos para la implementación del sistema de tueste manual	69
5.12.1	Diagrama de flujo para la implementación del sistema de tueste manual	71
5.13	Implementación del sistema de control para el tueste automático.....	75
5.13.1	Diagrama de flujo para la implementación de un sistema de tueste automático.....	80
6	Análisis económico.....	84
6.1	Presupuesto.....	84
6.2	Gastos incurridos.....	85

7	Proceso de validación	86
7.1	Validación.....	86
7.1.1	Colocación del dispositivo de medición adecuado.....	86
7.1.2	Prueba de sistema de control manual	87
7.1.3	Pruebas de sistema de control automático	88
7.1.4	Precio de la máquina con sistemas de control implementado	88
8	Conclusiones.....	91
9	Recomendaciones	92
10	Referencias bibliográficas	93
11	APÉNDICE A.....	95
12	APÉNDICE B.....	112

Índice de figuras

Figura 4.1 Estructura de un grano de café	21
Figura 4.3.1 Tabla representativa de los diferentes tipos de sensores para medir temperatura.....	23
Figura 4.3.1.1 Esquema de composición de cualquier Termocupla	24
Figura 5.1.1 Elementos de instrumentación de la tostadora TE-5 de Bendig Maquinaria.....	28
Figura 5.2.1 Vista frontal de la tostadora TE-5, ubicación de la Termocupla	30
Figura 5.2.2 Vista frontal con un corte E en donde se muestra el cilindro de tueste	30
Figura 5.2.1.1 Diagrama de temperatura vs calor requerido para el agua..	33
Figura 5.3.1 Diagrama de instrumentación con variables a controlar.....	42
Figura 5.5.1 Configuración del software DataTemp para el sensor infrarrojo Raytek.	44
Figura 5.6.1 Parámetros importantes en la configuración de descarga del HMC..	46
Figura 5.6.1.1 Configuración de los módulos de expansión para el módulo HMC	47
Figura 5.6.1.2 Incorporación de módulo analógico HMC7-MIO-03	48
Figura 5.6.1.3 Incorporación de módulo analógico HMC7-MIO-06. Imagen de mi autoría	49
Figura 5.8.1 Diagrama de flujo para el escalamiento de la señal electrónica, a escala de temperatura.	51
Figura 5.8.2 Diagrama escalera de temperatura escalada. Imagen de mi autoría	52
Figura 5.9.1 Diagrama general de encendido y apagado de motores.....	53
Figura 5.9.2 Representación en el sistema HMI de la lógica de encendido y apagado	54
Figura 5.10.1 Bloque PID4 utilizado para la configuración del controlador	60
Figura 5.10.1.1 Salida de voltaje del sistema de la válvula debido a una entrada escalón	55
Figura 5.10.1.2 Datos utilizados para la validación y los datos de trabajo	56

Figura 5.10.1.3 Ventana de configuración de la estimación.....	56
Figura 5.10.1.4 Función de transferencia con una exactitud del 92%.....	57
Figura 5.10.1.5 Ecuación de transferencia en tiempo discreto.....	57
Figura 5.10.1.6 Variables de compensador en adelanto obtenido	58
Figura 5.10.1.7 Lugar de las raíces de la válvula con el compensador.....	59
Figura 5.10.2.1 Bloque PID4 utilizado para la configuración del controlador	60
Figura 5.10.2.2 Parámetros necesarios para la configuración del bloque PID.....	60
Figura 5.10.2.3 Pantalla principal del HMI indicando el botón para manipular los datos PID.....	62
Figura 5.10.2.4 Pantalla para ingresar contraseña de verificación para acceder a los datos PID del controlador.....	63
Figura 5.10.2.5 Pantalla para la manipulación de parámetros PID.	64
Figura 5.11.1 Panel de control incorporado dentro de la tostadora TE-5.....	65
Figura 5.11.2 Pantalla principal del HMI indicando el botón que inicia el tueste manual	67
Figura 5.11.3 Mensaje de advertencia para tostado manual.....	67
Figura 5.12.1 Representación gráfica de los diferentes procesos por los que pasa el café a la hora de ser tostado.....	70
Figura 5.12.1.1 Diagrama de flujo con lógica de control para el sistema de tueste manual	76
Figura 5.12.1.2 Interfaz para el sistema de tueste manual.....	76
Figura 5.12.1.3 Teclado numérico decimal que permite el ingreso de la temperatura deseada en el sistema de tueste manual	76
Figura 5.12.1.4 Interfaz para el sistema de tueste manual con botón de apagar e ir al menú habilitado	76
Figura 5.13.1 Pantalla principal del HMI indicando el botón que inicia el tueste automático.....	76
Figura 5.13.2 Mensaje de advertencia para tostado automático.	77
Figura 5.13.3 Interfaz para el sistema de tueste automático con botón de tueste automático.....	78

Figura 5.13.4 Sistema de ingreso de temperaturas con sus respectivos tiempos de duración	79
Figura 5.13.1.1 Configuración para el sistema de control del sistema de tueste automático.....	70
Figura 5.13.1.2 Configuración en diagrama escalera del bloque para temperatura automática.....	72
Figura 5.13.1.3 Diagrama de tiempos para determinar la función que permite que el estado anterior active el estado siguiente	72
Figura 5.13.1.4 Representación de función de activación en diagrama escalera..	73
Figura 7.1.4.1 Cotización de una tostadora de 5 kilogramos por bache con sistema de control equivalente a la tostadora TE-5.....	79
Figura 7.1.4.2 Tostadora Diedrich IR-5 distribuida en Costa Rica.....	80

Índice de Tablas

Tabla 5.3.1 Elementos dentro de la tostadora TE-5 de Bendig Maquinaria, con su respectiva función dentro del proceso.....	38
Tabla 5.3.2 Elementos dentro de la tostadora TE-5 de Bendig Maquinaria, con su respectiva función dentro del proceso.....	39
Tabla 5.3.3 Equipo elegido para la instrumentación y dispositivos de control con sus respectivos pecios.....	41
Tabla 5.5.1 Valores destacados en la configuración del sensor infrarrojo Raytek	44
Tabla 5.10.2.1: Parámetros elegidos para la configuración del bloque de control PID4 implementado en el proyecto Implementación de un sistema de Control con interfaz de usuario para una tostadora de café Industrial TE-5 BENDIG	61
Tabla 6.1.1 Presupuesto asignado para el desarrollo del proyecto: Implementación de un sistema de Control con interfaz de usuario para una tostadora de café Industrial TE-5 BENDIG.....	84
Tabla 6.2.1 Gastos incurridos en el desarrollo del proyecto: Implementación de un sistema de Control con interfaz de usuario para una tostadora de café Industrial TE-5 BENDIG.....	85

1 Introducción

1.1 Entorno del proyecto

El estudiante de ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Fabricio Solórzano Díaz, carné 201257424, tuvo a cargo la supervisión y desarrollo del proyecto, mismo que se desarrolló con los recursos empresariales, intelectuales, legales y económicos de la empresa Bendig Maquinaria.

El desarrollo del proyecto se realizó bajo la supervisión de un equipo multidisciplinario de profesores del Instituto Tecnológico de Costa Rica, para la obtención del grado de licenciatura en la carrera de ingeniería mecatrónica.

Bendig Maquinaria es una empresa dedicada al desarrollo de soluciones ingenieriles en el campo del desarrollo de maquinaria para el equipo de café. El proyecto nació con el déficit en la empresa en el campo de control, y a la necesidad de innovación en la empresa, además de las exigencias de los clientes de incorporar interfaces más amigables con el usuario.

El proyecto fue financiado en su totalidad por la empresa Bendig Maquinaria y por derecho de confiabilidad ningún dato perteneciente a la empresa ha sido revelado, así como todo lo desarrollado dentro de la empresa es propiedad de la misma y podrá emplearlos bajo su conveniencia.

Bendig Maquinaria S.A. es una empresa especializada en el campo de la Metalmecánica. El presidente de la compañía es el Ing. Rodolfo Bendig González, quien funge como Gerente General. Bendig cuenta con más de 50 años de permanencia y presencia en el mercado nacional e internacional en el área de diseño, fabricación e instalación de equipos para el procesamiento del café y maquinaria industrial, convirtiendo a BENDIG en pionero y uno de los líderes latinoamericanos en el mercado mundial de la industria del café.

1.2 Planteamiento del problema:

Costa Rica es un país ubicado en Centro América, con una extensión territorial aproximada de 54 000 kilómetros cuadrados, y con un ingreso medio anual reportado para el 2016 de US\$ 2.232 (El Financiero, 2016).

Costa Rica en sus inicios como república independiente tuvo una gran tendencia hacia la economía agroexportadora, y en la actualidad si bien es cierto, la economía es más variante y no sólo dependemos de un modelo de riqueza agroexportador, las finanzas agrícolas repercuten de manera positiva a nuestro país. Para el año 2014 se estimaba que en el país existía una extensión de fincas agropecuarias de 2 406 418.4 ha, y de esa cantidad, 84 133.1 correspondían al cultivo del café; es decir, el 3.5%. (Instituto del café de Costa Rica, 2014).

Debido a esto es que varias empresas se han dedicado al procesamiento y producción del café. Con estas empresas nacieron las necesidades de las compañías cafetaleras en aumentar la producción sin descuidar la calidad; es por esto se desarrollaron industrias capacitadas en la fabricación de maquinaria para el procesado y elaboración del grano dorado. Basándose en esa premisa, es que nació la compañía nacional: Bendig Maquinaria en donde a muy groso modo, se dedican a la realización de equipo para el trato del café.

Debido al crecimiento de la competencia entre los productores de máquinas para los beneficios del café, es que Bendig maquinaria decidió implementar un sistema automático en el tueste, en donde se reduzcan las labores del tostador encargado de buscar un punto adecuado para el café, el sistema que se implementó permite competir con empresas que ya habían invertido en la implementación de la tecnología en sus tostadoras. La solución que se realizó incluye un interfaz humano máquina, y además permite controlar las variables de caudal del gas y la temperatura de tueste.

1.3 Definición del Problema

1.3.1 Generalidades

Al velar por la calidad del producto y de la productividad es que en Bendig Maquinaria decidió invertir en sistemas de control automatizados en el que sus productos eliminen la necesidad de operarios para el ajuste de la curva de tueste deseada, y disminuir los riesgos de variabilidad en el tueste del café que se podrían provocar debido al factor humano. Debido a estos detalles y al incremento de la tecnología es que los consumidores requieren de máquinas más autónomas, así mismo como incorporarle un sistema digital en el cual el operario pueda interactuar con la máquina e integrarle un sistema de curvas de tueste previamente calibradas.

1.3.2 Síntesis del problema

Diseñar un sistema de control para una máquina tostadora de café TE-5 BENDIG, tal que la máquina pueda replicar curvas de tueste de manera autónoma.

1.4 Enfoque de la solución

- Debido a que Bendig Maquinaria utiliza diseños propios para la fabricación de sus productos, se detallará como se implementará la solución:
- Caracterización de la planta debido a que se debe analizar el sensor a utilizar y el punto en el que se ubicará, así como el sistema de control que se empleará, se debe de conocer de manera precisa el funcionamiento de la máquina previamente elegida por la empresa; es decir, para fines del proyecto no se realizará ningún tipo de diseño sobre la máquina más allá de alguna mejora para poder colocar los elementos que se utilizarán para la implementación del controlador, sus entradas y salidas.
- Implementación del sensor óptimo: Con el análisis previamente realizado, se debe de estudiar sobre el sensor óptimo para el trabajo que debe realizar y en caso de que sea necesario reemplazar el existente en la tostadora. Cabe destacar que no se realizará ningún cambio dentro del diseño propio de la tostadora más allá de la incorporación de elementos que faciliten la tarea de automatización.

- Diseño del sistema de control: Diseñar el sistema de control pertinente para manipular los elementos, así mismo como diseñar e implementar el interfaz usuario máquina dentro del equipo elegido. Esto implicaría realizar pruebas así sea en por separado, de la lógica e interfaz implementado.

2 Objetivos del proyecto

2.1 Objetivo General:

- Diseñar un sistema de control para una máquina tostadora de café TE-5 BENDIG, tal que se replique las curvas de tueste de manera automática.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis termodinámico para la colocación del dispositivo de medición más adecuado con respecto a la medición de temperatura del café.
- Diseñar un sistema de control para una curva de tueste manipulada por el usuario, representadas en un HMI.
- Diseñar un sistema de tueste automático en donde se ingrese alguna curva ya existente, previamente calibrada.

3 Alcance y limitaciones:

- La implementación del proyecto se trabajó sobre una máquina ya fabricada (TE-5), y no se pueden realizar variaciones en el diseño establecido, más allá de la incorporación de elementos que faciliten la implementación del dispositivo de control.
- Se contó con un presupuesto establecido, puesto que todas las modificaciones y compra de equipos debe de estar dentro del monto acordado.

4 Marco teórico:

El café es un grano que proviene de un árbol llamado cafeto. Tiene una apariencia de cereza. Tiene varias etapas de color, al nacer es verde, pasa por amarillo hasta que culmina con el color rojo, esto indica que ya el grano alcanzó su madurez. En el interior de cada cereza, se encuentran las dos semillas, que están divididas por una hendidura y rodeadas por una pulpa, protegiendo la semilla, hay una cubierta llamada pergamino que está cubierto de una sustancia vegetal viscosa llamada: mucílago. Cortijo (s.f.). A continuación, se presenta una imagen que describe las partes del grano de café.

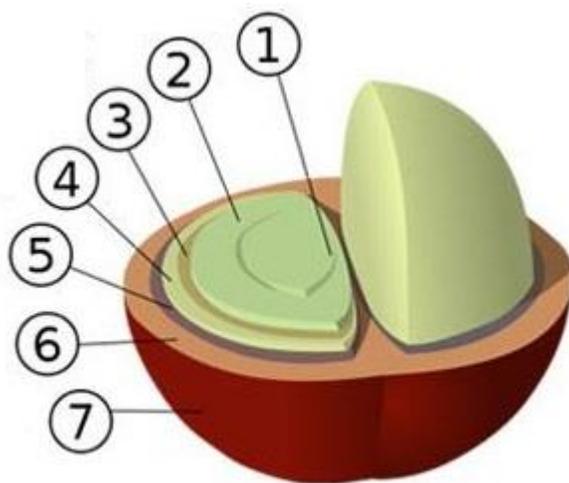


Figura 5.1. Estructura de un grano de café. Tomado de [9]

- 1- Corte central
- 2- Grano de café
- 3- Piel Plateada
- 4- Pergamino
- 5- Capa de pectina
- 6- Pulpa
- 7- Piel exterior.

Debido a que el crudo, es amargo, el café necesita ser tostado, por otro lado, al tostarse desarrolla las propiedades organolépticas; es decir, el olor y el sabor. Sin embargo, este proceso produce que el grano aumente en un 100% su volumen, pero su peso se reduzca en un 12 hasta un 20%. También pierde alrededor de un 10% la cafeína y sus componentes ácidos disminuyen mientras aumentan sus grasas. Cortijo (s.f.)

4.1 Tueste del café:

El primer paso del tueste del café es remover la humedad del grano por medio del secado, la humedad ronda el 12% generalmente.

Una vez con el café seco, se empieza a expandir. Cuando el café se encuentra cerca de los 170°C es donde se da el primer crujido del café, la intensidad de ese crujido depende de que tan fresco es el café y del tipo. En esta etapa la piel plateada se empieza a desprender.

Alrededor de los 190°C se produce el segundo crujido y se termina las reacciones de pirolisis y de ahí se debe llevar a una temperatura final que, según el tipo de máquina y el tueste deseado, varía entre 200°C y 240°C. Una vez terminado el tueste, se saca el café para que este se enfríe, y vaya desprendiendo el gran contenido de gases que el café posee, en un proceso que podría llegar a durar hasta 20 días. Cortijo (s.f.)

Dentro del proceso de tostado del café, hay una persona con mucha responsabilidad, es el encargado de manejar todas las variables que este proceso contiene, como calor, intensidad de aire caliente, espacio de ocupación dentro del bombo, tiempo y el agua necesaria. A esta persona se le conoce como el maestro tostador.

Este maestro es el encargado de dictar especificaciones concretas para transformar el café de verde a tostado, buscando una calidad específica, a estas especificaciones se les llama curvas de tueste.

Para la aplicación de estas curvas existen 3 sistemas:

- Uso de intensidades de calor: Calor alto, calor medio, calor bajo
- Calor constante durante todo el proceso
- Intensidad de calor: Calor bajo, calor medio, calor alto

Usualmente se utiliza el tueste con intensidad de calor en donde se empieza con calor alto y se le va reduciendo, esto porque se aprovecha mejor la energía.

4.2 Instrumentación:

La instrumentación posee 2 campos: instrumentación e instrumentación de control. En los sistemas de medición, el objetivo se centra en manejar la entrada, dar un rango de magnitudes y en caso de que sea necesario, acondicionar la señal, mientras que, en los dispositivos de control, se focaliza en el tratamiento de la señal para obtener una salida deseada, por lo general se controlan dispositivos como válvulas, variadores, entre otros (Bausa, García, Zaragoza, Gil, Moreno & Galiana, s.f.)

Para motivos de este proyecto, nos centraremos en los sensores de temperatura, pero aclarando que existen un sinnúmero de sensores que responden a las necesidades del usuario según la variable que se desee medir.

4.3 Clasificación de los sensores de temperatura:

En la actualidad existen distintos mecanismos para la medición de temperatura y dependen de la aplicación para la cual se emplearán. A continuación, se muestra una tabla que pretende dar una muestra de la gran cantidad de sensores para medir temperatura que existen; sin embargo, no se encuentran todos los tipos.

DISPOSITIVOS DE MEDICION DE TEMPERATURA			
Eléctricos	Mecánicos	Radiación térmica	Varios
Termocuplas	Sistemas de dilatación	Pirómetros de radiación	Indicadores de color
Termorresistencias	Termómetros de vidrio con líquidos	- Total (banda ancha)	- Lápices
Termistores	Termómetros bimetálicos	- Óptico	- Pinturas
Diodos		- Pasabanda	Sondas neumáticas
Sensores de silicio con efecto resistivo		- Relación	Sensores ultrasónicos
		Termómetros infrarrojos	Indicadores pirométricos
			Termómetros acústicos
			Cristales líquidos
			Sensores fluidicos.
			Indicadores de luminiscencia (Termografía)

Figura 4.3.1 Tabla representativa de los diferentes tipos de sensores para medir temperatura. Tomado de [1]

A continuación, se procederá a realizar una definición muy global sobre los 2 modelos mencionados dentro del proyecto.

4.3.1 Termocuplas

Son los sensores de temperatura más utilizados dentro de la industria. Están compuestos de dos alambres de distinto material y unidos en un extremo, al aplicársele temperaturas se genera un voltaje muy bajo en la unión y ese voltaje varía con la temperatura, a mayor temperatura mayor voltaje.

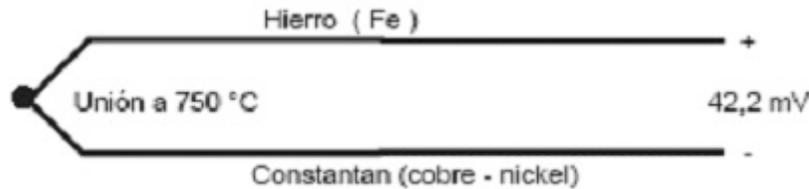


Figura 4.3.1.1 Esquema de composición de cualquier Termocuplas. Tomada de [1]

Las termocuplas suelen ir encapsuladas con una cubierta protectora, debido a que algunas veces el proceso en el que se instalarán presenta condiciones extremas, manera que en un extremo se encuentra el cable que transporta la señal protegido con la cubierta y del otro lado se encuentra la unión que emite el voltaje. Además, según la distancia a los aparatos encargados de tratar la señal eléctrica de estos transductores, también deben utilizarse cables compensados para transportar esta señal sin que la modifique o que la información se pueda recuperar de una manera sencilla.

4.3.2 Termocupla K

Tiene la ventaja de poderse emplear en atmósferas oxidantes, reductoras e inertes. Sin embargo, el problema es que la temperatura máxima a la que se puede utilizar es de 325°C con un diámetro de 3,25 milímetros. Pueden resultar funcionales para mediciones debajo de los 0°C, pero no se recomiendan.

4.3.3 Sensores infrarrojos

Son óptimos para la medición de temperatura sin entrar en contacto con el elemento a sensar. Las aplicaciones más críticas donde se utilizan son cuando el objeto de medición es pequeño, movable e inaccesible; para procesos dinámicos que requieren respuestas rápidas, o para temperaturas superiores a los mil grados Celsius.

Estos sensores determinan la temperatura del objeto basándose en la teoría de que todos los cuerpos emiten radiación a longitudes de onda ubicadas en la región infrarroja del espectro de radiación electromagnética, esa radiación se mide y se proporciona una señal. El rango de operación normalmente oscila entre los -50°C y los 3000°C (Bausa, García, Zaragoza, Gil, Moreno & Galiana, s.f.)

4.4 Instrumentación de control

Se define como un conjunto de elementos que son capaces de regular su propio comportamiento o el de otro sistema con tal de obtener un determinado funcionamiento, reduciendo los fallos y obteniendo resultados predeterminados. Se pueden clasificar en sistemas de control a lazo cerrado y sistemas de control a lazo abierto. (Leyva, 2009)

El principio de control automático se fundamenta en sistemas de control a lazo cerrado, en donde existe un lazo de retroalimentación en donde la salida del sistema se compara con la señal de referencia.

4.4.1 Retroalimentación

Es la propiedad de un sistema de control que permite que la salida del sistema se pueda comparar con la entrada, con tal de poder aplicarse medidas de control correctivas en función de la diferencia entre la entrada (variable medida) y la salida (valor deseado). (Leyva, 2009)

4.4.2 Controlador

Es el dispositivo encargado de comparar los valores de entrada con respecto al valor de la salida. Determinar el error, es decir, la diferencia entre ellos y manipular los actuadores para que el valor de la diferencia llegue a un valor permisible. (Leyva, 2009)

4.4.3 Actuador

Es un dispositivo mecánico, cuya función es activar otro dispositivo mecánico mediante una fuerza proporcionada. Esta fuerza normalmente es derivada de presión neumática, hidráulica o fuerza motriz. La fuerza con la que se activa este instrumento depende del controlador. (Leyva, 2009)

4.4.4 Función de transferencia

Es un modelo matemático que a través de una división relaciona la respuesta de un sistema que se encuentre modelado con una señal de entrada o excitación también modelado. (Ogata. 2003)

4.4.5 Controlador PID

Es un sistema de control con retroalimentación utilizado con mucha frecuencia en la Industria. Calcula el error entre un valor medido y un valor deseado, y el cálculo del control es dependiente de 3 parámetros: La ganancia proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo. (Ogata, 2003)

La función de transferencia en lazo cerrado con un controlador PID, viene dada por:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_p}{T_i s} G_p(s)}{1 + K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) G_p(s)} \quad (1)$$

5 Ejecución de la solución

En esta sección se detallará el proceso paulatino que se utilizó para obtener la solución del problema principal. Se detallará por secciones, problemas y soluciones que se dieron en orden cronológico y de prioridad.

5.1 Estado de la máquina TE-5

A continuación, se detallará los elementos que posee la tostadora convencional TE-5 fabricada por Bendig Maquinaria.

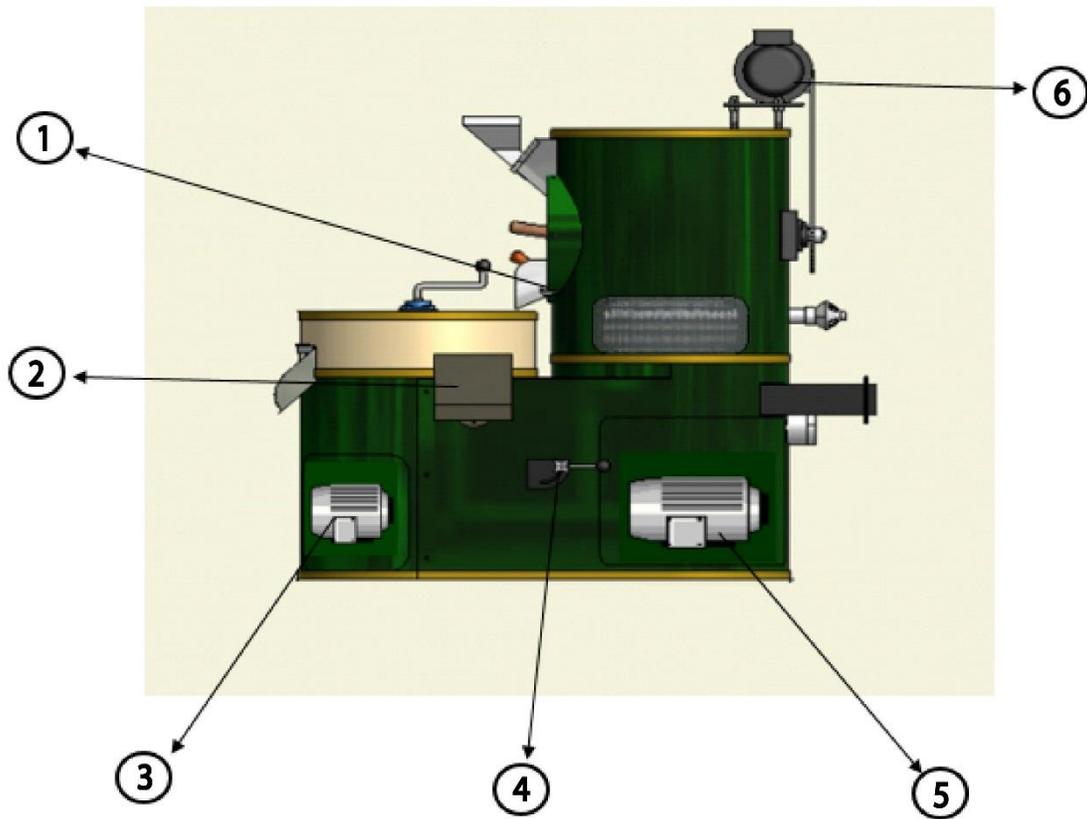


Figura 5.1.1 Elementos de instrumentación de la tostadora TE-5 de Bendig Maquinaria. Fuente: Elaboración propia

Tomado del catálogo de la empresa Bendig Maquinaria, la tostadora TE-5 presenta las siguientes características.

- Tiene una capacidad de 5 kg por tanda (10 kg por hora), quemador atmosférico de gas LP o propano, motores monofásicos 220 voltios 60 Hertz de 0.5 y 1 HP.
- El enfriador es de acero inoxidable y es movido manualmente, pero a pedido especial se puede accionar por medio de un motor.
- Incluye el ciclón para recolección de basuras y cascarilla
- Panel eléctrico de control con sus protecciones.

En la figura 6.1.1 se puede detallar los componentes de la máquina, y a continuación se enlistarán los elementos de instrumentación:

- 1- Termocupla K: encargada de realizar la medición de la temperatura dentro del tostador para poder mostrarla en el panel de control.
- 2- Panel de control: Se encuentra un pequeño controlador donde se puede establecer la temperatura deseada a la que se quiere llegar el cilindro de tueste.
- 3- Motor de 220 voltios 60 Hertz de 0.5 HP, encargado de mover el enfriador
- 4- Palanca encargada de elegir la dirección de centrifugado del motor de 1 HP.
- 5- Motor de 220 voltios 60 Hertz de 1 HP encargado de extraer aire caliente del enfriador, o los gases del cilindro de tueste.
- 6- Motor 220 voltios 60 Hertz de 0.5 HP encargado de girar el cilindro de tueste.

Con los elementos mencionados anteriormente es que se encontraba la máquina sobre la cual se implementó el proyecto, una vez conociendo con que componentes se contaba es que realizó el análisis que permitió saber si era

necesario la incorporación de algún elemento de instrumentación, y cuáles eran los mejores para la aplicación que se especificó.

5.2 Análisis de variables a controlar

A la hora de tostar el café muchas variables interfieren, como la altura de tueste, la humedad del café, la temperatura a la que se encuentra el grano, la temperatura de la máquina, entre otros. En la actualidad el proceso más utilizado es la tosti3n por medio del control de la temperatura.

En la tostadora TE-5 de Bendig Maquinaria, el sistema de instrumentaci3n presentaba una Termocupla K, y estaba conectada de la siguiente manera:

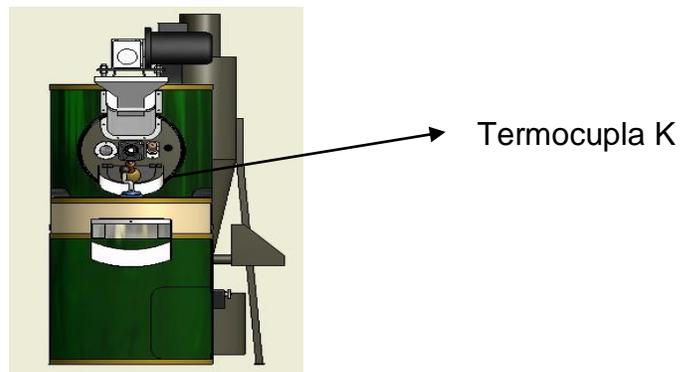


Figura 5.2.1 Vista frontal de la tostadora TE-5, ubicaci3n de la Termocupla. Fuente: Elaboraci3n propia.

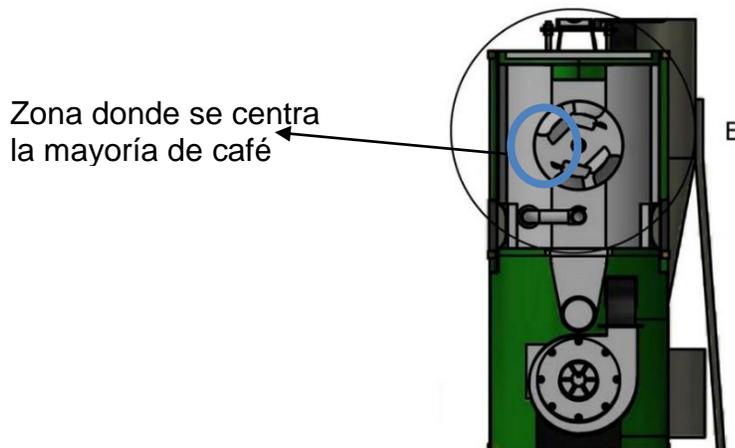


Figura 5.2.2 Vista frontal con un corte E en donde se muestra el cilindro de tueste. Fuente: Elaboraci3n propia.

Por sistemas de diseño, el cilindro de la tostadora TE-5 gira en sentido horario, y por sistemas de gravedad y densidad, la mayor parte de café se centraliza en la sección señalada en la figura 6.2.2 y como se muestra en la figura 6.2.1 la termocupla se encuentra justo al lado opuesto. Como sabemos la termocupla mide la temperatura según la diferencia de potencial que se genera según la temperatura del lugar en el que se encuentra, como la temperatura de importancia es la del café exactamente, es que la posición de la termocupla no es la más óptima, puesto que en esa posición lo que está midiendo es la diferencia de temperatura entre el calor generado por la máquina, y el calor absorbido por el café, y esta temperatura no siempre es fidedigna, por ejemplo: si la máquina se encuentra a 700°C, y el café está muy húmedo, el café para lograr secarse absorbe más calor, por lo que la temperatura mostrada por la termocupla indicaría un menor que si el café estuviera seco, por lo que el valor mostrado de la termocupla no es de todo fiable para la medición que requerimos hacer.

Debido a este análisis es que se obtuvo dos posibles soluciones:

- Cambiar la termocupla de posición.
- Cambiar el sensor utilizado.

Otro factor importante fue que el producto a sensar estaba en constante movimiento, además por cuestiones de seguridad sanitaria, no es recomendable que el sensor esté en contacto con el producto, debido a que se podría oxidar y llenar el producto de óxido del metal.

5.2.1 Cálculo para elección del sensor.

A continuación, se realizará el siguiente estudio para comprobar la teoría que, a mayor humedad, mayor absorción de calor por parte de los granos de café. Los cálculos se realizarán con la premisa de que, para tostar café, debe haber una variación en el grano de 75°C a 225°C.

Se tomará el café como una esfera, esto debido a la idealización de la forma. Por lo que se tiene que la ecuación del volumen de un grano de café viene dada por:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (2)$$

En donde r viene dado por el radio mayor del grano, que el promedio en el grano centroamericano es de 5,85 milímetros.

Por lo que el volumen para un grano de café equivaldría a:

$$V = \frac{4}{3}\pi(5,85 \text{ mm}^3)^3$$

$$V = 8,3860 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \quad (2.1)$$

Además, se tiene que la cantidad de agua normalmente en el café seco, varía entre el 40% y el 65%, a esto, y la humedad que se presenta en el café tostado es normalmente el 11%, por lo que implica que habría que reducir en el porcentaje de agua en un grano del 40% al 11%, esto en el caso del café con poca humedad, y del 65% al 11% en casos de café muy húmedos. Eso implicaría convertir en un 29% la cantidad de agua del café en vapor de agua eso en el caso del café seco, y en un 54% en el caso del café húmedo. Para lo que se utilizará calorimetría.

Caso café seco:

Es volumen de agua a convertir de líquido a 75°C a vapor de agua a 225°C corresponde al 29% del volumen del café.

$$V_1 = 0,29 \times 8,386 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$V_1 = 2,432 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

Habiendo calculado el volumen, se procedió a calcular la masa, y lo calculamos de la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Despajando (3) se obtiene:

$$\rho V = m \quad (3.1)$$

Sustituyendo los valores del agua en (3.1), se obtiene que el valor de la masa a convertir de 75°C a 225 es:

$$m_1 = 1000 \frac{kg}{m^3} * 2,4319 \times 10^{-7} m^3$$

$$m_1 = 2,432 \times 10^{-4} kg$$

Basándose en la teoría de calor específico con cambio de estados, se tiene que el agua debe de pasar por 2 estados para convertirse de agua líquida a 75°C a vapor de agua a 225°C. A continuación, se muestra un diagrama donde se representa gráficamente lo que se mencionó anteriormente.

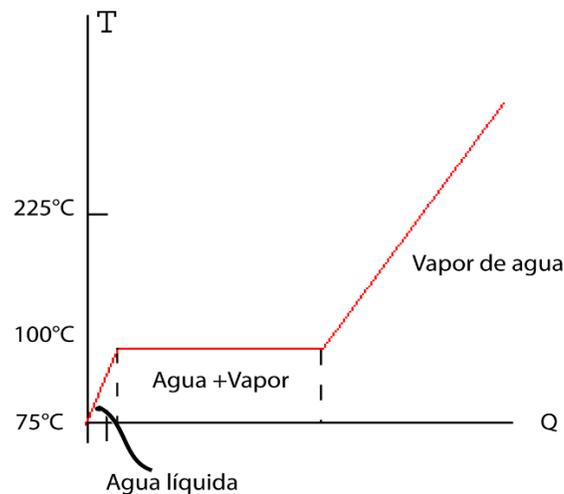


Figura 5.2.1.1. Diagrama de temperatura vs calor requerido para el agua. Fuente: Elaboración propia.

Los cálculos del calor requerido se realizarán por medio de 3 etapas:

Q_1 = Etapa de agua líquida.

Q_2 = Etapa de agua más vapor de agua.

Q_3 = Etapa de vapor de agua

El cálculo de la etapa Q_1 por sólo tener un estado se realiza por medio de la ecuación:

$$Q = mc\Delta T \quad (4)$$

En donde Q el calor requerido, m la masa, c la constante de capacidad calorífica y ΔT es el cambio de temperatura, ya sea en Kelvin o en grados Celsius.

Se tiene que la constante de capacidad calorífica para el agua líquida es igual a: $4190 \frac{J}{kg \cdot K}$ por lo que sustituyendo los valores en (4) para calcular el calor requerido para la etapa Q_1 se tiene:

$$Q_1 = 2,432 \times 10^{-4} kg * 4190 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} (100^\circ C - 75^\circ C)$$

$$Q_1 = 25,45 J \quad (5)$$

Para la etapa Q_2 se tiene que la cantidad de calor requerido viene dado por la ecuación:

$$Q = mL_v \quad (6)$$

Para la transición de líquido a vapor de agua, la constante L_v posee un valor de $2260 \times 10^3 J/kg$, por lo que sustituyendo valores en la ecuación (6) se obtiene que:

$$Q_2 = 2,432 \times 10^{-4} kg * 2260 \times 10^3 J/kg$$

$$Q_2 = 549,2 J \quad (7)$$

Para el cálculo de Q_3 se realizará el mismo procedimiento que para Q_1 con la diferencia de que la constante de capacidad calorífica para el estado gaseoso es: $1840 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$, así que sustituyendo los valores en (4), tenemos:

$$Q_3 = 2,432 \times 10^{-4} kg * 1840 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} (225^\circ C - 100^\circ C)$$

$$Q_3 = 55,89 \text{ (8)}$$

Por lo que el calor requerido para convertir $2,432 \times 10^{-4} kg$ de agua líquida a $75^\circ C$ a vapor de agua a $225^\circ C$ viene dado por:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 \text{ (9)}$$

Sustituyendo (5), (7) y (8) en (9) se obtiene:

$$Q_T = 25,45J + 549,2J + 55,89J$$

$$Q_T = 630,54J \text{ (10)}$$

Se obtiene que para convertir $2,432 \times 10^{-4} kg$ de agua se requiere $630,54J$; es decir que para conseguir que la humedad de un grano de café pase de 40% al 11% , se requiere $630,54J$.

Caso café húmedo:

Para este apartado se realizará la misma premisa que para el café seco con la diferencia de la masa. Debido a que la masa de agua que se debe variar aumenta, pues la humedad aumenta. Utilizando la ecuación (2.1) sabiendo que el porcentaje que se debe convertir de agua en el caso de mayor humedad es del 54% , se tiene que

$$V_2 = 0,54 * 8,3860 \times 10^{-7}$$

$$V_2 = 4,528 \times 10^{-7}$$

Utilizando ese valor de volumen en (3.1), se obtiene:

$$m_2 = 4,528 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Este sistema presenta la misma cantidad de etapas, y la manera de calcularlo es la misma, tomando en cuenta la variación en la masa, todas las constantes se mantienen, por lo que sólo se escribirán los resultados obtenidos.

Q_{12} = Etapa de agua líquida.

Q_{22} = Etapa de agua más vapor de agua.

Q_{32} = Etapa de vapor de agua

Resultados obtenidos para la nueva masa:

$$Q_{12} = 47,43 \text{ J}$$

$$Q_{22} = 1023 \text{ J}$$

$$Q_{32} = 104,1 \text{ J}$$

$$Q_{T2} = 47,43 \text{ J} + 1023 \text{ J} + 104,1 \text{ J}$$

$$Q_{T2} = 1174,53 \text{ J} \text{ (11)}$$

Por lo que se obtiene que el calor requerido para reducir la humedad de un grano de café del 65% al 11% con temperaturas que varían de 75°C a 225°C, se requieren 1174,53J. Comparando la ecuación (10) con la ecuación (11), se demuestra que a mayor humedad en el café mayor calor es requerido. Debido a que el calor proviene de una fuente constante es que, a mayor humedad, debido a que el café absorbe mayor temperatura, el calor del aire disminuye.

Tomando en cuenta esas consideraciones es que se optó por cambiar el sensor y ubicarlo en una mejor posición física en donde haya mayor cantidad de café. Dentro de las opciones que se presentaron, el sensor que mejor se adaptaba a la necesidad del proceso fue el sensor infrarrojo por varias razones:

- Son óptimos para medir temperatura sin estar en contacto con el producto a medir.
- Es un proceso dinámico.
- El acceso al producto de medición es complicado.

Debido a esas características favorables para el proceso es que se optó por el sensor infrarrojo.

5.3 Instrumentación de control

Los requerimientos del proyecto incluyen realizar una interfaz máquina usuario, además de diseñar un sistema de control con tal de poder realizar curvas de tueste tanto manuales, como replicar curvas de tueste automáticamente. Teniendo en cuenta esto se procedió a realizar un análisis de entradas y salidas para el sistema de control, así como requerimientos importantes dentro de la interfaz, esto con tal de poder elegir el equipo que mejor se acople a las necesidades del proyecto.

A continuación, se presentará una tabla con los elementos de la tostadora TE-5 así como la función dentro del proceso de tueste:

Tabla 5.3.1 Elementos dentro de la tostadora TE-5 de Bendig Maquinaria, con su respectiva función dentro del proceso.

Elemento	Función
Motor 220V/ 0,5 HP	Mover el cilindro de tueste
Motor 220V/ 0,5 HP	Mover el sistema de enfriamiento
Motor 220V/ 1 HP	Encargado de extraer los gases producidos por la tostión y extraer el aire caliente de sistema de enfriamiento
Sensor de temperatura	Encargado de medir la temperatura a la que se encuentra el grano de café.
Válvula de gas	Encargada de brindar el gas que llega al quemador

Fuente: Elaboración propia.

Debido a las funciones que realizan los elementos y a la variable que se desea controlar, que en este caso es la temperatura del café, es que se decidió aplicarle el algoritmo de control al motor encargado de extraer los gases producidos por la tostión y extraer el aire caliente de sistema de enfriamiento, y a la válvula que se encarga de permitir el paso de caudal; sin embargo, con los elementos con los que contaba la máquina hasta ahora era imposible controlar los elementos. Por lo que se implementó un variador de velocidad para el motor a controlar, y una válvula electrónica que regulaba el flujo volumétrico del gas. Una vez con estos elementos se procedió a categorizar los elementos como entradas y salidas:

Tabla 5.3.2 Elementos dentro de la tostadora TE-5 de Bendig Maquinaria, con su respectiva función dentro del proceso.

Elemento	Clasificación dentro del proceso de control
Motor 220V/0,5 HP	Salida digital
Motor 220V/0,5 HP	Salida digital
Motor 1 HP con variador	Salida analógica y Salida digital
Sensor de temperatura	entrada analógica
Válvula electrónica	salida analógica y salida digital

Fuente: Elaboración propia.

Debido al análisis de entradas y salidas para el controlador, es que el dispositivo que se eligió debía poseer al menos 1 entrada analógica, 2 salidas analógicas, 4 salidas digitales y 4 entradas digitales. La razón de las entradas digitales es porque todas las salidas digitales deben de tener un retorno, es decir, algún parámetro que informe al controlador que la salida se puso en el estado deseado.

A continuación, se presenta una serie de características con las que el controlador debe contar, y ordenados según prioridad:

- Contar con al menos 4 entradas digitales, 1 entrada analógica, 4 salidas digitales y 2 salidas analógicas.
- Facilidad de aprendizaje para la configuración del sistema de control.
- Bajo costo.
- Hecho para funcionar en ambientes pesados como lo es la industria cafetalera.

Por otro lado, el interfaz usuario máquina debe de presentar las siguientes características:

- Facilidad a la hora de desarrollar el interfaz usuario máquina.
- Un sistema táctil.
- Con dimensiones mayores a 130 mm x 105 mm, pero dimensiones menores a 215mm x 270 mm debido al espacio establecido dentro de la máquina ya existente.
- Hecho para funcionar en ambientes pesados como lo es la industria cafetalera

Investigando sobre controladores lógico programables, PLC (Por sus siglas en inglés) y sobre interfaz humano-máquina, HMI (Por sus siglas en inglés), se llegó a la existencia de un controlador integrado con un interfaz humano máquina, llamado controlador humano máquina, HMC (Por sus siglas en inglés). El cual para implementar control en procesos pequeños es ideal y la cantidad de entradas y salidas dependen de uno módulos de expansión. Debido a la simplicidad de la configuración y del precio, se decidió utilizar el HMC como controlador del proyecto y el lugar donde se desarrollará el interfaz humano máquina.

Como elementos de instrumentación se eligieron los siguientes equipos, con los siguientes costos:

Tabla 5.3.3 Equipo elegido para la instrumentación y dispositivos de control con sus respectivos precios.

Cantidad	Equipo	Precio (Dólares)
1	7" Touchscreen HMC Maple System Built-In I/O Module	886,84
1	I/O Expansion Module Maple System P/N: HMC7-MIO-03	386,84
1	I/O Expansion Module Maple System P/N: HMC7-MIO-06	276,32
1	Rapte MI3 Infrared Temperature Sensor	852,86
Total		2402,86

Fuente: Elaboración propia.

Una vez elegido la instrumentación de control, se procederá a mostrar un diagrama general del sistema de control.

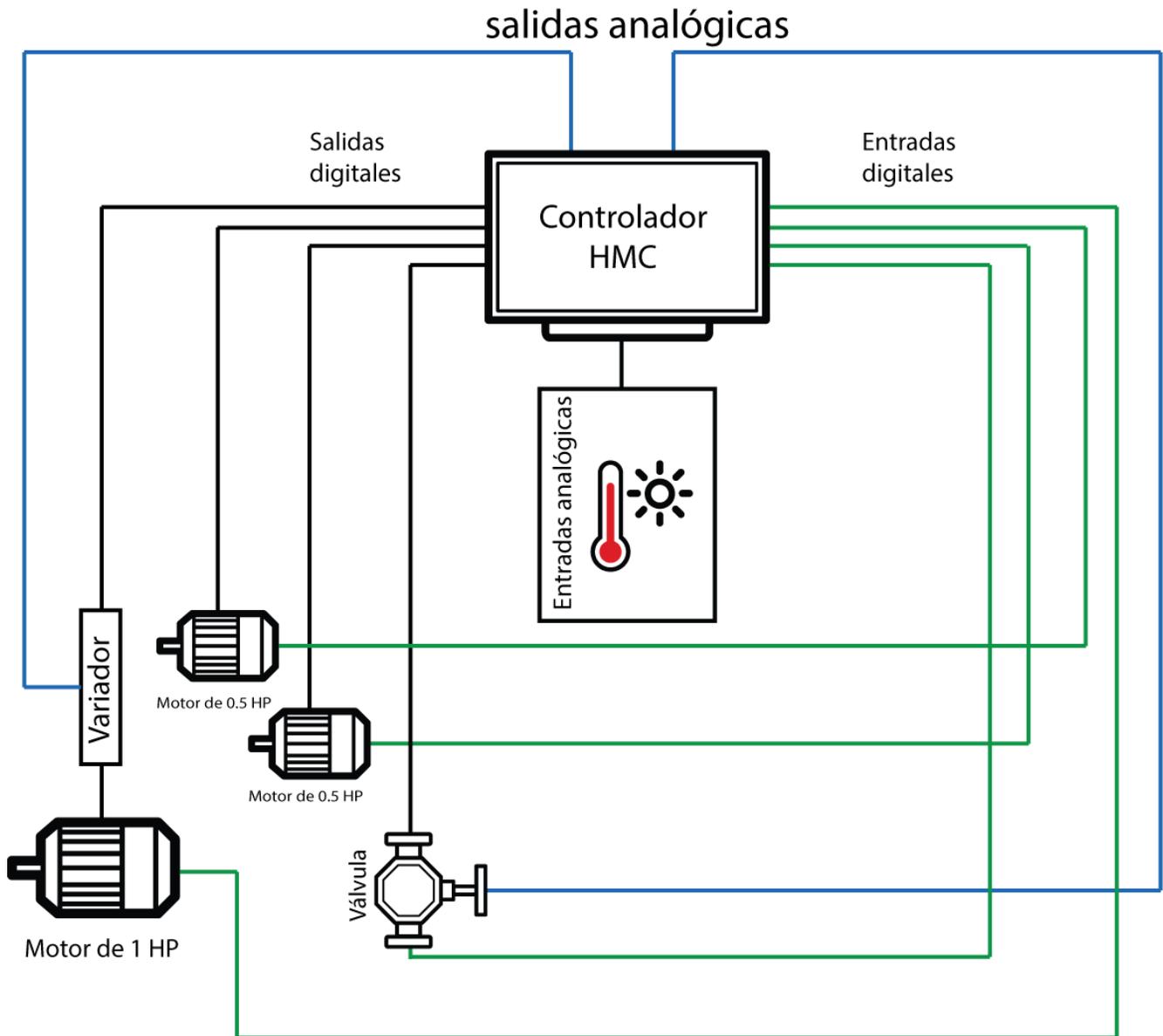


Figura 5.3.1 Diagrama de instrumentación con variables a controlar. Fuente: Elaboración propia.

5.4 Cronograma para la implementación del sistema de control

Una vez con los elementos de instrumentación seleccionados se estructuró la manera en la que se procederá a atacar la solución, a continuación, se enlistarán el orden en el que se abarcará, según prioridad, y además de que algunos procesos dependen de la realización de su antecesor.

- Configuración del sensor y de los equipos de control
- Configuración de bloques generales como encendido y apagado de motores, como el bloque PID.
- Realización de diagrama de flujo y lógica para el sistema de tueste manual.
- Realización de diagrama de flujo y lógica para el sistema automático.

5.5 Configuración del sensor

Es común que los sensores infrarrojos de temperatura posean un software de configuración, debido a que, como se mencionó anteriormente, se encargan de medir la radiación que emiten los cuerpos en el espectro infrarrojo, para esto es necesario conocer la emisividad del objeto a medir, así como la configuración de los rangos de temperatura en los que el sensor va a medir, esto porque el sensor envía al controlador una señal eléctrica que en nuestro caso es una corriente en el rango de 4 a 20mA, entonces es necesario establecer el valor máximo y mínimo de temperatura al que ese rango de corriente corresponden.

Sin embargo, antes de realizar esta configuración, se comenzó configurando el sensor, debido a que el sensor contaba con un protocolo de comunicación HART, se debió instalar los drivers de comunicación para poder conectarse modo USB.

Una vez que la comunicación entre el sensor de temperatura y el dispositivo de configuración fue exitosa, se procedió a instalar el programa de configuración propiamente del sensor DataTemp®. El sensor presenta varios protocolos de señalización industrial, pero por facilidad de comunicación y estandarización se utilizó el de 4 mA a 20 mA, como se mencionó anteriormente. Cuando se estableció dicho protocolo, se procedió a fijar los valores máximos y mínimos de temperatura, para poder transformar la señal física, en una eléctrica, y fijar el valor de emisividad.

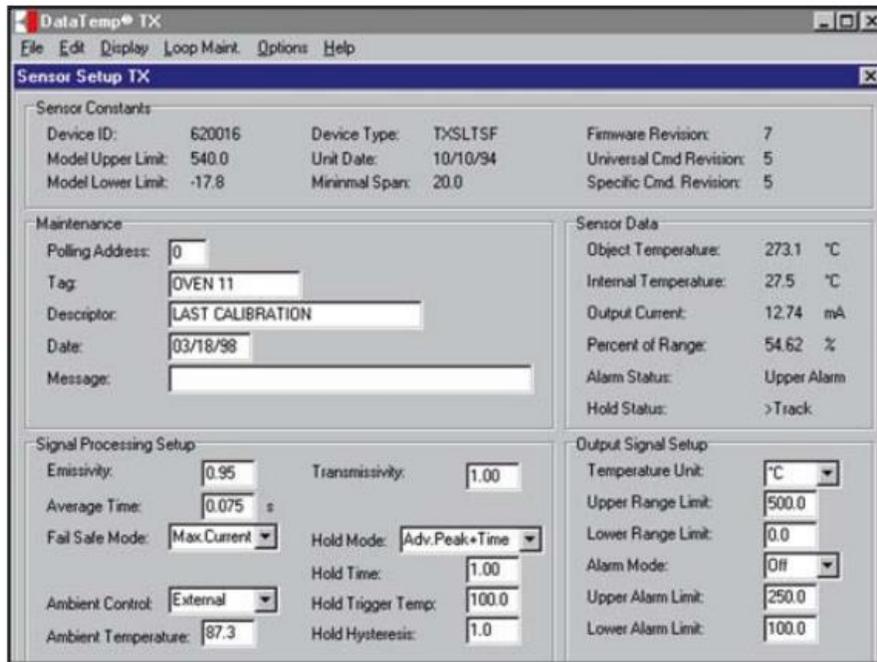


Figura 5.5.1 Configuración del software DataTemp para el sensor infrarrojo Raytek. Figura tomada de [8]

A continuación, se presentará una tabla con los valores que elegimos para la temperatura máxima de muestreo (*Upper range limit*), para la temperatura mínima de muestreo (*Lower range limit*) y el valor de la emisividad que es el valor que se encarga de distinguir entre que rangos de radiación infrarroja es que medirá.

Tabla 5.5.1 Valores destacados en la configuración del sensor infrarrojo Raytek.

	Valor	Equivalente
Temperatura máxima	250°C	20 mA
Temperatura mínima	15°C	4 mA
Emisividad	0,9	

Fuente: Elaboración propia.

Los valores que se eligieron fueron por las siguientes razones. El valor máximo de 250°C resulta de que los sistemas de tueste ya establecidos no sobrepasan los 200°C, puesto que se dio un rango de error de 50°C, cuidando el hecho de que podría haber valores picos. El valor mínimo de temperatura es porque en ningún sistema de tueste, el cilindro de tueste debe estar por debajo de los 20°C, eso implicaría alguna falla en el quemador, y al igual que en la temperatura máxima, se dejó un rango de error; no obstante, en este caso fue de 5°C por ser más improbable. Se debe enfatizar que los países en los que se tuesta café con la tostadora TE-5 poseen clima tropical, eso implicar que las tostadoras no estarán a condiciones extremas ya que no son diseñadas para esto.

Por último, el valor de emisividad, se eligió de 0,9 debido a consultas bibliográficas en las que se resalta que la emisividad de granos, como el café, el maní, entre otros, ronda el valor de 0,9. Por lo que se estableció este valor. (Bustamante, 2006)

5.6 Configuración del HMC

Configurado en sensor se procedió a realizar la configuración del HMC, primero se debieron instalar los drivers requeridos para poder comunicar la computadora con el HMC, como se mencionó anteriormente, a este controlador con interfaz humano máquina incorporada se le necesitan adaptar los módulos de expansión para poder tener las entradas y salidas, tanto digitales como analógicas, por lo que también se necesitó realizar la configuración de los módulos.

A la hora de realizar la comunicación entre la computadora y el HMC, existen distintos modos para efectuarlo, el equipo presenta las opciones de: comunicación serial, USB o ethernet. Pensando en una posible expansión de integrarle sistemas de control a más máquinas, además de la facilidad y el hecho de que no es necesario estar físicamente en el mismo lugar del controlador para la configuración, se eligió comunicación ethernet.

Para poder realizar las descargas de configuraciones desde la computadora hacia el HMC, se debe de elegir una dirección IP, debido a que la dirección por

defecto del HMC estaba en 192.168.5.81, se eligió esta como dirección de descarga. En la siguiente imagen se muestran los valores más importantes para la configuración de descarga.

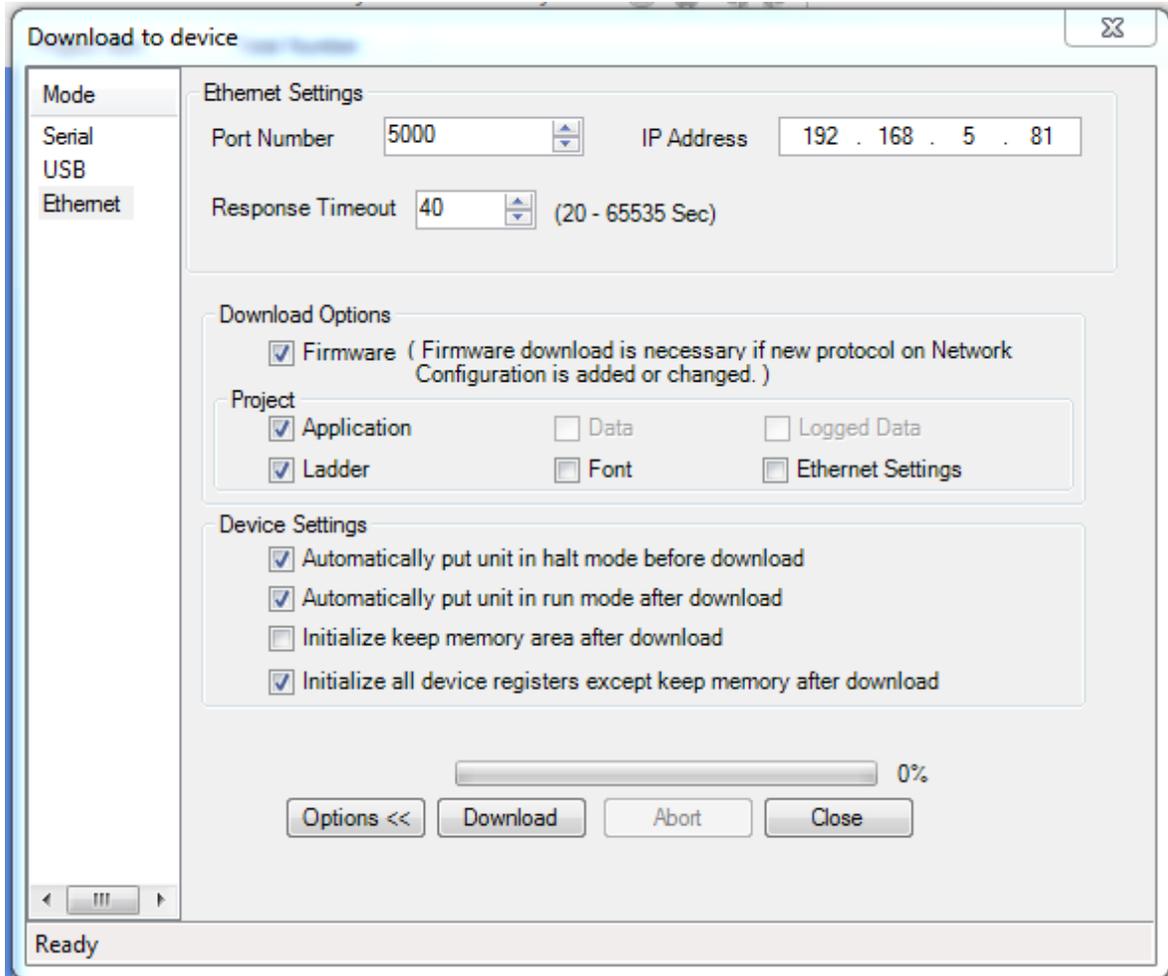


Figura 5.6.1 Parámetros importantes en la configuración de descarga del HMC.

Fuente: Elaboración propia.

5.6.1 Incorporación de los módulos de expansión

Para terminar la configuración de los equipos de instrumentación, fue necesario la incorporación de los módulos encargados de manejar la lectura de entradas digitales. Como se especificó anteriormente se optó por adquirir los módulos HMC7-MIO-03 y HMC7-MIO-06. El primero es un módulo analógico que

cuenta con 2 salidas y 2 entradas, y el segundo es un módulo digital que cuenta con 8 salidas y 8 entradas. Se deseó implementar este módulo de 8 salidas y 8 entradas con miras a futuro de poder incorporarle más instrumentos de control como pistones eléctricos, sensores de distancia entre otros.

Una vez con los módulos en físico, se procede a configurarlo, y se realizó de la siguiente manera.

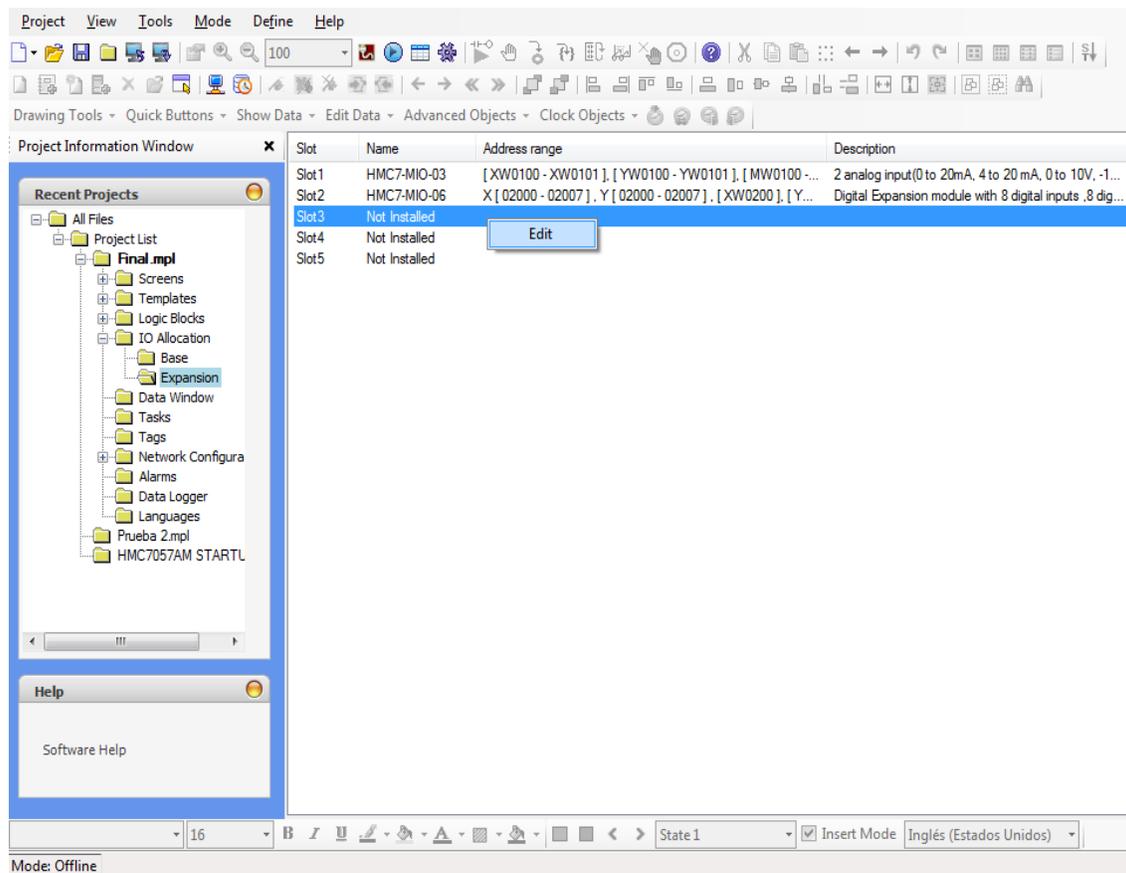


Figura 5.6.1.1 Configuración de los módulos de expansión para el módulo HMC.

Fuente: Elaboración propia.

Se le da click en edit, y se eligen los módulos que se eligieron usar para este proyecto, es decir los módulos HMC7-MIO-03 y HMC7-MIO-06, como se muestra en la siguiente figura.

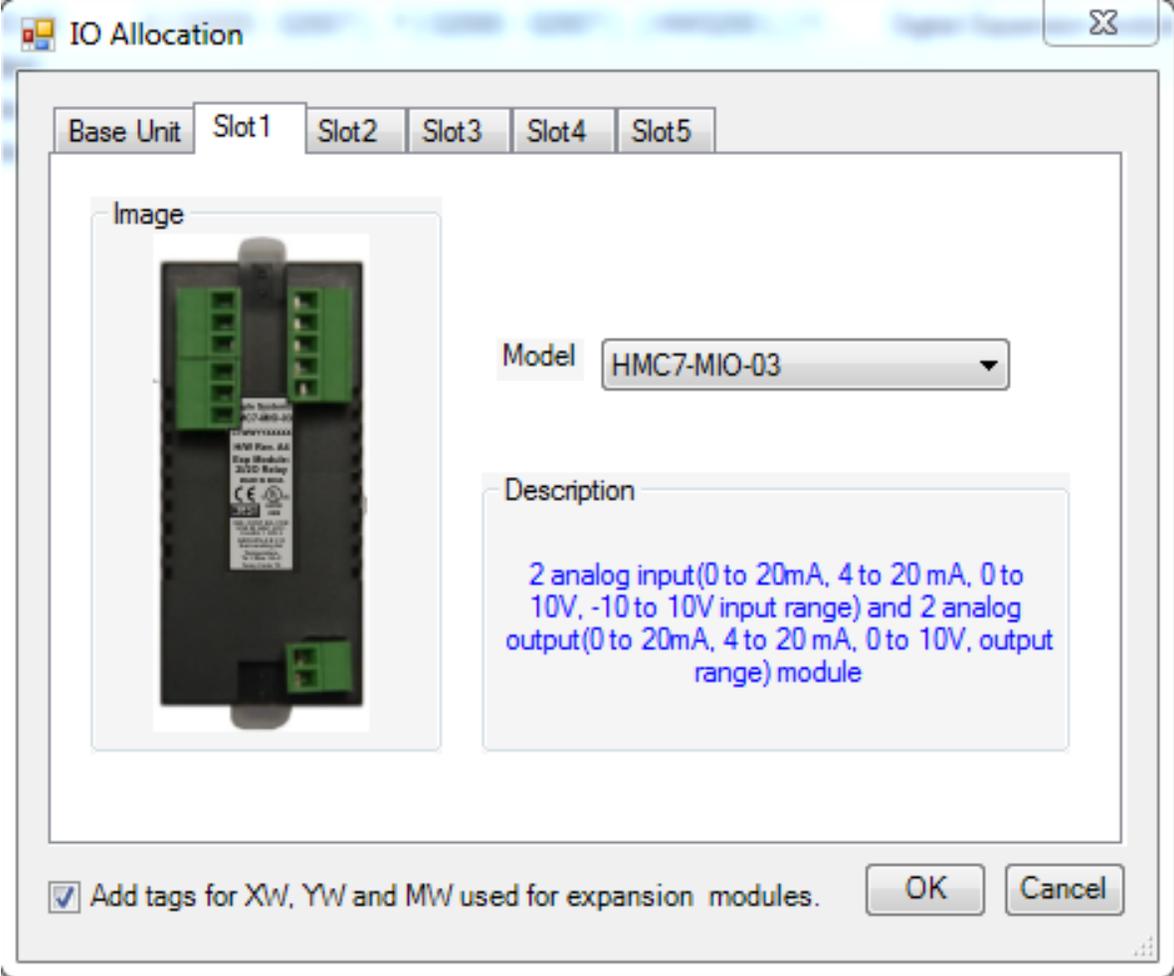


Figura 5.6.1.2 Incorporación de módulo analógico HMC7-MIO-03. Fuente: Elaboración propia.

Y así mismo para el módulo digital MIO-06.

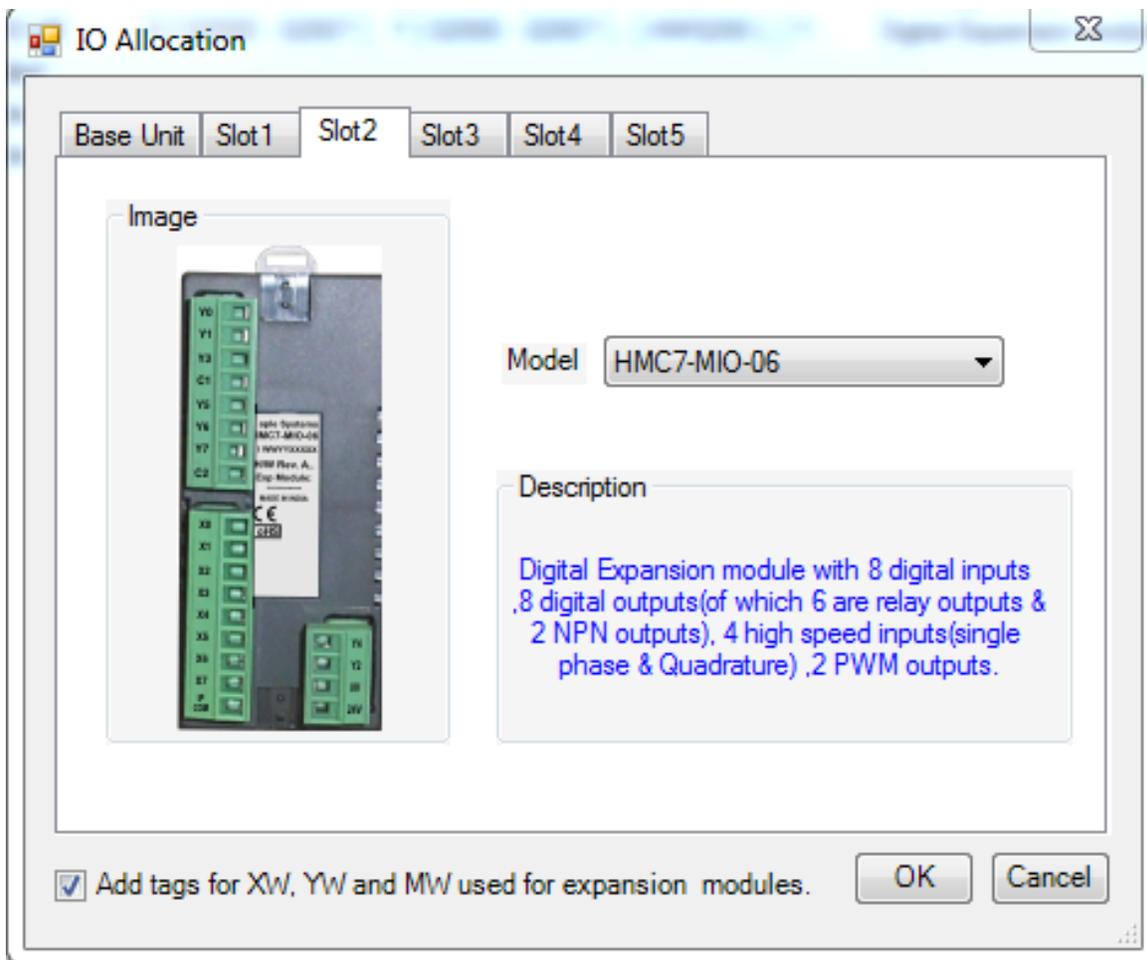


Figura 5.6.1.3 Incorporación de módulo analógico HMC7-MIO-06. Fuente: Elaboración propia.

5.7 Guía para implementación de las curvas de tueste manual y automático

Como en todo proceso, se detallará una lista de los procesos a desarrollar para la implementación del sistema de control para el sistema de tueste tanto manual, como automático.

Escalar la lectura del sensor a una variable ingenieril: Debido a que la lectura del sensor es una corriente que oscila entre los 4 y los 20mA, es necesario escalar esos valores de corriente a una variable de ingeniería, que lo es la temperatura, cabe destacar que para este proceso se utilizó el mismo sistema de referencia de la lectura del sensor, que fue grados Celsius.

Sistema de encendido y apagado de los motores: Se debe de realizar un sistema de apagado y encendido de los motores, tanto de manera automática, como de manera manual.

Configuración del sistema PID: Como se desean controlar las válvulas, se implementó un sistema de control proporcional, integral y derivativo, esto debido a facilidad en la curva de aprendizaje, puesto que es el sistema de control más común. Para esto se debió configurar el módulo PID incorporado en las funciones del HMC.

Lógica de control para tueste manual: Se debe de realizar una lógica de control en la que se le permita al usuario poder realizar una curva de tueste, variando la temperatura que se desea.

Lógica de control para tueste automático: Se debe realizar una lógica de control en la que se le permita al usuario ingresar 10 valores de temperatura previamente extraído de una curva de tueste calibrada, con tal de poder replicarse.

5.8 Escalamiento de lectura del sensor a una variable ingenieril

Como me mencionó anteriormente este paso es necesario debido a que el sensor nos envía señales electrónicas, y nosotros necesitamos variables ingenieriles, esto con tal de poder ingresar ese valor a posteriores bloques, como el bloque PID, bloques matemáticos, entre otros.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo con la lógica para proceder a realizar el escalamiento de la señal eléctrica y poder convertirlo en una escala de temperatura.

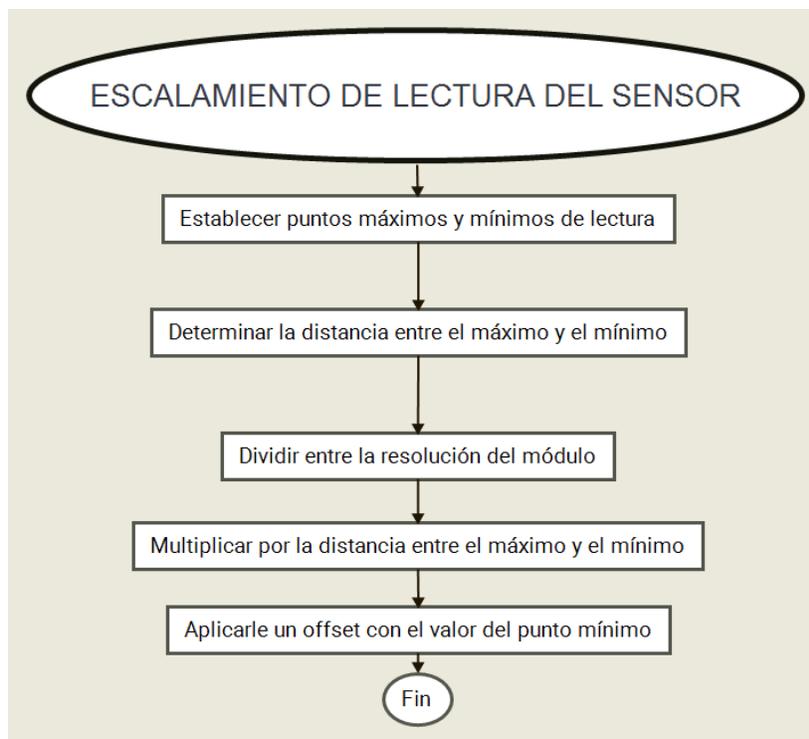


Figura 5.8.1 Diagrama de flujo para el escalamiento de la señal electrónica, a escala de temperatura. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en la sección de configuración del sensor, se debe usar los mismos valores para máximos y mínimos, puesto que las escalas deben coincidir. Es por esto que como valor máximo se eligió: 250°C y como valor mínimo, se eligió 15°C. Por lo que el rango de operación es de 235°C.

Una vez obtenidos los valores de la configuración se procede a tomar la entrada convertida en un valor numérico y se divide entre la resolución del registro del módulo. En nuestro caso, el módulo analógico tiene 12 bits de resolución, por lo que el rango decimal de la entrada está entre 0 y $2^{12} - 1$ es decir en 4095. Una vez escalado ese valor, se procede a multiplicar por el rango en el que va a operar las temperaturas, que en nuestro caso es 235°C; Sin embargo, si se deja así, las temperaturas oscilarán entre 0°C y 235°C, por lo que es necesario aplicarle un *offset* del valor mínimo, es decir, sumarle 15°C, así, el valor de temperatura oscilará entre 15°C y 250°C.

A continuación, se muestra una imagen con la configuración en diagrama escalera.

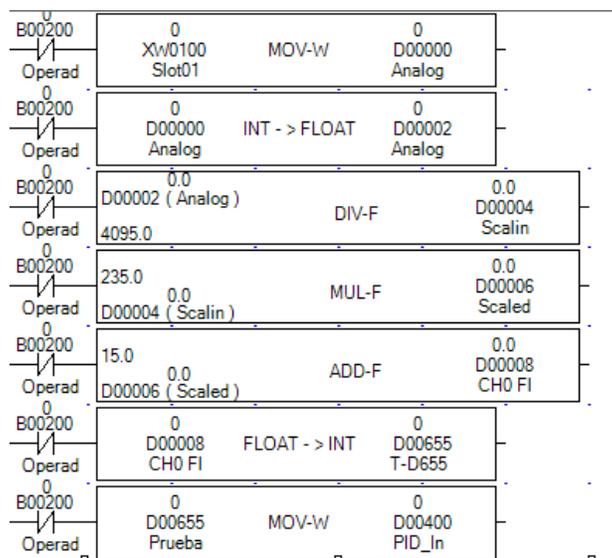


Figura 5.8.2 Diagrama escalera de temperatura escalada. Fuente: Elaboración propia.

5.9 Sistema de encendido y apagado de los motores.

Una parte importante del sistema de control es el manejo de las salidas digitales, como lo son el encendido y apagado de los motores. Debido a las especificaciones del usuario, estos deben de encenderse y apagarse ya sea por

decisión del usuario, o por la lógica de control. Es por esto que se implementó una lógica de bobinas digitales, como se muestra seguidamente:

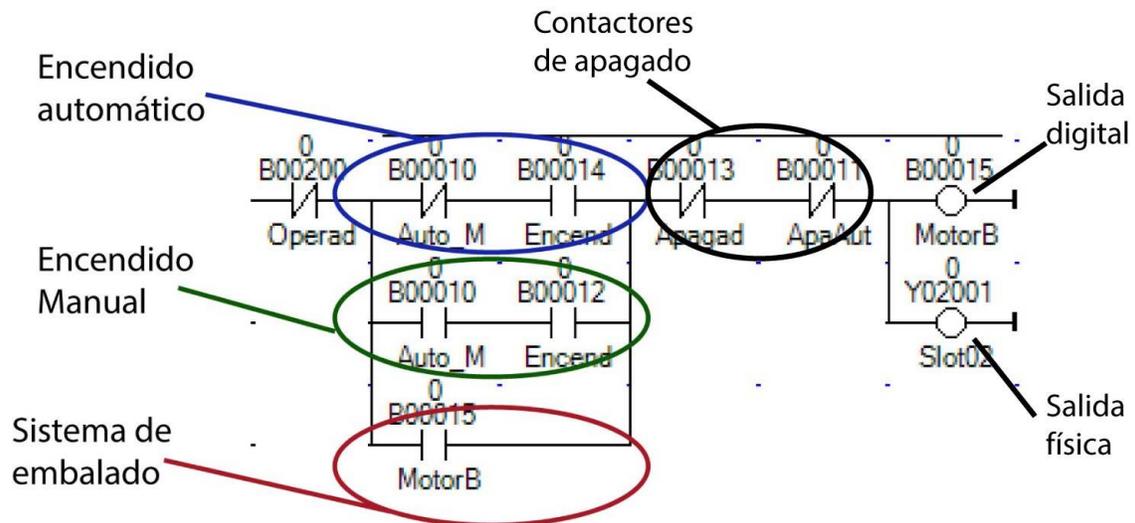


Figura 5.9.1 Diagrama general de encendido y apagado de motores. Fuente: Elaboración propia.

Se debe explicar que son 3 motores y una válvula, los elementos a los que se le debe aplicar la lógica de encendido y apagado, por lo que se utilizó el mismo diagrama para esos elementos. También que el sistema cuenta con dos salidas, una es digital, y se utiliza para las variables de proceso dentro de la lógica de control y la otra es física, es decir, va directamente a una de las salidas del módulo digital HMC7-MIO-06.

Una vez realizada la lógica se decidió incorporar la configuración en el sistema HMI, en donde se optó por realizarse como una ventana que aparece una vez que se selecciona el motor que se desea visualizar.

A continuación, se muestra la representación del sistema de encendido y apagado dentro de la configuración HMI.



Figura 5.9.2 Representación en el sistema HMI de la lógica de encendido y apagado. Fuente: Elaboración propia.

Dentro de las funciones que tiene esta ventanilla, es que no se pueda accionar el motor con los motores “encender y apagar” si el sistema se encuentra en estado: Auto. Para poder manipular la salida, se debe presionar primeramente el botón manual, seguido de la acción que desea realizar sobre el motor.

5.10 Configuración del sistema PID

5.10.1 Cálculos para constantes PID

Debido a que por razones de diseño se controlará un motor por medio de un variador de velocidad, y una válvula, se decidió que el controlador aplicado tendrá las mismas constantes de PID, sólo que, con las salidas invertidas, así que cuando

el variador de velocidad esté a máxima potencia, la válvula esté a mínima, y viceversa.

Por cuestiones de simplicidad, se decidió calcular los parámetros PID para la válvula que posee un actuador MF200Y.

A continuación, se muestran los experimentos realizados para poder obtener la respuesta de la válvula con respecto a una entrada escalón.

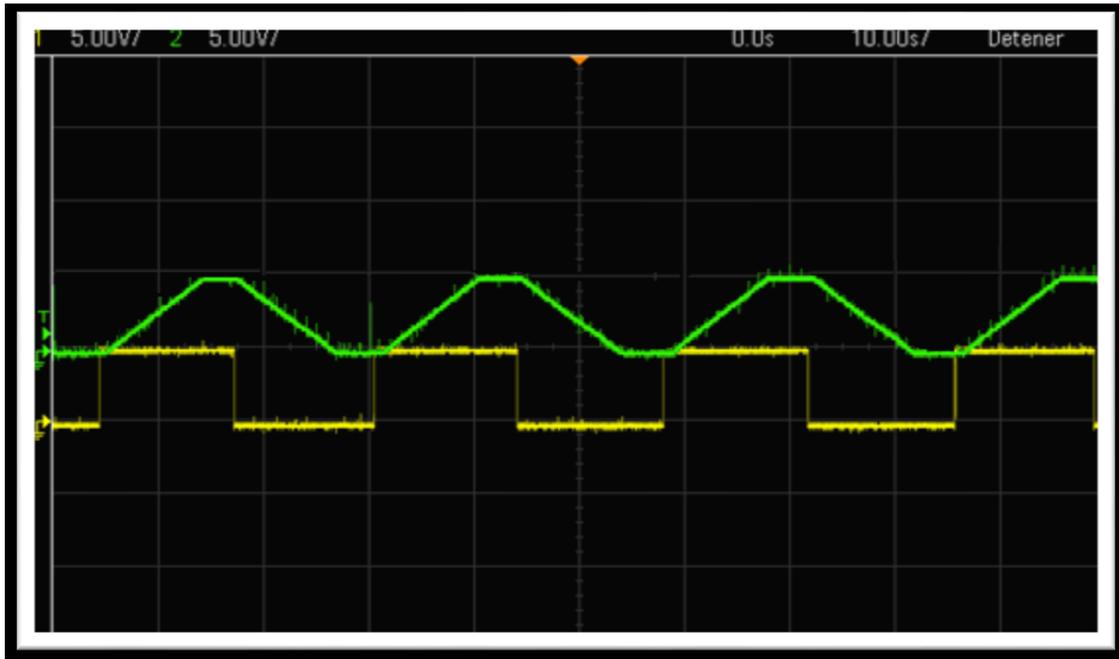


Figura 5.10.1.1. Salida de voltaje del sistema de la válvula debido a una entrada escalón. Fuente: Elaboración propia.

Para la estimación del modelo de la válvula, se utilizó aplicó el método “Process model” de la herramienta Matlab.

Para poder realizar la estimación del modelo se necesita elegir unos rangos para el posterior análisis, en la medición realizada se segmentaron los datos, como datos de trabajo, y datos de validación. A continuación, se muestran los datos seleccionados en Matlab.

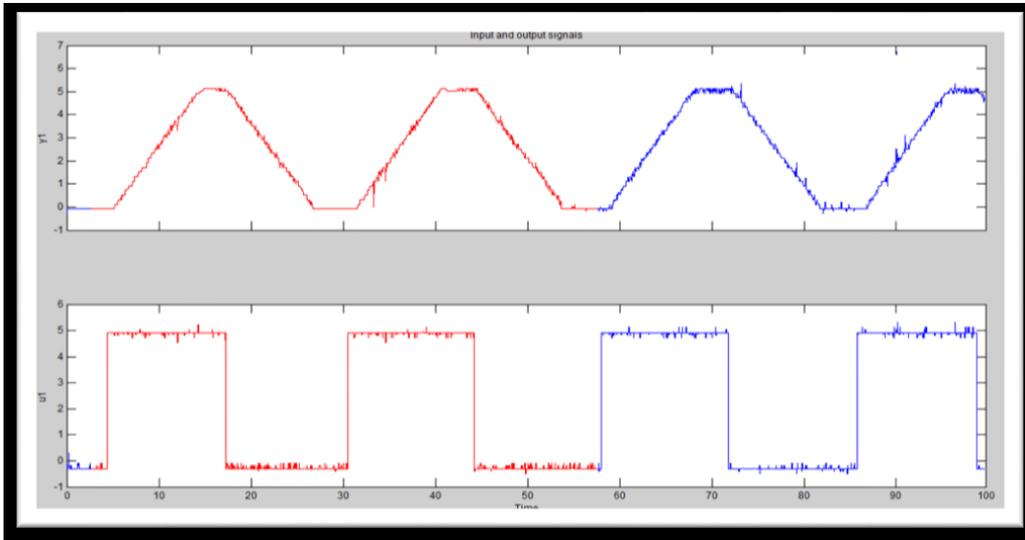


Figura 5.10.1.2. Datos utilizados para la validación y los datos de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

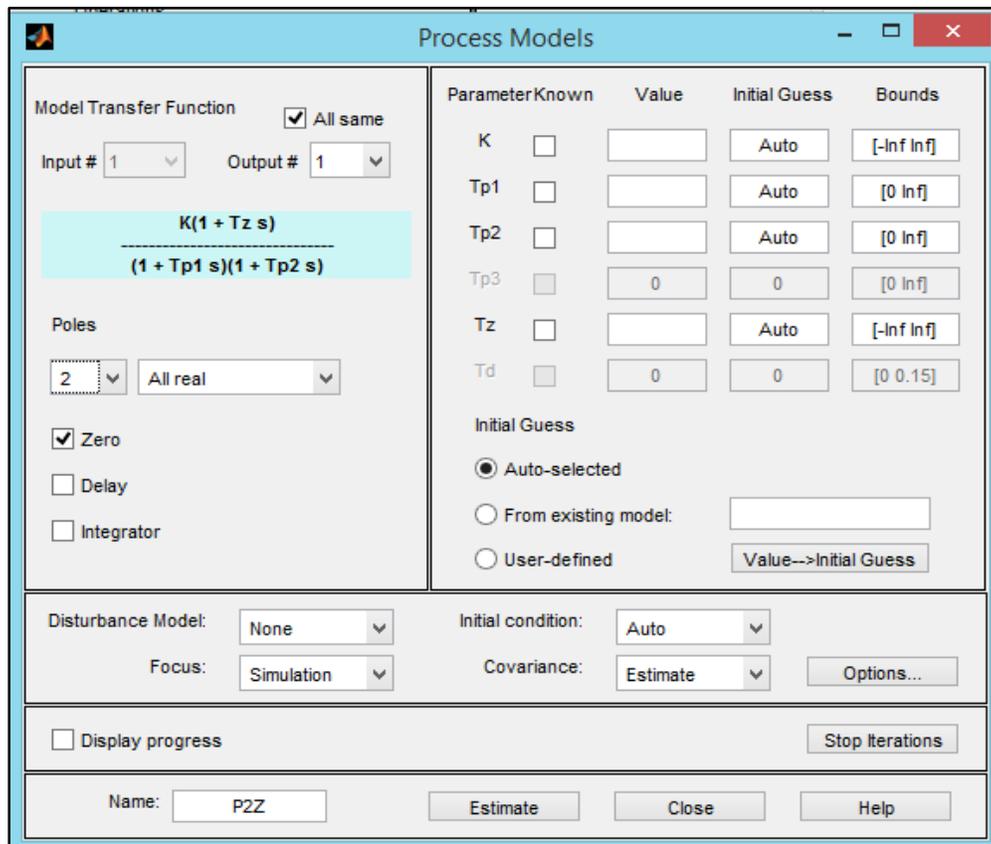


Figura 6.10.1.3. Ventana de configuración de la estimación. Fuente: Elaboración propia.

El modelo de la función de transferencia en el cual resultó con un 92% de exactitud, fue el siguiente:

$$G(s) = \frac{0.23267}{s(s + 0.04125)} \quad (12)$$

Como se muestra en la siguiente figura:

```

>> modelo92=MODELO(1);
>> modelo92

zero/pole/gain from input "u1" to output "y1":
      0.23267
-----
      s (s+0.04125)

Input groups:
      Name      Channels
      Measured      1
  
```

Figura 5.10.1.4. Función de transferencia con una exactitud del 92%

Compensador PID:

Una vez obtenida la función en tiempo continuo, se procede a transformarse a tiempo discreto en donde se utiliza un tiempo de muestreo de 100ms, de donde se obtiene la siguiente ecuación:

```

Transfer function:
      0.001162 z + 0.00116
-----
      z^2 - 1.996 z + 0.9959
  
```

5.10.1.5. Ecuación de transferencia en tiempo discreto.

Una vez con la función de transferencia procede a calcularse el compensador PID, mediante la herramienta *Sisotool* de Matlab, y se procedió a graficar el lugar de las raíces en tiempo discreto. El compensador se calculó en adelanto, puesto que esto varía la respuesta al sistema, y las especificaciones fue un tiempo de establecimiento equivalente al 5% menor a 13s, debido a que no se requiere un sistema que responda de inmediato, debido a que la válvula reaccionara de manera lenta. Con lo que se consiguió el siguiente valor de compensador.

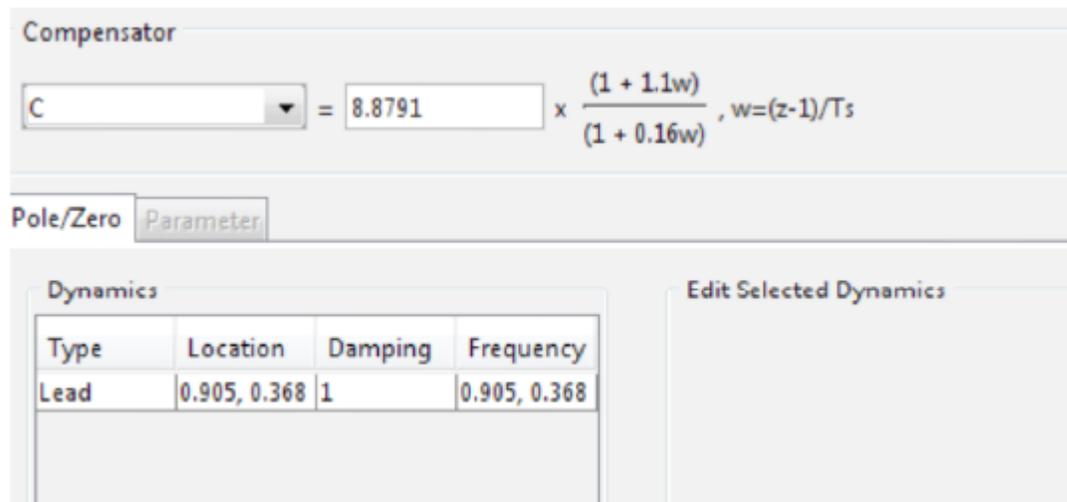


Figura 5.10.1.6. Variables de compensador en adelanto obtenido. Fuente:
Elaboración propia.

A continuación, se mostrará el lugar de las raíces obtenido con los valores de ceros y polos, además variando el valor de la ganancia estática para que se encuentre dentro de la zona de interés.

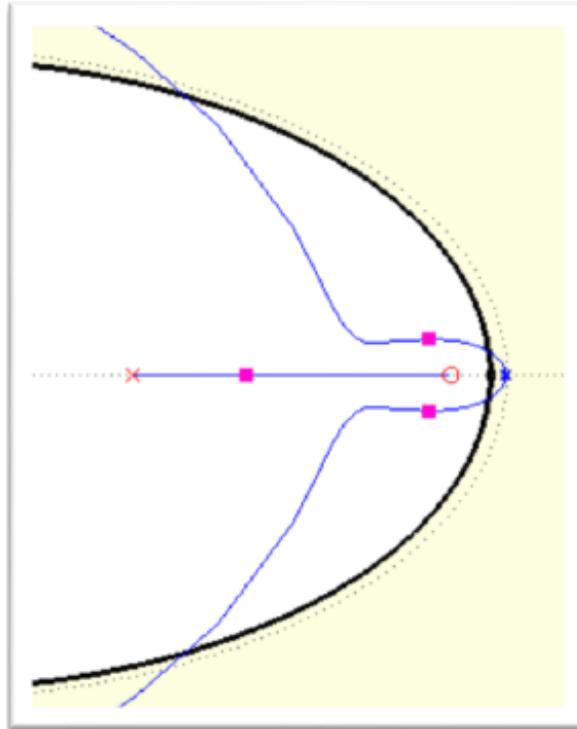


Figura 5.10.1.7. Lugar de las raíces de la válvula con el compensador. Fuente:
Elaboración propia.

La función de transferencia en tiempo discreto obtenida para el compensador corresponde a:

$$K(z) = \frac{58.9795(z - 0.9048)}{(z - 0.3679)} \quad (13)$$

De donde se obtienen los valores para las constantes PID, que corresponden a los siguientes valores:

$$K_p=145.05, K_i=0.368, K_d=26,37$$

Sin embargo, estos valores son teóricos, a la hora de implementarlo en el sistema de control variaron con respecto a estos valores, para ir mejorando los resultados, de los cuales se obtuvieron

5.10.2 Configuración de PID en HMC

En el controlador, se utilizó el siguiente bloque PID.

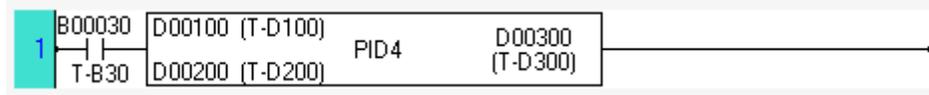


Figura 5.10.2.1 Bloque PID4 utilizado para la configuración del controlador.

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de ese bloque, se necesita especificar los siguientes parámetros, para que el sistema se encargue de realizar los cálculos para la salida del controlador.

Control parameter			Output data		
B	D200	Proportional gain (K_P)	C	D300	Manipulation Value (MV)
B+1	D201	Integral time (T_I)	C+1	D301	Previous error (e_{n-1})
B+2	D202	Derivative gain (K_D)	C+2	D302	Previous error (e_{n-2})
B+3	D203	Gap (dead-band) GP	C+3	D303	Previous MV (MV_{n-1})
B+4	D204	Scan Interval (T_S)			
B+5	D205	Action Type			

Input Data		
A	D100	Process Input value
A+1	D101	Set Value

Figura 5.10.2.2 Parámetros necesarios para la configuración del bloque PID.

Fuente: Elaboración propia.

La ecuación utilizada para realizar los cálculos que determinan el valor de las variables de salida es la siguiente:

$$M = M_{-1} \mp K_P * \left(e - e_{-1} + \left(\frac{e}{T_I} \right) * T_S + 1 \right) + K_D (e - 2e_{-1} + e_{-2}) \quad (2)$$

En donde los parámetros son los siguientes:

M: Valor de manipulación.

M_{-1} : Valor de manipulación anterior
 K_p : Constante de ganancia proporcional
 e : valor del error. Si la acción= reversa, $e = S - P$. Si la acción=avanzar, $e = P - S$
 e_{-1} : error anterior
 e_{-2} : error tras anterior
 T_I : Constante de tiempo integral
 T_s : Constante intervalo de escaneo
 K_D : Constante de ganancia derivativa
 S : Valor deseado
 P : variable de proceso.

Una vez elegido el bloque PID que se utilizará dentro del sistema de control, se procede a definir los valores que se utilizará para cada uno de los parámetros. Cabe mencionar que algunos valores no son de cálculo, si no de interpretación del sistema. Por ejemplo, el motor siempre gira en una dirección, por lo que el valor de tipo de acción corresponderá a 1 permanentemente.

A continuación, se mostrará una tabla con los valores elegidos para el controlador PID:

Tabla 5.10.2.1: Parámetros elegidos para la configuración del bloque de control PID4 implementado en el proyecto Implementación de un sistema de Control con interfaz de usuario para una tostadora de café Industrial TE-5 BENDIG

Parámetro	Dato establecido
Ganancia proporcional	125
Tiempo integrativo (s)	6
Ganancia derivativa	30
GAP (%)	95
Intervalo de escaneo (s)	0
tipo de acción	1

Fuente: Elaboración propia.

Habiendo elegido los parámetros se definió el diseño para tratar los parámetros PID. El usuario solicitó que las variables PID puedan ser manipuladas, ya que a futuro se podría hacer otro análisis y determinar que algunas de las variables necesitan ser modificadas; Sin embargo, solicitó que esas constantes estén resguardadas bajo algún sistema de seguridad, para que así no cualquier persona tenga acceso a esa información. Por lo que se ideó un diseño en el que la manipulación de los parámetros se encontrará en el menú; sin embargo, se necesitará de una contraseña para poder ingresar.

A continuación, se mostrará la secuencia de pasos para la manipulación de los datos de configuración del PID.

Primeramente, en la pantalla de inicio de debe seleccionar el botón de “Manipular datos PID”.

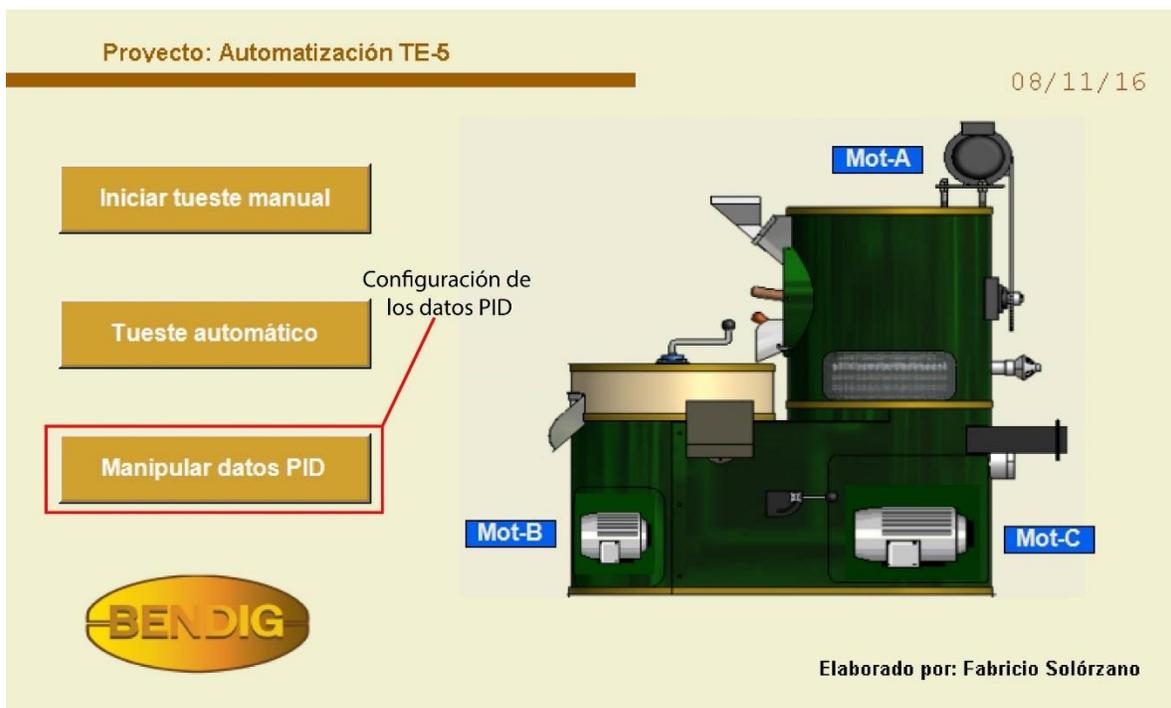


Figura 5.10.2.3 Pantalla principal del HMI indicando el botón para manipular los datos PID. Fuente: Elaboración propia.

Una vez seleccionado el botón para la manipulación de datos, se abrirá una pantalla en se solicitará la contraseña, aparecerá un teclado numérico junto con 3 opciones. “CLR”, “ENT” y “Abort”. La primera le permitirá al usuario borrar la contraseña, la segunda opción es la que permite revisar la contraseña, y la última opción le devuelve a la pantalla de inicio.

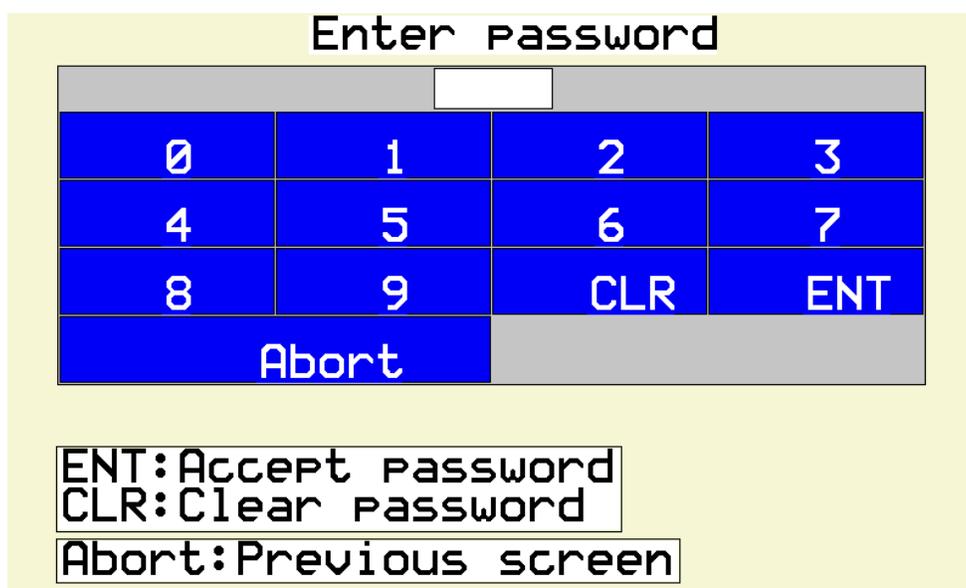


Figura 5.10.2.4 Pantalla para ingresar contraseña de verificación para acceder a los datos PID del controlador. Fuente: Elaboración propia.

Si la contraseña fue aceptada por el sistema, se ingresará a una pantalla en donde se mostrará los valores actuales que se encuentran en los registros de PID, así como se presentará una casilla en cada valor para poder cambiarlos en caso de ser necesario. Presenta 3 botones: “Menú”, “Formatear” y “cambiar datos”. El primer botón como su nombre lo dice, envía al usuario a la pantalla principal, el segundo, este botón permite en caso de haber cambiado los valores, volverse a los valores predeterminados. Y el último, es el que permite cambiar los datos que se encuentran en la configuración del PID.

Seguidamente se muestra la pantalla en donde se encuentran los datos del controlador PID, visto desde el interfaz humano máquina.

Proyecto: Automatización TE-5 08/11/16

Parámetro	Datos actuales	Cambiar por
Proporcional Gain	±99999	±99999
Integral Time	±99999	±99999
Derivative Gain	±99999	±99999
GAP	±99999	±99999
Scan Interval	±99999	±99999
Action Type	±99999	±99999

Input

±999999

P-Error1
±99999

Set Value

±999999

P-Error2
±99999

Manip Value

±999999

P-MV
±99999

Menú

Formatear

Cambiar datos

Elaborado por: Fabricio Solórzano

Figura 5.10.2.5 Pantalla para la manipulación de parámetros PID. Fuente: Elaboración propia.

5.11 Sistema de tueste implementado en la tostadora TE-5 y configuración del interfaz humano máquina para tueste manual

Para el sistema de tueste manual es necesario tener en cuenta varias consideraciones, para empezar, este es el tipo de tueste que se venía abarcando normalmente, inclusive existe un panel totalmente Manual, en el que el tostador tiene que elegir los motores a encender por medio de una botonera, existe un pequeño sistema de control en el que se puede elegir la temperatura a la que se desea llegar, y un reloj; sin embargo, la vida útil de este último es corta, por lo que en la tostadora en la que se implementó el proyecto, no funcionaba. Todo esto integrado en un panel como se muestra a continuación.



Figura 5.11.1 Panel de control incorporado dentro de la tostadora TE-5. Fuente: Elaboración propia.

Por lo que deseó replicar el proceso con el que normalmente se tuesta el café, pero de una manera más gráfica, automática e incorporando algunos elementos en el sistema, los elementos fueron:

- Graficar en tiempo real, tanto de las temperaturas deseadas, como de las temperaturas del horno.
- Un sistema de conteo de las tostadas diarias.
- Un reloj digital que se activa automáticamente cuando el sistema de tueste inicia.

Las características mencionadas anteriormente se aplican desde el punto de vista de interfaz humano máquina. Sin embargo, se le agregó una característica bastante importante desde el punto de vista de control que fue:

- Eliminar la botonera por sistemas de control digital que le permitieran automáticamente encender y apagar los motores, según la necesidad del proceso.

Debido a que implementó este sistema, los motores son encendidos o apagados según la necesidad del proceso, no del usuario, por lo que antes de entrar a este método de tueste, se presenta una advertencia, para que así el tostador esté consciente de este cambio en relación al sistema de tueste anterior.

Para elegir el sistema de tueste manual se debe de seleccionar en el botón “iniciar tueste manual” en la pantalla principal.

Seguidamente, se muestra la representación en el interfaz humano máquina.

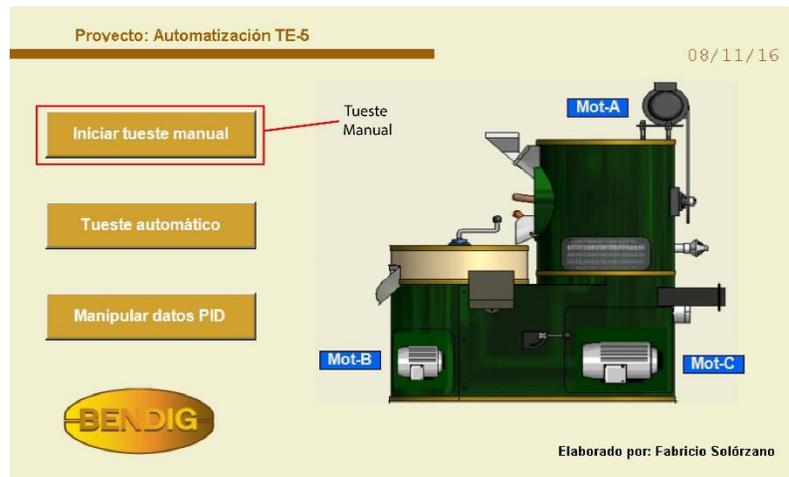


Figura 5.11.2 Pantalla principal del HMI indicando el botón que inicia el tueste manual. Fuente: Elaboración propia.

Una vez elegido, aparecerá una ventana de diálogo en el que se permite aceptar el sistema de tueste manual, e iniciarlo.

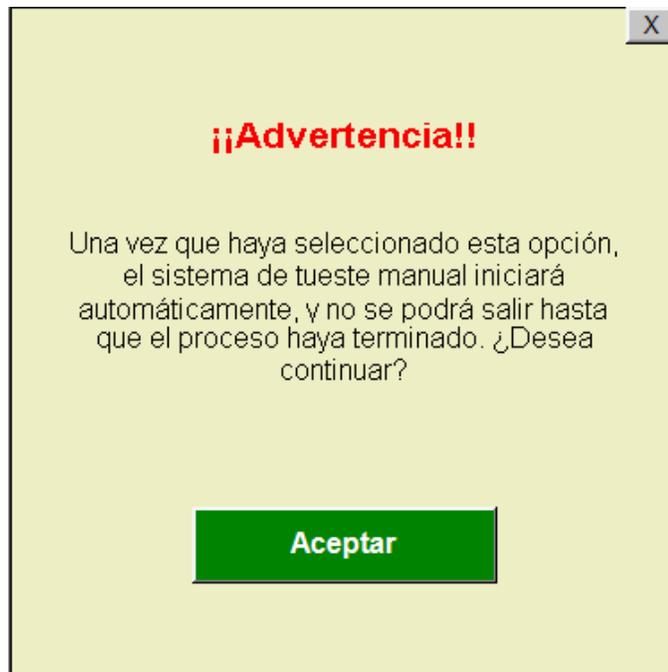


Figura 5.11.3 Mensaje de advertencia para tostado manual. Fuente: Elaboración propia.

A medida de seguridad fue que se implementó esa ventanilla de corroboración, puesto que una vez elegida la opción de aceptar se iniciará el sistema de tueste, encendiendo los motores del cilindro y del extractor, así como la válvula. Si no se hacía así, podían ocurrir que el usuario por error tocara el botón iniciar tueste, e inmediatamente después de haber encendido los elementos, optar por apagarlos, lo cual produciría un desgaste en los equipos, picos de corrientes no deseados, y en el peor de los casos el daño de algún equipo.

5.12 Requerimientos para la implementación del sistema de tueste manual

Habiendo elegido el equipo con el que se iba a trabajar, y con la configuración del para el encendido realizada, se procedió a realizar la configuración de control para el sistema de tueste manual. Con lo investigado tanto en literatura como por observación, se anotaron los requerimientos del sistema de tueste manual. Todos citados a continuación:

- Al iniciar el proceso de deben de encender 3 elementos: El motor del cilindro, el motor del extracto, y la válvula de gas.
- El motor del enfriado debe de encenderse cada vez que un tueste termine, por el tiempo mínimo de 6 minutos, esto debido a que el café necesita cuando menos ese tiempo para poder enfriarse.
- Una vez iniciado el proceso de tueste, los motores del cilindro, el extractor y la válvula de gas no deben de apagarse, puesto que la máquina debe de estar en constante tueste, sólo en la etapa inicial y final pueden haber menos de 3 tanda de café. Esto debido a que para mayor productividad la máquina debe tostar la mayor cantidad de tandas por día, y además de debe aprovechar el calor conservado en la máquina producido de tuestes anteriores.

A continuación, se procederá a mostrar una imagen en la que se ejemplifique las tandas, y en que secciones de la máquina se encuentran según el proceso

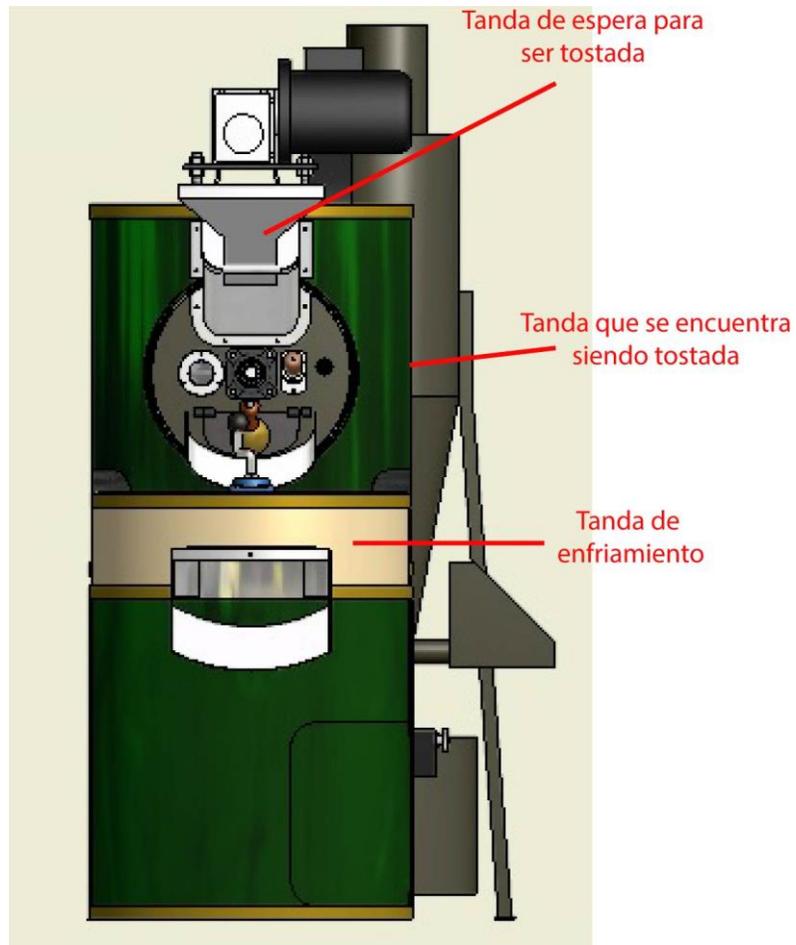


Figura 5.12.1 Representación gráfica de los diferentes procesos por los que pasa el café a la hora de ser tostado. Fuente: Elaboración propia.

- Cuando se decida implementar el último tueste, sólo deben permanecer el motor del enfriador, y el del extractor encendidos, esto con tal de aclimatar la máquina, y realizar el último proceso de enfriamiento.
- Debe de haber un botón que se encargue de apagar todos los elementos; es decir, los tres motores y la válvula.

5.12.1 Diagrama de flujo para la implementación del sistema de tueste manual

Una vez leyendo los requerimientos del usuario, se presenta el diagrama de flujo para la implementación del sistema de tueste manual dentro del controlador.

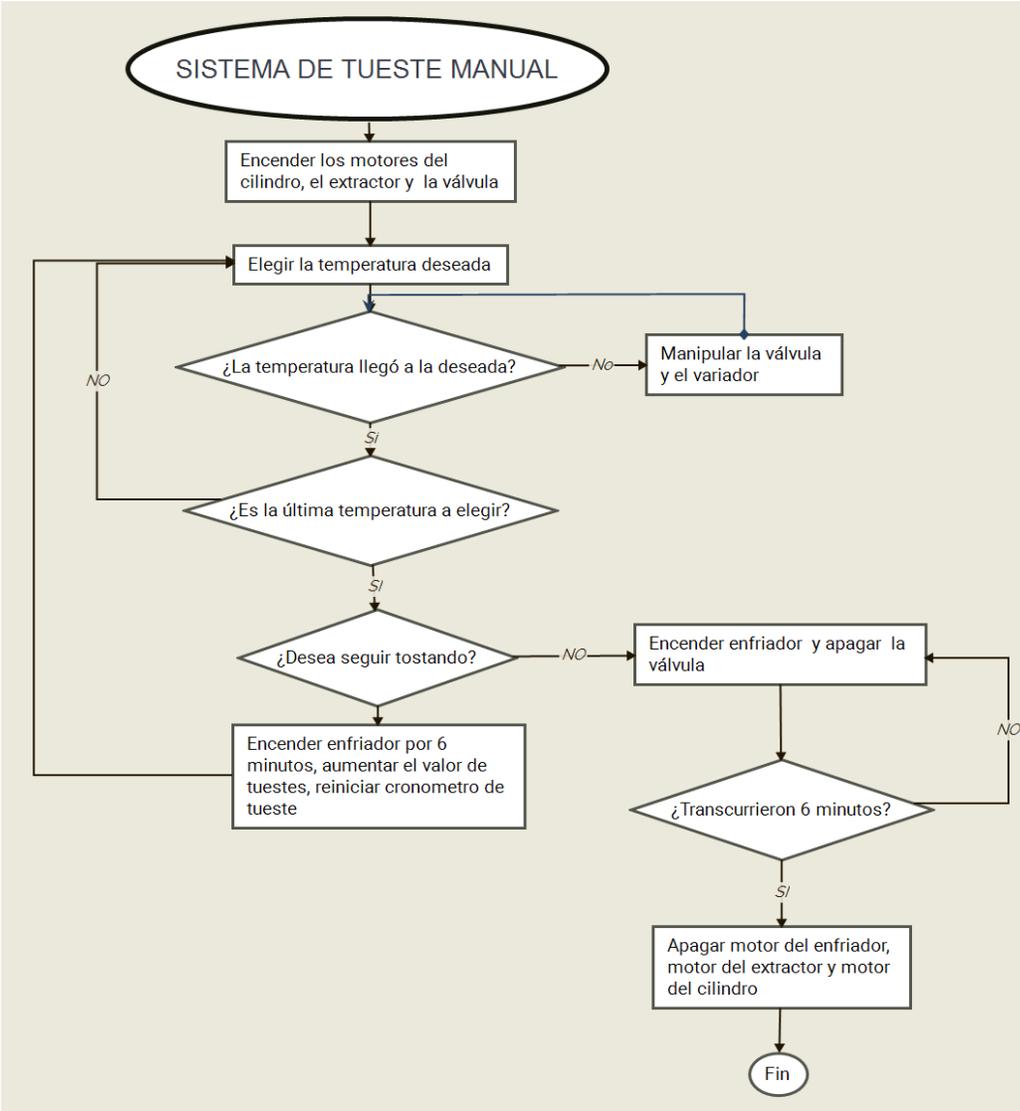


Figura 5.12.1.1 Diagrama de flujo con lógica de control para el sistema de tueste manual. Fuente: Elaboración propia.

Para la implementación del sistema de tuestes manual, como se muestra en el diagrama de flujo lo primero. El sistema de encendido automático se activa con la aceptación en la ventanilla emergente. Para ingresar la temperatura se implementó un sistema en la interfaz. La manipulación de la válvula y del variador se da por medio del bloque PID4, que se explicó con anterioridad. A continuación, se presenta la interfaz human máquina. Del sistema de tueste manual.



Figura 5.12.1.2 Interfaz para el sistema de tueste manual. Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la figura 6.12.1.2, la temperatura se debe ingresar dentro de la casilla “Temperatura deseada”, una vez que se toque la casilla, aparece la siguiente ventanilla con un teclado numérico decimal.

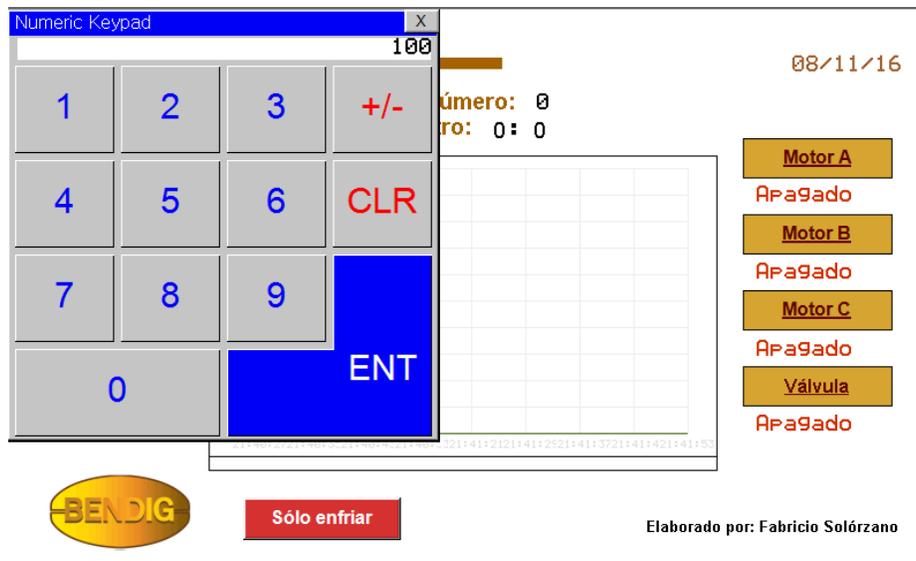


Figura 5.12.1.3 Teclado numérico decimal que permite el ingreso de la temperatura deseada en el sistema de tueste manual. Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se ya no se requiere seguir cambiando la temperatura deseada, se presentan dos panoramas, apretar el botón de cambio de café, que le permitirá al usuario aumentar el contador de número de tostadas, y además reiniciar el cronómetro, esto con tal de brindarle facilidad al tostador para poder llevar cronometrado cada tostada por separada. Y también está la opción de que esta sea la última tanda, por lo que una vez que termine de establecer la temperatura deseada, sólo quiera enfriar el café tostado. Si se presiona esta opción, la válvula debe de apagarse, y deben aparecer el botón que permite apagar la máquina. Es decir, apagar los motores restantes. La importancia de que este último botón aparezca hasta en el último proceso, es porque no se debe poder apagar la máquina de manera digital, sin haber realizado una tostada. Si ocurre alguna emergencia en el cual se desee parar la máquina, existe el botón de paro de emergencia, pero este es un botón físico que no se contempla dentro de la lógica de control.

A continuación, se presenta una figura donde se habilita el botón que permite apagar el proceso y poner todos los motores apagados.

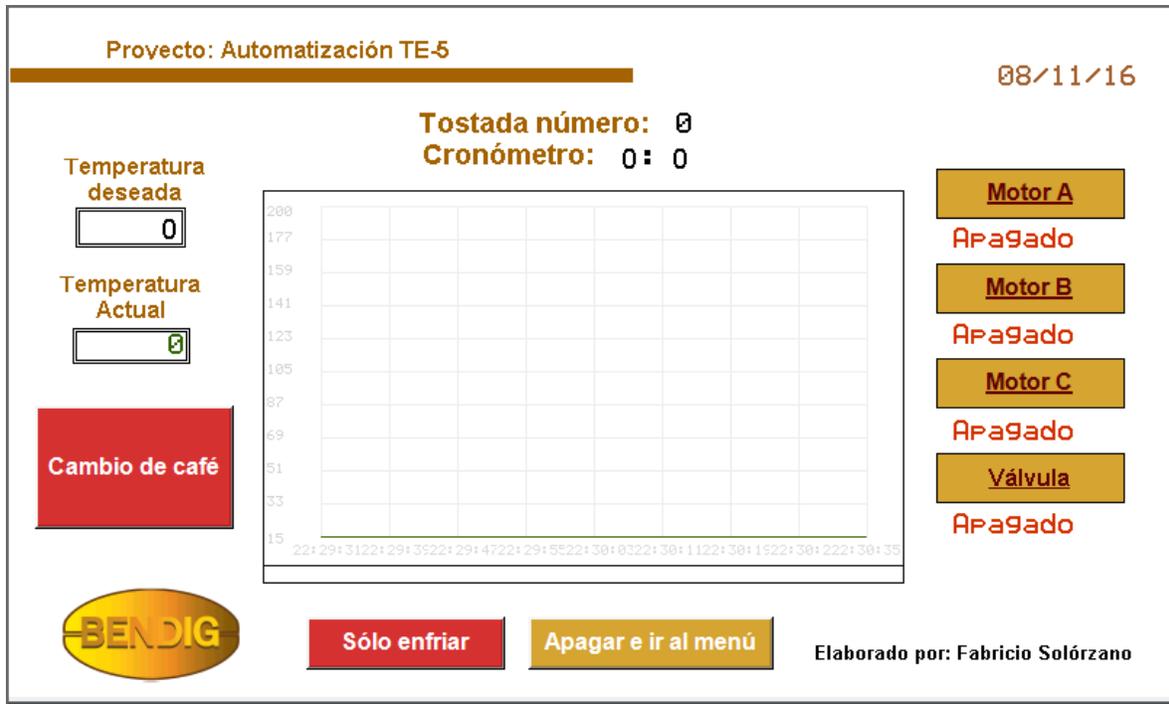


Figura 5.12.1.4 Interfaz para el sistema de tueste manual con botón de apagar e ir al menú habilitado. Fuente: Elaboración propia.

5.13 Implementación del sistema de control para el tueste automático

Terminado la implementación de tueste manual, se procedió a realizar la configuración e implementación de sistema de tueste automático dentro del sistema de control HMC. Para este proceso también fue necesario la consulta de en fuentes bibliográficas, pero como el proceso de tueste de café es tan cambiante, se hicieron investigaciones por medio de observación y consejos de catadores especializados en tueste de café. Los requerimientos para este sistema de tueste fueron los mismos que para el tueste manual, con la incorporación de otros, buscando la mayor cantidad de elementos automáticos dentro del tueste de café. A continuación, se mencionan los requerimientos especiales para el sistema de tueste automático:

- I. Implementar un sistema de curvas automáticas, es decir que la temperatura automática se vaya cambiado de manera automática.
- II. Que este sistema sea capaz de implementar únicamente si ya se realizaron 3 tostadas previas

Para el primer requerimiento se presentaron 2 opciones para implementarse:

- Un sistema de réplicas de curvas con temperaturas y duraciones previamente calibradas dentro del control.
- La segunda opción fue implementar un sistema que pidiera el ingreso de máximo diez distintas temperaturas, y diez distintos intervalos de tiempo para replicar las curvas de tueste.

Para la configuración de la toma de datos, se decidió implementar el sistema que solicitara las diez temperaturas e intervalos de tiempo, debido a que como se ha mencionado anteriormente la temperatura de proceso es muy cambiante, inclusive el segundo requerimiento es porque según análisis realizados por los tostadores hasta la cuarta tostada se presenta lo que ellos llaman el equilibrio térmico en la tostadora, lo que implica que todos los pasos del tueste se realizan a la misma temperatura por la misma cantidad de tiempo, es decir, después del tercer tueste se puede estandarizar para esa cosecha. Cabe destacar que, si se apaga la

máquina, así sea con la misma cosecha de café, es necesario volver a alcanzar el equilibrio térmico en la tostadora, que de igual manera se encuentra en la 4 tostada.

Mientras que, para el segundo requerimiento, se implementó un contador en el sistema de control, que cuando llegara a 3, se activara una bobina digital, y el botón de ingresar receta en el sistema de tueste depende del valor de esa bobina.

Seguidamente se mostrará el interfaz humano máquina realizado para este proceso.

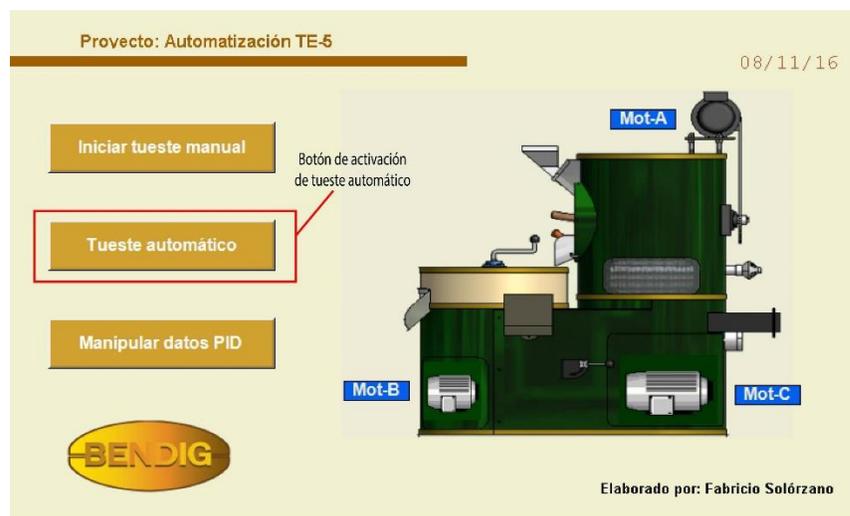


Figura 5.13.1 Pantalla principal del HMI indicando el botón que inicia el tueste automático. Fuente: Elaboración propia.

Una vez habiendo elegido ese botón, aparecerá una ventanilla, explicando cómo funciona el sistema de tueste automático, también, como en el sistema de tueste manual, funciona como mecanismo de protección, para asegurarse de que el usuario realmente quiere ingresar al sistema de tueste automático.



Figura 5.13.2 Mensaje de advertencia para tostado automático. Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se aceptó esta opción se abrirá la ventanilla de tueste manual, y el proceso de tueste será el mismo, hasta que se llega al cuarto tueste. Una vez aquí, se habilitará un botón que permitirá ir la ventanilla de ingreso de las temperaturas.

A continuación, se muestra la ventanilla con el botón que permite ingresar las temperaturas de tueste.

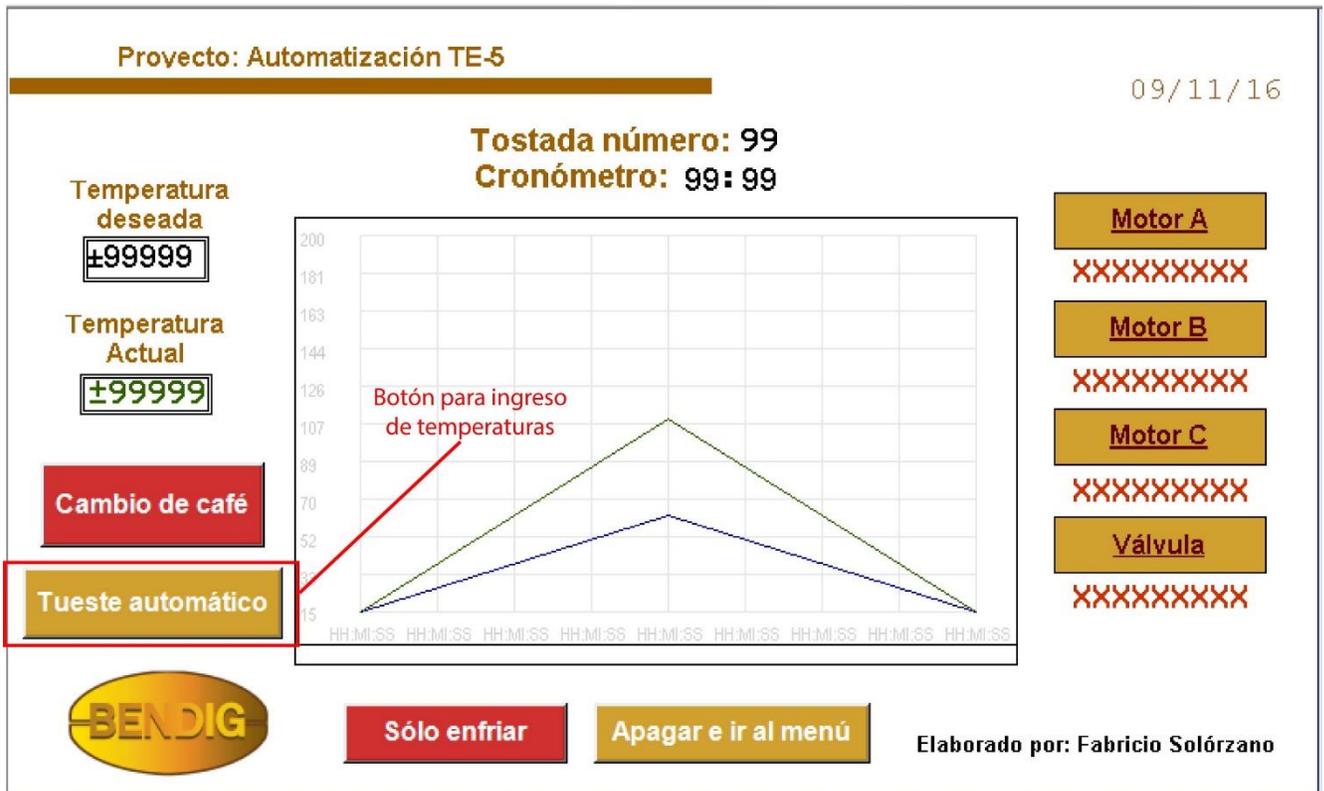


Figura 5.13.3 Interfaz para el sistema de tueste automático con botón de tueste automático. Fuente: Elaboración propia.

Cuando se habilita el botón, se puede elegir la opción de tueste automático, o seguir tostando de la manera manual, en caso de ser elegida la opción de tueste automático aparecerá la ventanilla en el que se podrá elegir los 10 valores de temperatura deseada, y además los rangos de tiempo que desea que esa temperatura se mantenga.

La configuración del HMI para ingresar el valor de las temperaturas y los rangos de tiempo se muestran a continuación.

Punto	Temperatura	Tiempo (Minutos)	Tiempo (Segundos)
N° 1	0	0	0
N° 2	0	0	0
N° 3	0	0	0
N° 4	0	0	0
N° 5	0	0	0
N° 6	0	0	0
N° 7	0	0	0
N° 8	0	0	0
N° 9	0	0	0
N°10	0	0	0

Iniciar tueste

Volver

Nota: Los tiempos corresponden al valor del tiempo que quiere que dure el proceso, no a tiempo de tueste que quiere que se cambie la temperatura. Por ejemplo, si quiere que el segundo cambio del proceso dure 3 min y 15 seg a una temperatura de 150 grados lo coloca así en el espacio N° 2

Figura 5.13.4 Sistema de ingreso de temperaturas con sus respectivos tiempos de duración. Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se elige el sistema de tueste automático la ventana de tueste se mantiene como en la figura 6.12.1.4; es decir, se elimina el botón de tueste automático.

5.13.1 Diagrama de flujo para la implementación de un sistema de tueste automático

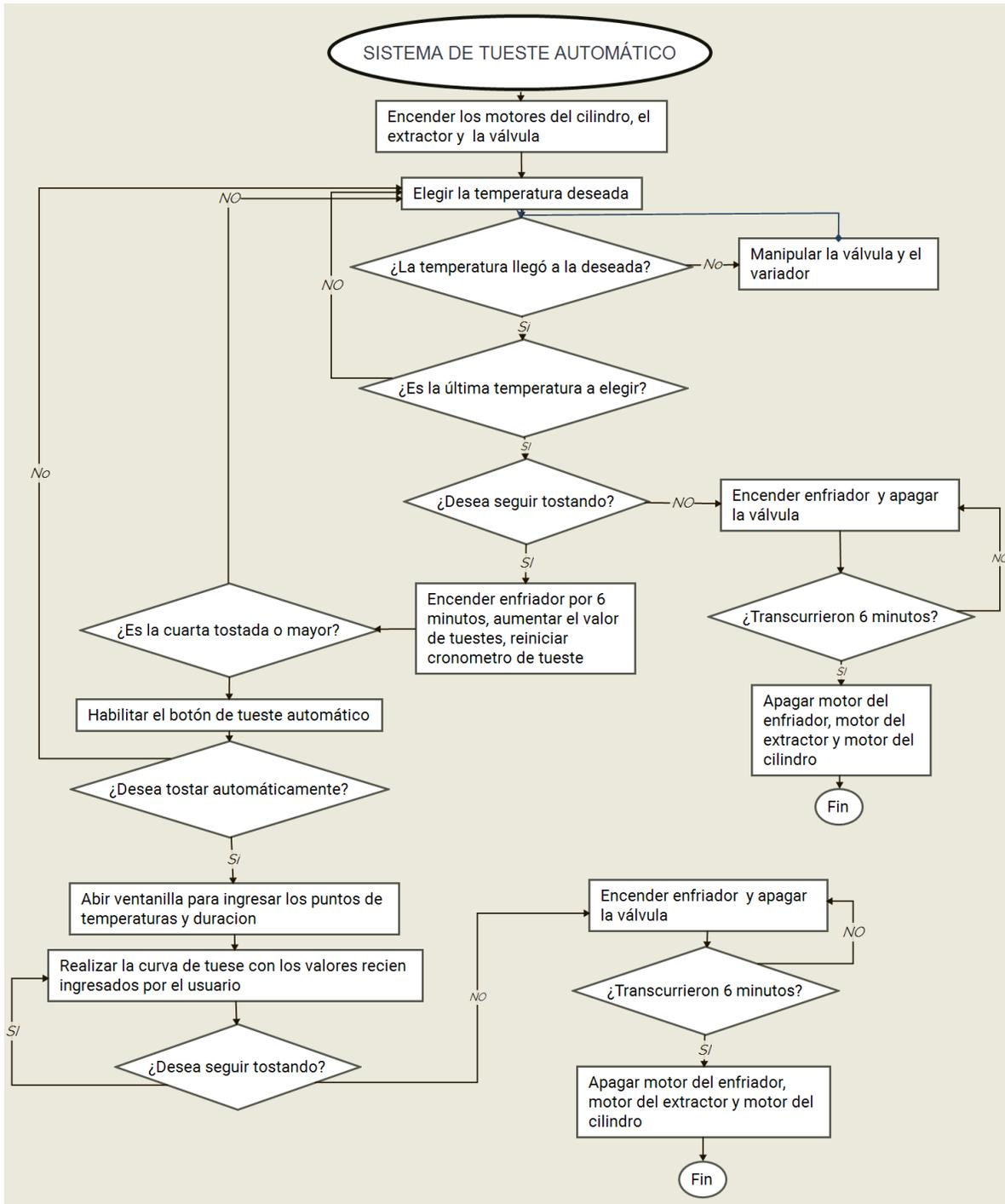


Figura 5.13.1.1 Configuración para el sistema de control del sistema de tueste automático. Fuente: Elaboración propia.

Realizado el diagrama de flujo se procedió a realizar la configuración dentro del sistema de control.

Basándose en los diagramas de flujo para comparar los sistemas de control tanto para el sistema manual, como el sistema automático se muestra que el sistema automático utiliza como base el sistema de control para el sistema manual con la extensión del botón que permite ingresar las temperaturas y los intervalos de tiempo.

Agregar esa lógica de control implicaba incorporar nuevos registros que variaban el valor de la temperatura deseada dentro del sistema PID. El desplazamiento de esos valores debía realizarse por medio de bloques que permiten asignar un valor deseado a un registro en específico, para este caso, el registro que se encarga de fijar la temperatura que el bloque PID desea alcanzar. Además, la activación del desplazamiento de esos valores debía realizarse por una entrada independiente al sistema de tueste manual. Cabe mencionar que como eran 10 temperaturas, se debe realizar 10 veces la permuta del valor de la temperatura deseada, y del tiempo que se debe durar para llegar a esa temperatura, por lo que debió de integrarse un algoritmo en cascada, es decir que una temperatura permanezca el tiempo elegido, y que cuando ese tiempo termine, se desactive, y active el valor de la temperatura siguiente.

La configuración que se utilizó fue unos bloques “*move*”, uno para la temperatura, y uno para el tiempo. que dependen de una bobina digital que se activa cuando el botón de tueste automático se presiona, eso lo aísla del tueste manual.

Seguidamente se procederá a mostrar la configuración dentro del programa del HMC

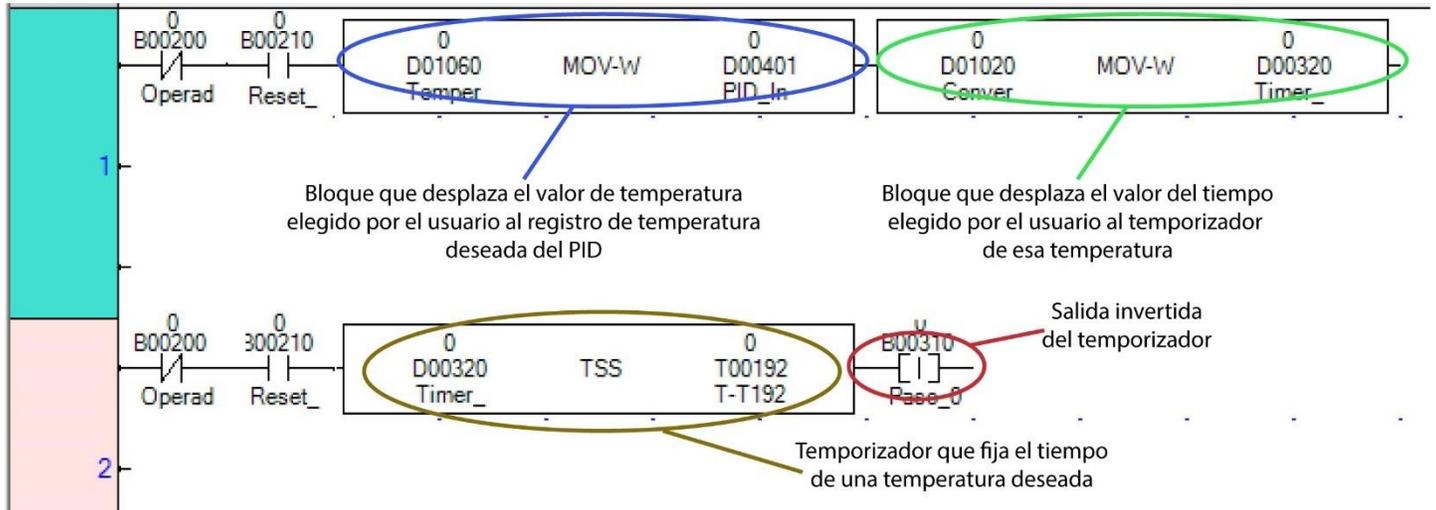


Figura 5.13.1.1 Configuración en diagrama escalera del bloque para temperatura automática. Fuente: Elaboración propia.

Para la implementación de la activación en cascada, fue necesaria aplicar un diagrama de tiempos, para ver el comportamiento de las salidas de los temporizadores con respecto al bloque que debía activar.

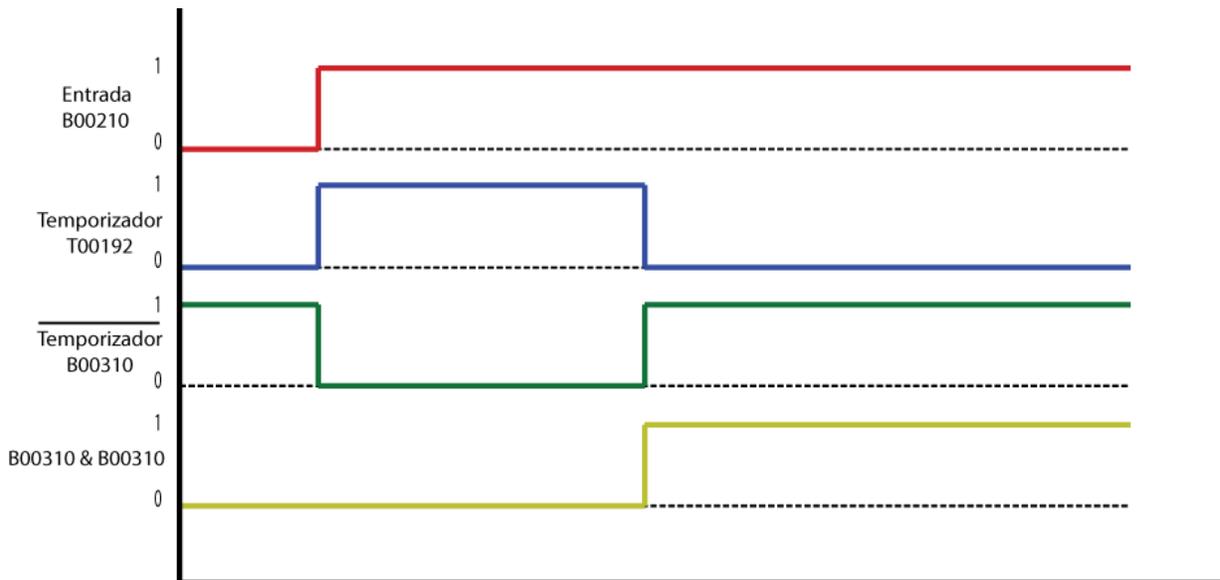


Figura 5.13.1.2 Diagrama de tiempos para determinar la función que permite que el estado anterior active el estado siguiente. Fuente: Elaboración propia.

De ese diagrama se puede concluir que la activación de los estados siguientes con respecto al temporizador viene dada por la función de la activación anterior y la salida invertida del temporizador. Como se muestra a continuación.

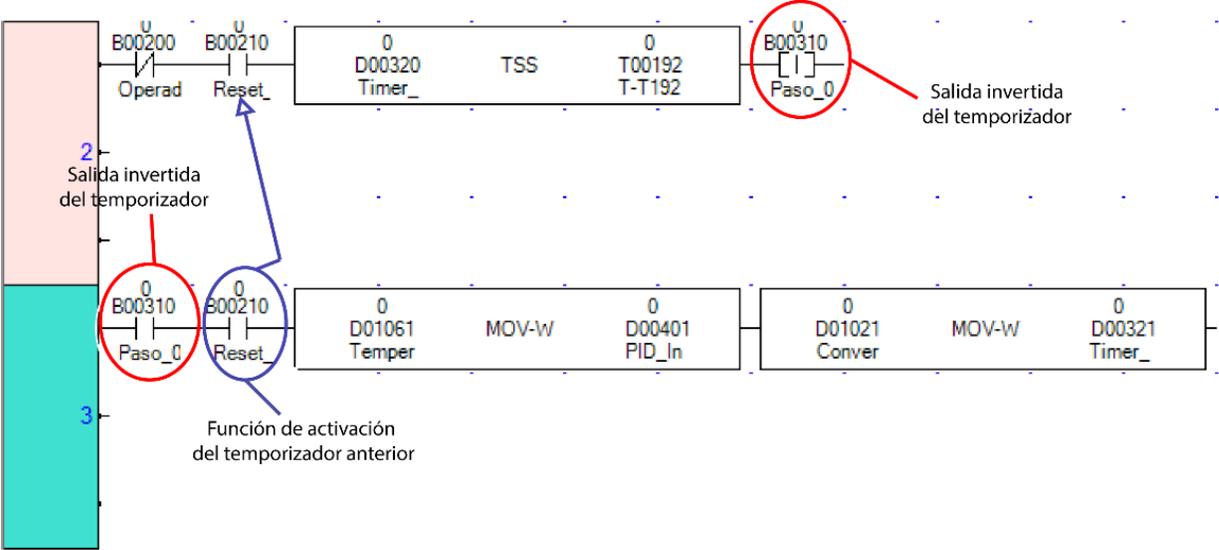


Figura 5.13.1.3 Representación de función de activación en diagrama escalera.

Fuente: Elaboración propia.

6 Análisis económico

6.1 Presupuesto

Una de las condiciones de la empresa en la cual se realizó el proyecto, fue trabajar bajo el margen de un presupuesto, a continuación, se muestra desglosado el presupuesto brindado.

Tabla 6.1.1 Presupuesto asignado para el desarrollo del proyecto: Implementación de un sistema de Control con interfaz de usuario para una tostadora de café Industrial TE-5 BENDIG

Equipo	Costo (Dólares)
<i>Tostadora TE-5</i>	9200
<i>Pantalla HMI + controlador</i>	3000
<i>Válvula proporcional</i>	2000
<i>Sensor térmico (*)</i>	1000
<i>Variador de frecuencia</i>	500
<i>Datos imprevistos</i>	1000
<i>Horas trabajadas</i>	2000
Total	18700

Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que la máquina tostadora TE-5 ya estaba fabricada, por lo que presupuesto real del proyecto sería US\$9500.

6.2 Gastos incurridos

A continuación, se muestra una tabla con los gastos incurridos, además del detalle de la inversión.

Tabla 6.2.1 Gastos incurridos en el desarrollo del proyecto: Implementación de un sistema de Control con interfaz de usuario para una tostadora de café Industrial TE-5 BENDIG

Equipo	Costo (Dólares)
<i>Máquina TE-5</i>	9200
<i>Pantalla HMI + controlador</i>	1550
<i>Válvula proporcional</i>	1550
<i>Sensor térmico (*)</i>	852,86
<i>Variador de frecuencia</i>	300
<i>Datos imprevistos</i>	180
<i>Horas trabajadas</i>	2000
Total	15632,86

Fuente: Elaboración propia.

Como en la sección anterior, es necesario especificar que la máquina ya se encontraba, por lo que en gastos meramente del proyecto se invirtió US\$6432,86. Como ganancia para la empresa, se implementó un nuevo servicio de tueste en las máquinas TE-5, el cual permite competir a nivel de calidad contra empresas que presentan el mismo servicio, puesto que las máquinas en el mercado con el servicio de tueste automático rondan los US \$28 000.

Además, acapara otro sector de los productores de café tostado, que son aquellos que abogaban por la implementación de sistemas de control automático dentro de las tostadoras, o aquellos que deseaban poder replicar curvas de tueste de manera automática.

7 Proceso de validación

7.1 Validación

Se examinará el cumplimiento de los objetivos planteados, así como los mecanismos que sirvieron para detectar si se desarrollaron en un cien por ciento. Dicha validación debe de cumplirse para los objetivos en específico, y la suma del cumplimiento de esas labores, deben completar la ejecución del objetivo general.

Las pruebas para la verificación de los objetivos no se realizaron en conjunto, es decir, no se implementaron en la máquina tostadora de café, esto por choque de fechas entre la entrega en el Instituto Tecnológico de Costa Rica y Bendig Maquina, La diferencia es de 3 semanas, sin embargo, se probó con todos los componentes por aparte, pero aún no se ha podido integrar.

7.1.1 Colocación del dispositivo de medición adecuado

Como se fue desglosando dentro del desarrollo del proyecto, se decidió cambiar el sensor de medición para los procesos de tueste, debido a que se consideró que la termocupla presente dentro del sistema no era la más indicada, ni para la medición, y así le restaba fiabilidad a la hora de implementar el sistema de control.

Como pruebas se realizaron 6 tostadas en donde se encontraban 2 termómetros simultáneos realizando la medición, el sensor infrarrojo y la termocupla. Durante el tueste y una vez terminado, se empleaba un termómetro de contacto, para medir la temperatura real. Del tueste del café. Comparando resultados después de los 6 tuestes, se verificó que, en efecto, la termocupla no medía la temperatura del café en sí, algo que, si lograba el sensor infrarrojo, puesto que los datos del sensor infrarrojo estaban más cercanos al valor reportando por el termómetro de contacto.

7.1.2 Prueba de sistema de control manual

A lo largo del desarrollo del proyecto se ha ido mostrando imágenes en las que se puede visualizar la configuración en el HMI que permite el sistema de tueste normal, como mecanismo de verificación se programaron salidas y entradas digitales al sistema, en donde se podía ver el funcionamiento de todos los módulos, por último, se conectaron los elementos a controlar, tanto el variador como la válvula, y se fijó una temperatura intermedia para poder realizar mediciones en donde la variable de procesos, es decir, el sensor infrarrojo podía realizar medidas por encima de ese valor y por debajo. Una vez que la temperatura subía por encima del valor fijado, la válvula se cerraba y el motor aumentaba la velocidad, buscando el punto de equilibrio, mientras que cuando la temperatura estaba por debajo, la válvula de gas se abría y el motor reducía la velocidad. Estas pruebas no se hicieron con el variador y la válvula integradas, se hicieron con estos elementos desconectados; Sin embargo, fue suficiente para determinar que la lógica de control estaba funcionando, una vez que se integren, bastaría variar valores para ajustar al proceso.

Por otro lado, se conectaron los relés encargados de habilitar la parte de potencia, es decir que permite el encendido y apagado de los elementos por medio de entradas de 24V. Estos también se probaron por separado y el funcionamiento fue el óptimo, se implementó para un motor monofásico de 110 V. Al igual, estas pruebas fueron suficientes para determinar que el sistema de tueste manual funcionaba en su totalidad, y los problemas que se presenten ya no serán del tipo de ingeniería, ni conciernan al proyecto.

7.1.3 Pruebas de sistema de control automático

Para este sistema se utilizan los mismos elementos que el sistema de tueste manual, lo único que varía son los estados digitales, pero dentro de la lógica de control, por los que los mecanismos de validación fueron los mismo, por excepción de la corroboración de que el mecanismo no necesitara de ninguna manipulación humana para variar el valor de la temperatura deseada. Para verificar este proceso, se ingresaron 3 sistemas de temperaturas deseadas, y se corroboraron. La variación de las temperaturas fue exitosa por lo que se corroboró que la configuración de la lógica de control fue exitosa. Cabe mencionar que en las temperaturas deseadas se aplicó el mismo sistema de elegir temperaturas por encima de la variable de proceso, y por debajo de la variable de proceso, y los elementos de control, tanto el variador como la válvula, respondieron exitosamente.

7.1.4 Precio de la máquina con sistemas de control implementado

Para validar el precio de la máquina es necesario compararla con tostadoras existentes en el mercado que posean sistemas de control similares. En Costa Rica la industria cafetalera es bastante grande y reconocida, a continuación, se mencionará algunas de las que se encargan de vender tostadoras de café:

- Bendig Maquinaria
- Maquinaria Industrial JOCA SA
- Distribuidora espresso
- Jura Costa Rica
- TAMECO

Para la validación de esta sección, se pretende comparar el precio de la tostadora con el sistema de control implementado con respecto a la competencia existente en el mercado. Se hizo una labor de investigación para investigar los precios en el mercado. A continuación, se adjunta una imagen de una cotización realizada a una de las empresas anteriormente mencionada, que por motivo de discreción no se mostrará el nombre.



Modelo IR-5: Capacidad 5 Kg. por tanda

Especificaciones Estandar

Placa Frontal de Acero Inoxidable

Bandeja de Enfriamiento de Acero Inoxidable

Electricidad: 110V / 60 Hz

Display Digital: Grados de Temperatura Fahrenheit o Celsius

Tipo de Gas: Propano Liquido o Natural

Descripción	IR-5	IV	Total IVI
Tostadora de Café Diedrich (1 color)	\$25,000	\$3,250	\$28,250
Opciones Funcionales opcionales			
Kit de Herramientas para Limpieza	\$625	\$81	\$706
Lampara Luz	\$500	\$65	\$565
Tolva de Acero Inoxidable	\$500	\$65	\$565
Zenyth II Automatización	\$18,500	\$2,405	\$20,905
Paquete Termopares para Artisan/Cropster - Registro de Datos	\$950	\$124	\$1,074
Embalaje, Caja Madera para Transporte	\$500	\$65	\$565

Figura 7.1.4.1 Cotización de una tostadora de 5 kilogramos por bache con sistema de control equivalente a la tostadora TE-5. Fuente: Elaboración propia.

Comparando la figura 8.1.4.1. Con la tabla 7 se nota que el precio de la tostadora producida en Bendig Maquinaria es inferior en más de 12 000 dólares. Sin embargo, esta máquina tiene sistema de carga y descarga automática para el café, lo que implicaría agregarle algunos sensores más, y unos pistones eléctricos. Pero sin embargo los adicionales no se pueden contemplar dentro del proceso de tueste, son más adicionales que facilitan la manipulación, pero son externos al tueste.

Por lo que implementarse el sistema de tueste automático da un valor agregado a la tostadora, y a un precio muy inferior a su competencia.



Figura 7.7.1.2. Tostadora Diedrich IR-5 distribuida en Costa Rica. Imagen tomada de [10]

8 Conclusiones

- Se implementó un sistema de tueste manual con mecanismos de control y visualizado en un interfaz humano máquina, todo esto integrado en un solo componente llamado HMC.
- Se implementó un sistema de tueste automático el cual permite poder establecer 10 puntos de temperaturas deseadas
- Se cambió el sistema encargado de sensor la temperatura por un sensor infrarrojo que es óptimo para la medición de objetos en una zona de difícil acceso.

9 Recomendaciones

- A la hora de implementar sistemas de control en el tueste de café se debe de controlar una variable que no varíe con respecto a las condiciones del ambiente, si no propia del grano. La medición se debe realizar directamente sobre el objeto a controlar ya que medir propiedades dependientes podría hacernos incurrir en un error.
- Para el cálculo de las constantes PID de compensador se recomienda utilizar la herramienta del software Matlab *SISO TOOL*
- Verificar el valor de la emisividad del producto a sensar antes de incorporar un sensor infrarrojo.

10 Referencias bibliográficas

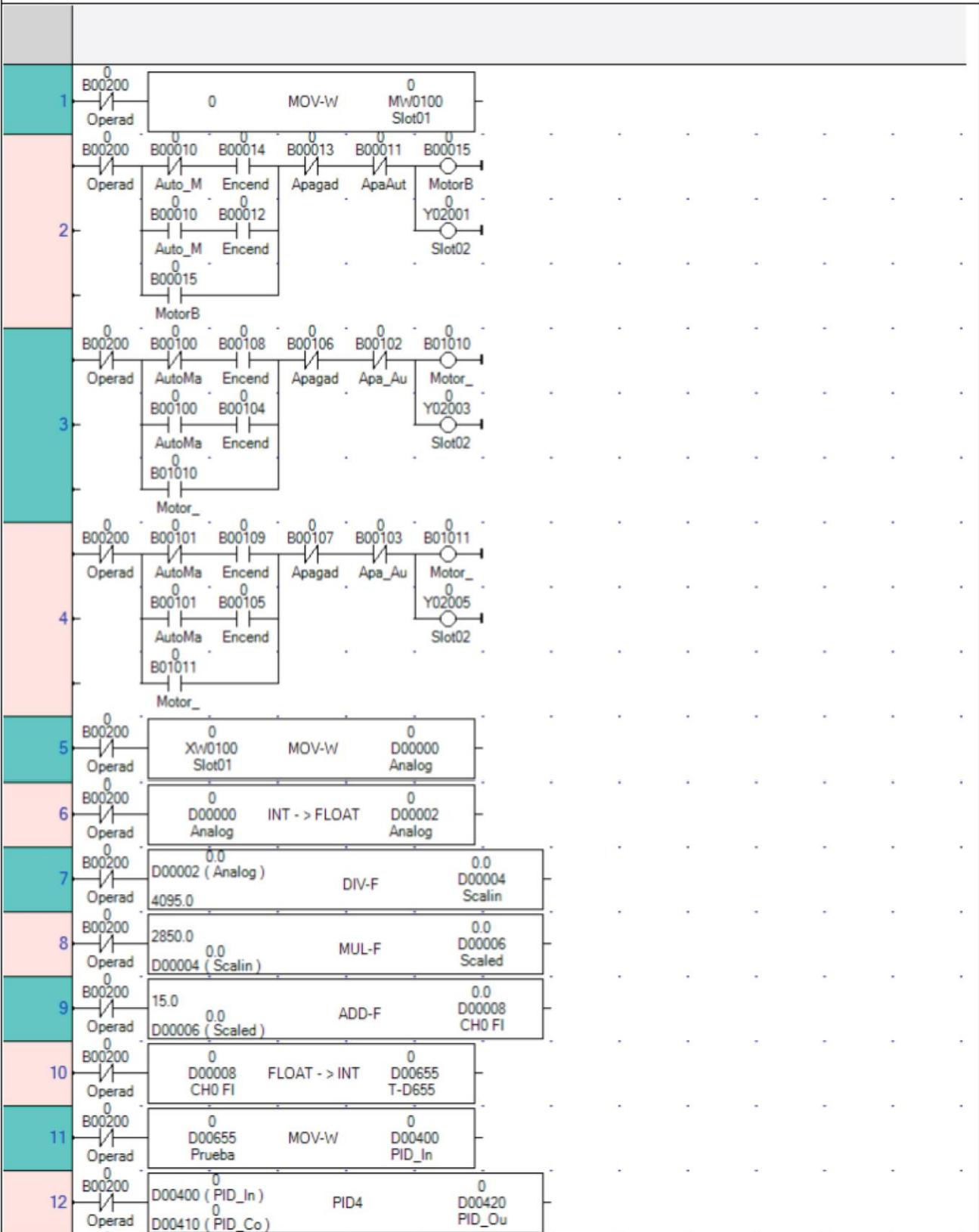
1. Bausa, J., García, C., Zaragozí, B., Gil, A., Moreno, D. & Galiana, A. (s. f.). Sensores de temperatura. Recuperado el 05 de noviembre del 2016, de http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/LSED/2003-04/0.Sens_Temp/ARCHIVOS/SensoresTemperatura.pdf
2. Bustamante, E. (2006). Curso: Control Industrial. Mediciones de Presión, Flujo, Nivel y Control básico. (Primera ed.) Manuscrito no publicado.
3. Cortijo, J. (s. f.). El mundo del café. Recuperado el 25 de octubre del 2016, de <http://www.josedanielcortijo.com/cafe.pdf>
4. El Financiero (2016). *Ingreso medio por persona a nivel mundial es de \$2.920 anuales, según Gallup*. Recuperado el 08 de Agosto del 2016, de http://www.elfinancierocr.com/finanzas/Ingreso-persona-mundial-Gallup_0_428957116.html
5. Giner, J. (s. f.). Tueste de café Recuperado el 25 de octubre del 2016, de http://www.forumdelcafe.com/pdf/F-37_Tueste_de_cafe.pdf
6. INSTITUTO DEL CAFÉ DE COSTA RICA (2014). *INFORME SOBRE LA ACTIVIDAD CAFETALERA DE COSTA RICA* Recuperado el 08 de Agosto del 2016, de http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/informacion_mercado/informes_actividad/actual/InformeActividadCafetalera.pdf
7. Leyva, J. (2009). INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS: PRESIÓN, CAUDAL, TEMPERATURA Y NIVEL Recuperado el 06 de noviembre del 2016, de <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/32815/1/leyvaretajose.pdf>
8. Ogata, K. (2003). Ingeniería de Control Moderna (4ta ed.) Madrid, España: PEARSON EDUCATION, S., A.
9. Raytek Corporation (2005). Noncontact Temperature Sensors with Remote Addressability. [Ilustración]. Recuperado de <http://>

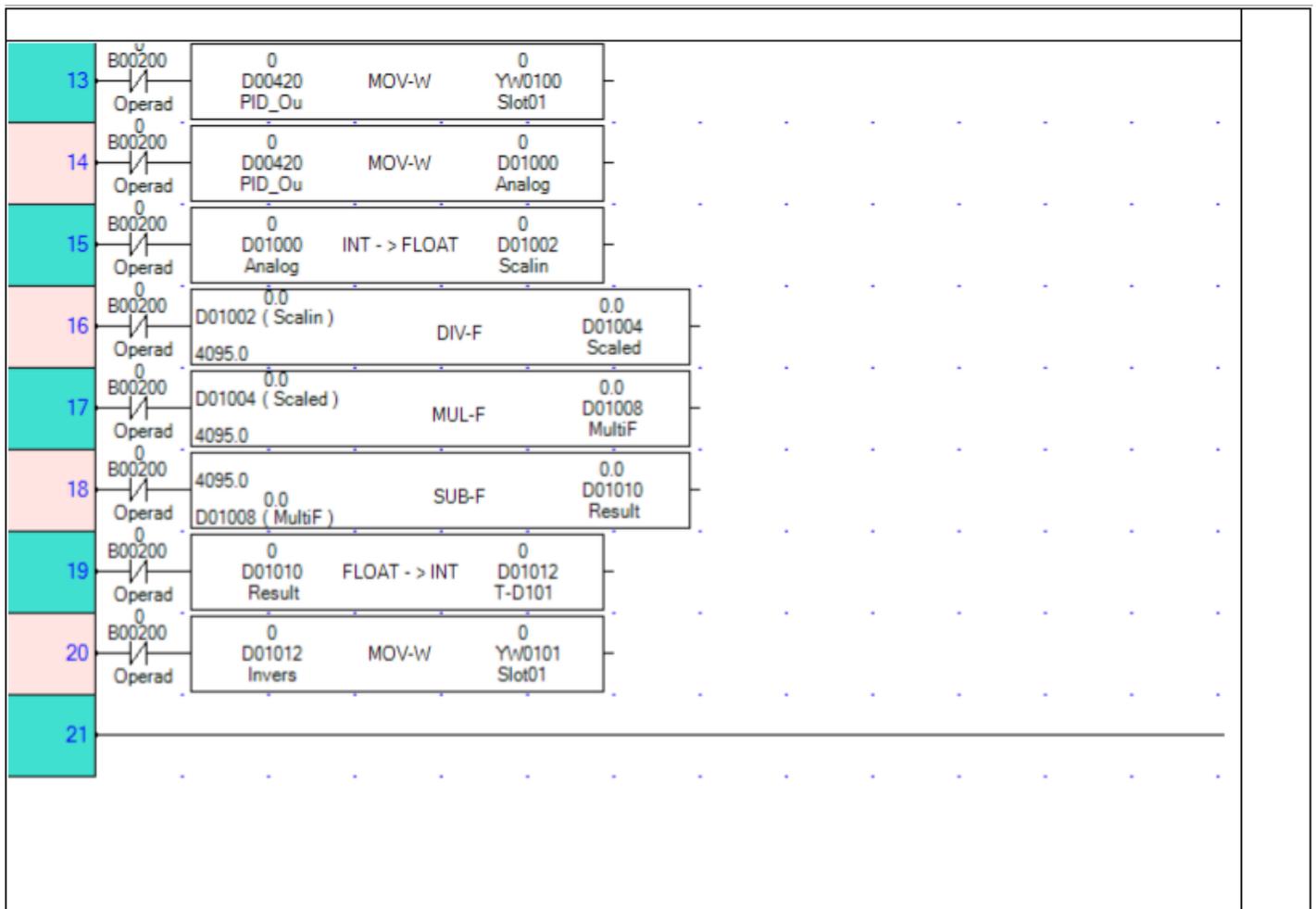
http://support.flukenetworks.com/Raytek-Sales/Download/Asset/9250129_ENG_C_W.PDF

10. Servicios de Restaurante y Bar. (2012). Estructura del fruto y grano de cafeto. [Ilustración]. Recuperado de <http://multiblog.educacion.navarra.es/gangsva1/files/2012/05/Grano-de-Caf%C3%A9.jpg>
11. Zanesco (s.f.). Diedrich-IR 5. [Ilustración]. Recuperado de <http://www.zanesco.pe/zanesco/wp-content/uploads/2014/04/Sint%C3%ADtulo-2-2.jpg>

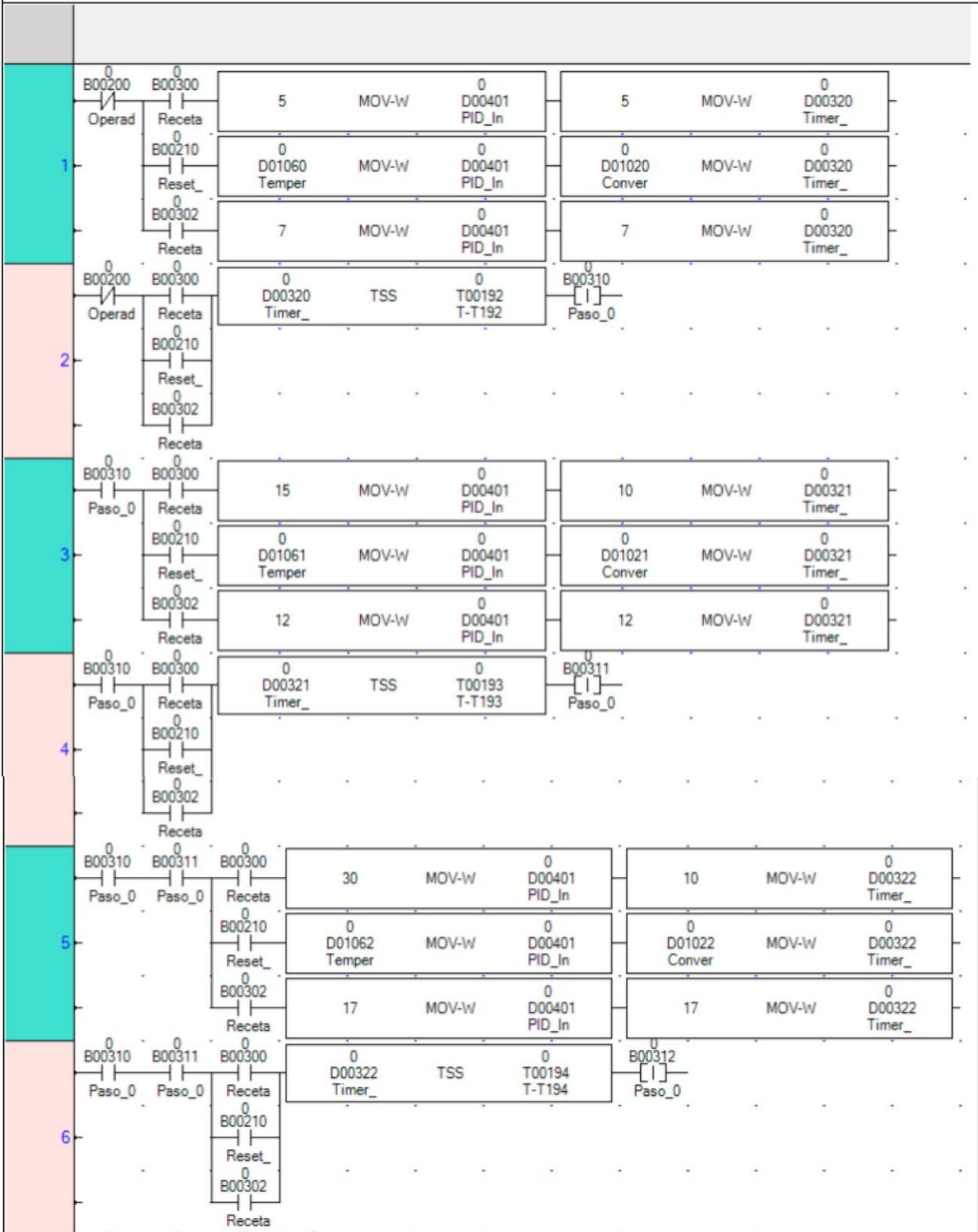
11 APÉNDICE A

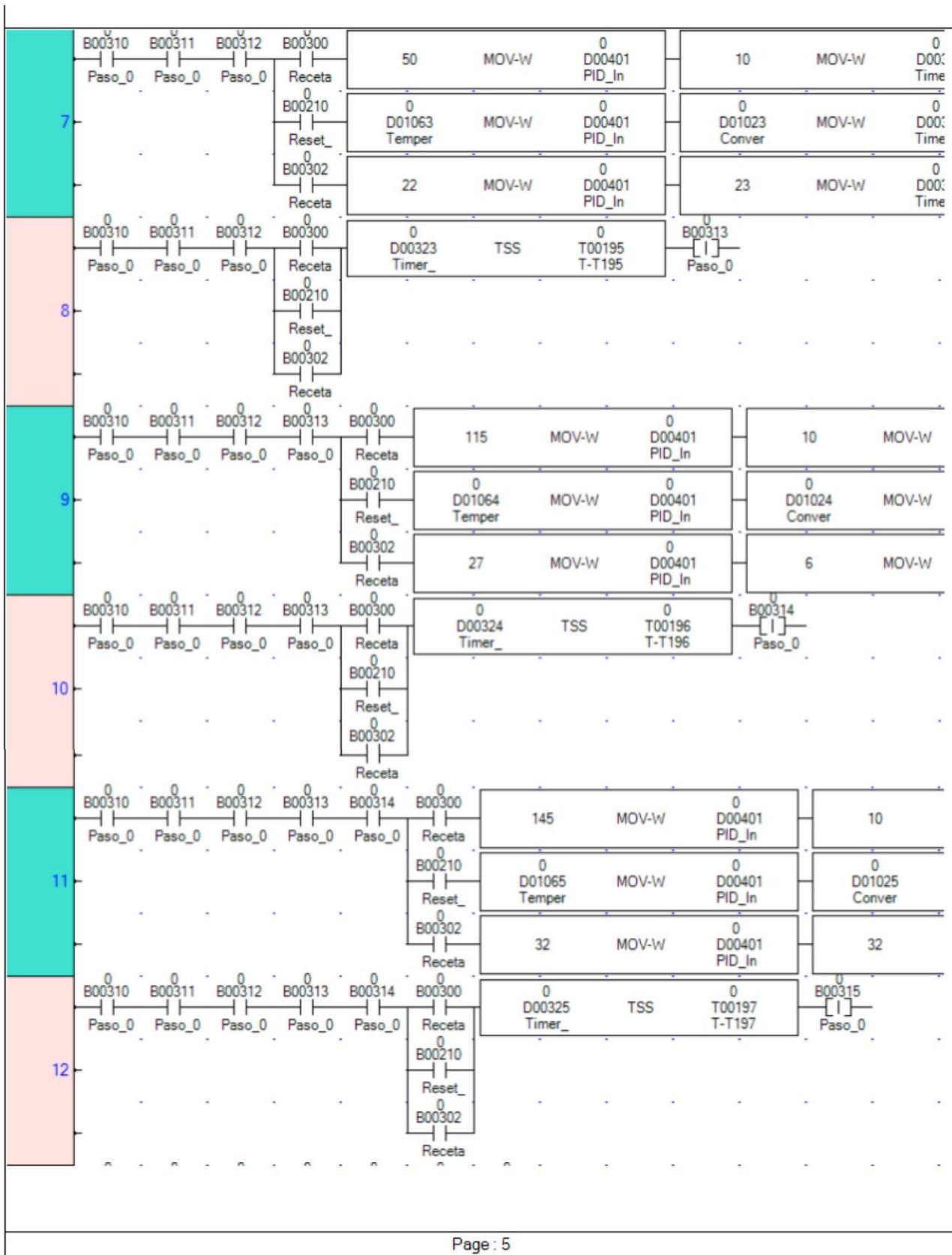
Programación de la lógica de control en el HMC

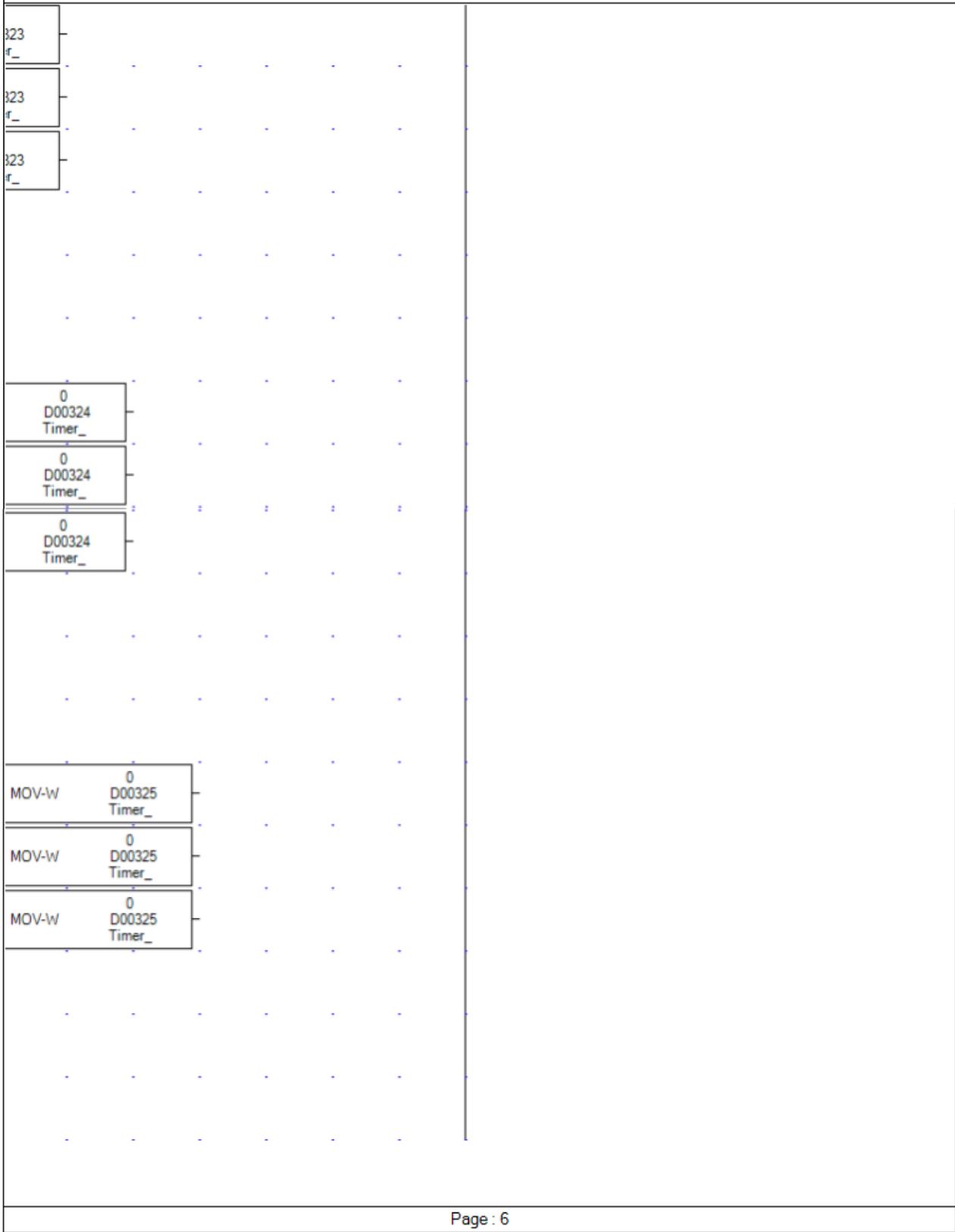


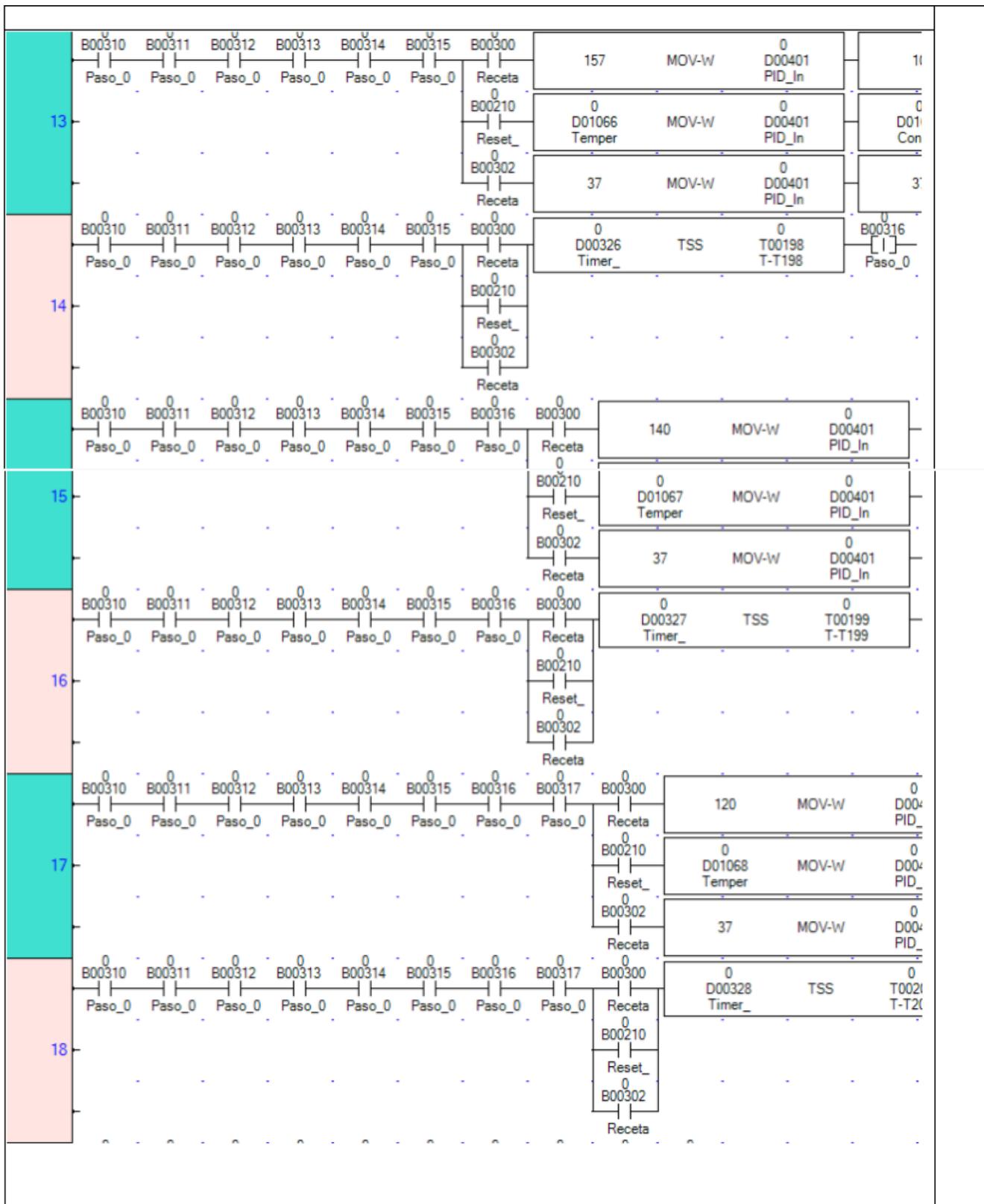


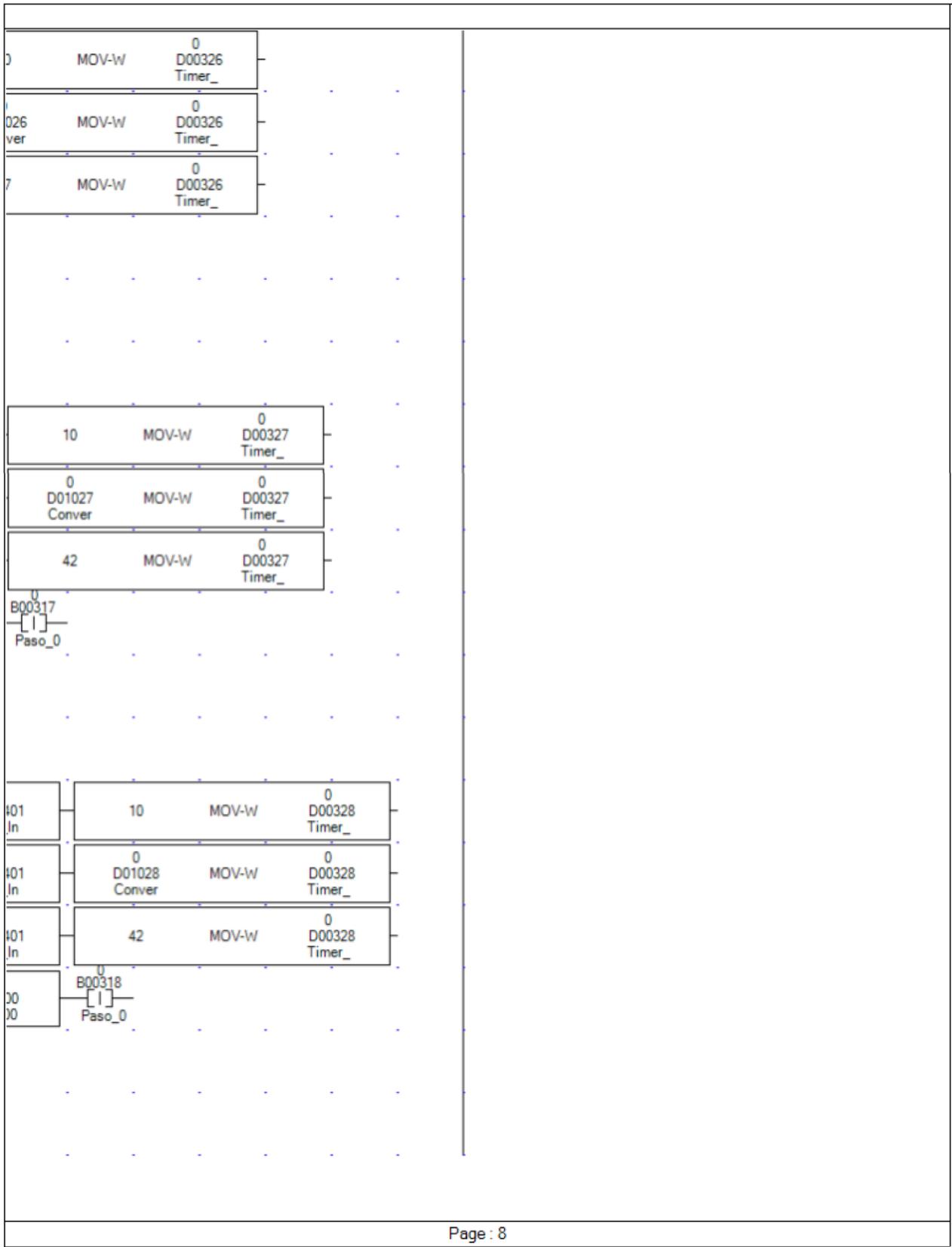
Receta_1

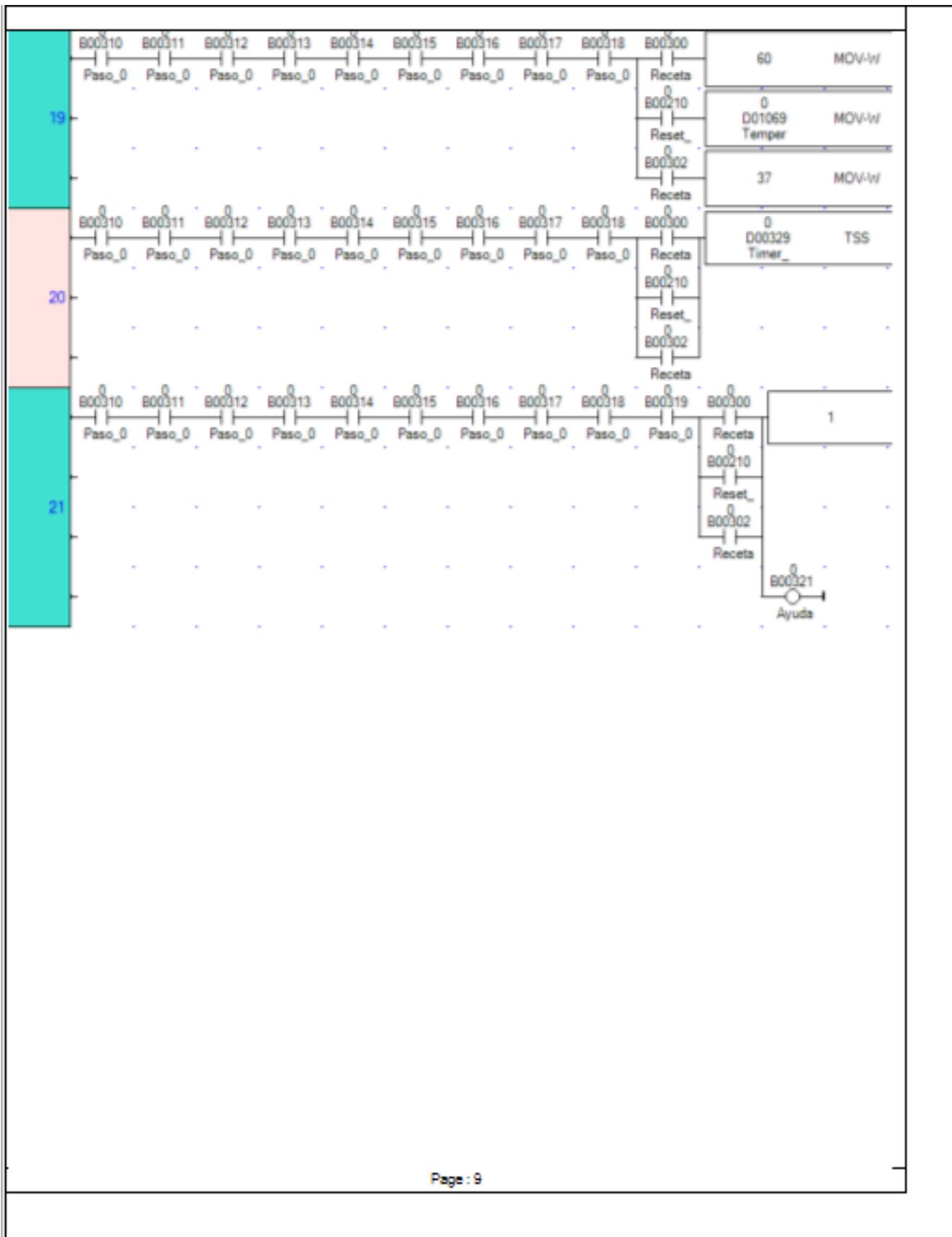


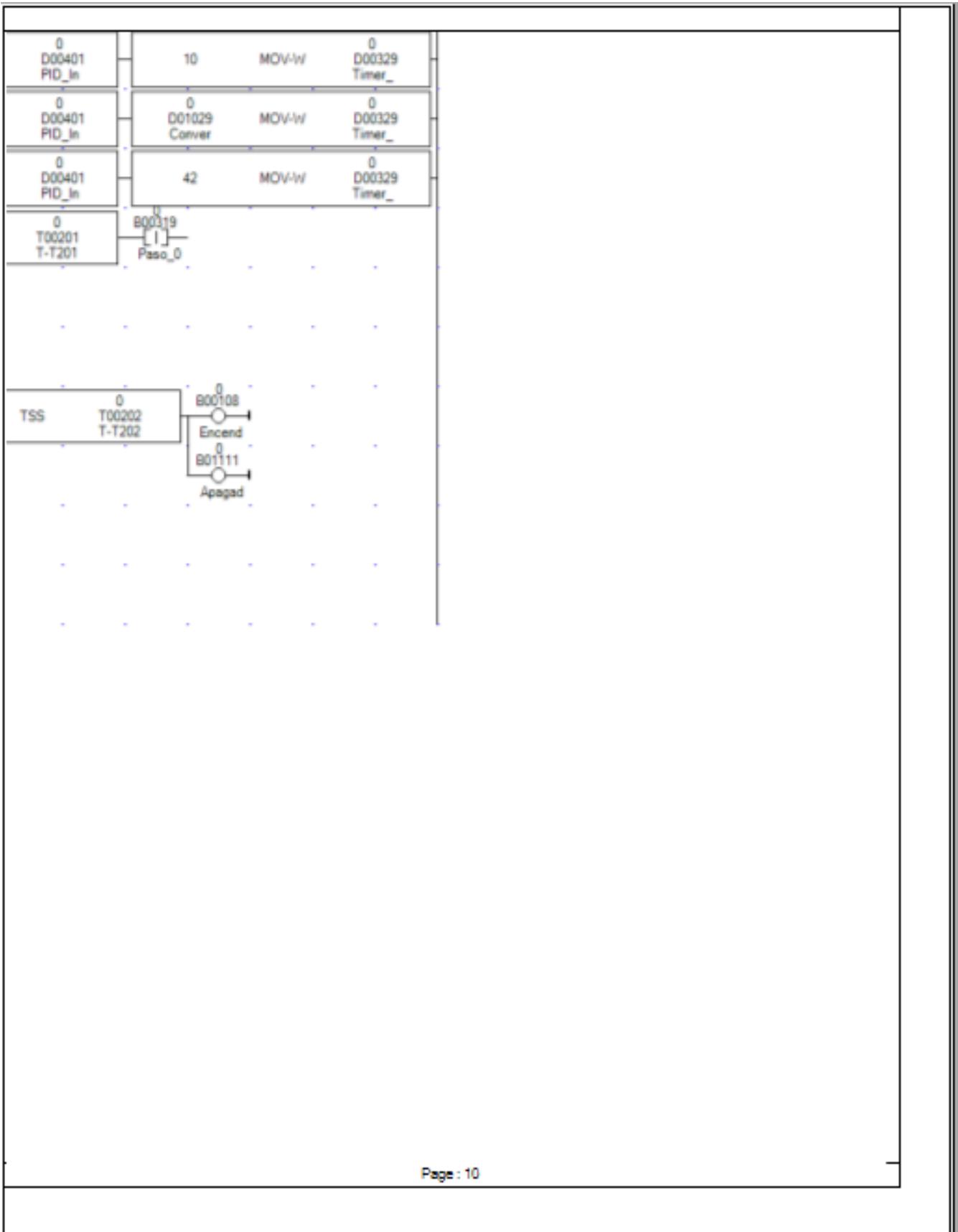


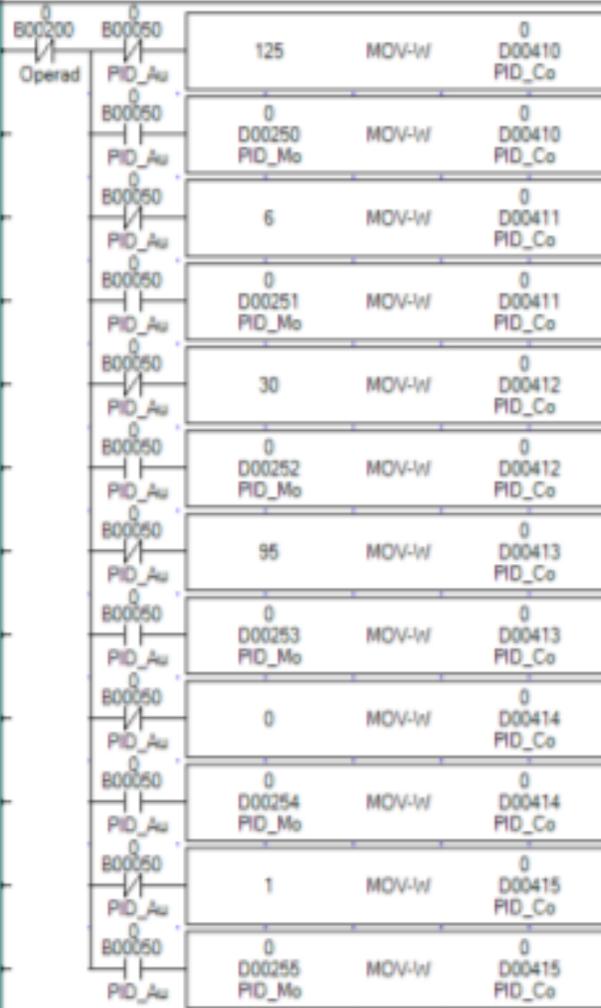




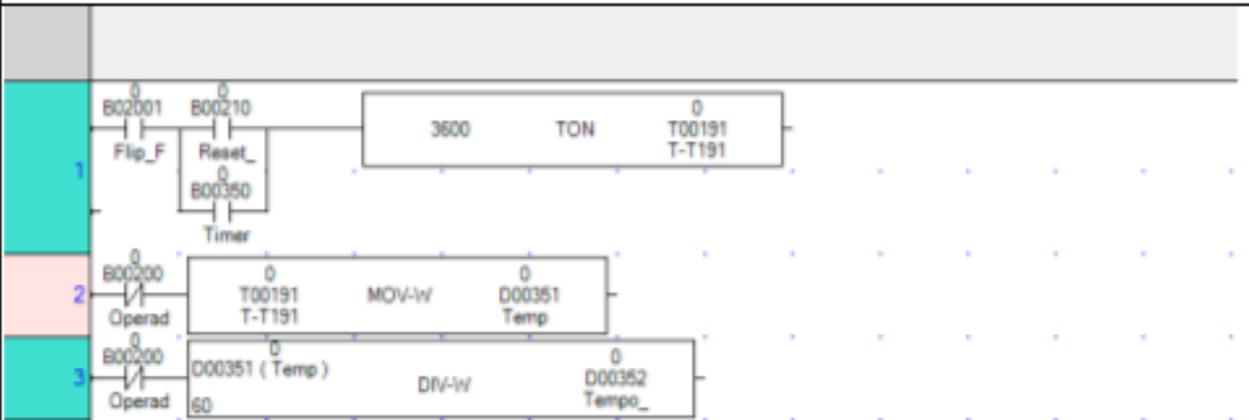




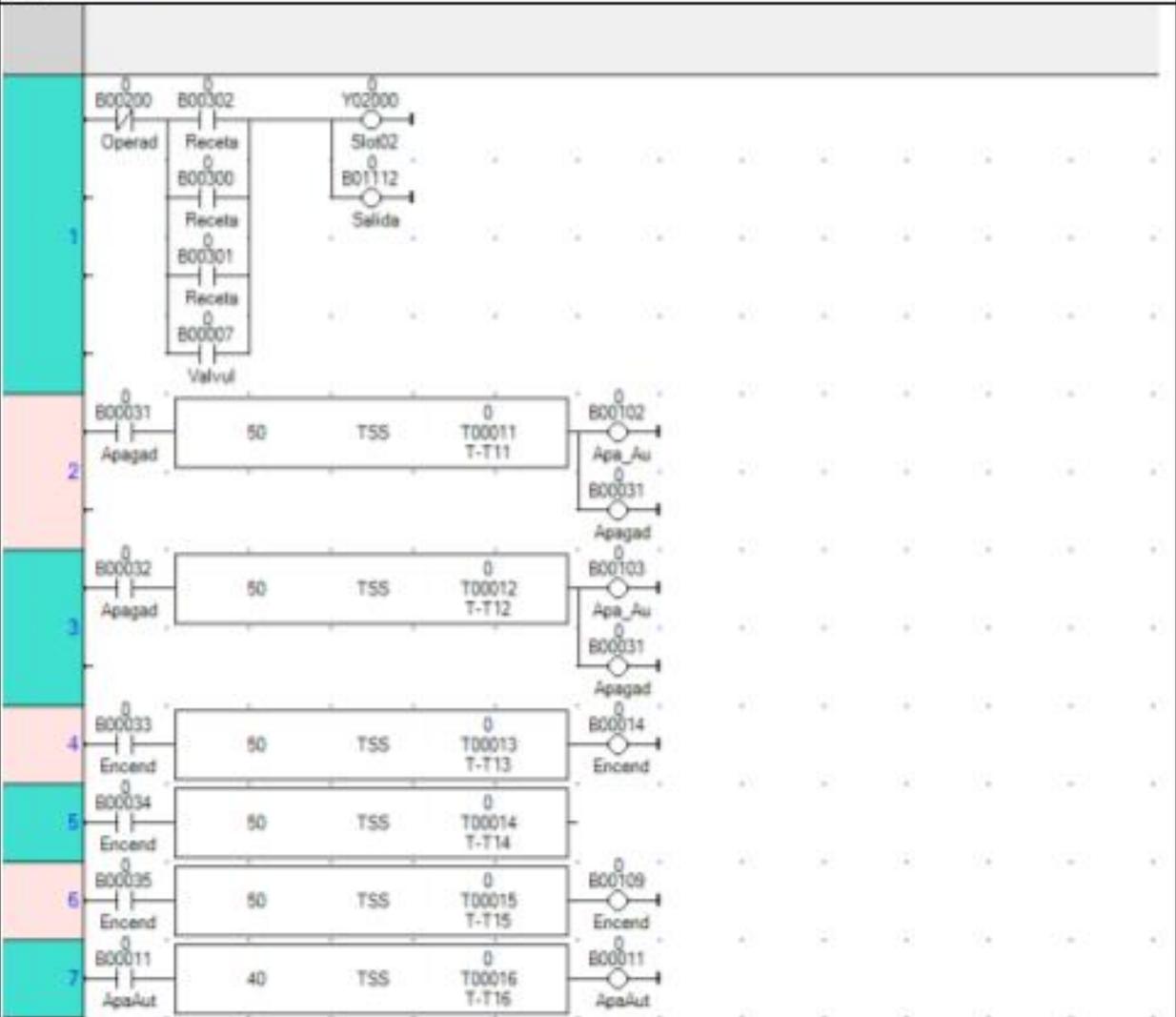




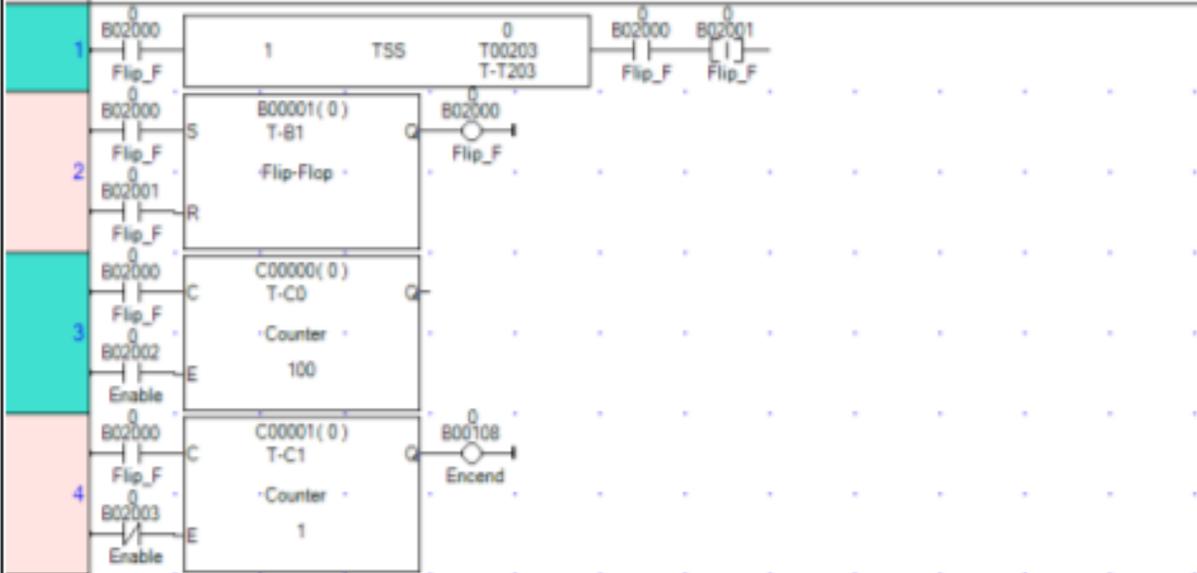
Timer_Logic



Apagado_Encendido



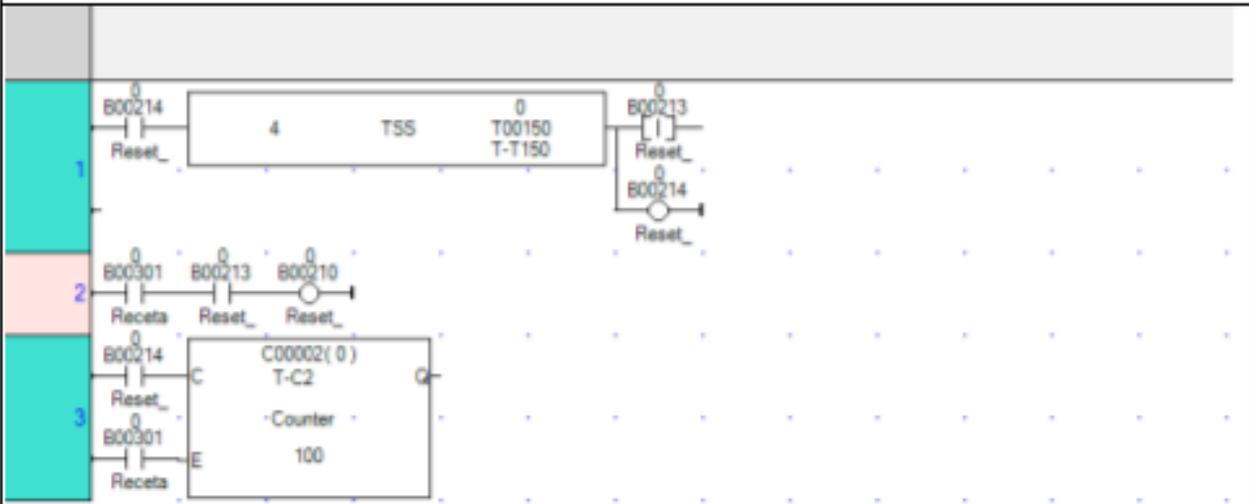
Contador



Conversion_Tiemp

1		D01040 (Minuto)	MUL-W	D01030 T-D103
2		D01050 (Segund) D01030 (Multip)	ADD-W	D01020 Conver
3		D01041 (Minuto)	MUL-W	D01031 T-D103
4		D01051 (Segund) D01031 (Multip)	ADD-W	D01021 Conver
5		D01042 (Minuto)	MUL-W	D01032 T-D103
6		D01052 (Segund) D01032 (Multip)	ADD-W	D01022 Conver
7		D01043 (Minuto)	MUL-W	D01033 T-D103
8		D01053 (Segund) D01033 (Multip)	ADD-W	D01023 Conver
9		D01044 (Minuto)	MUL-W	D01034 T-D103
10		D01054 (Segund) D01034 (Multip)	ADD-W	D01024 Conver
11		D01045 (Minuto)	MUL-W	D01035 T-D103
12		D01055 (Segund) D01035 (Multip)	ADD-W	D01025 Conver
13		D01046 (Minuto)	MUL-W	D01036 T-D103
14		D01056 (Segund) D01036 (Multip)	ADD-W	D01026 Conver
15		D01047 (Minuto)	MUL-W	D01037 T-D103
16		D01057 (Segund) D01037 (Multip)	ADD-W	D01027 Conver
17		D01048 (Minuto)	MUL-W	D01038 T-D103
18		D01058 (Segund) D01038 (Multip)	ADD-W	D01028 Conver

19	B00200	0	D01049 (Minuto)	MUL-W	0	D01039
	Operad	60			T-D103	
20	B00200	0	D01059 (Segund)	ADD-W	0	D01029
	Operad	0	D01039 (Multip)		Conver	



12 APÉNDICE B

Hojas de datos de los componentes utilizados

MF200Y Emergency Actuator

with two-way/three-way valve of the RK/RB/RF/RFH/RGD/RWG/RGDE.. series

Product Description

RGD15..40MF200Y Two-Way Valves

Application

The nodular iron three-way valve with MF200Y actuator is type-tested according to DIN EN 14597 and has the DIN mark of conformity, registration number 1F162/12. The actuator with emergency function is used for precisely regulating liquid and vapor flow rates.

The emergency actuator is controlled using a continuous signal of DC 0(2)–10 V/ 0(4)–20 mA.

The MF200Y emergency actuator has an emergency function that automatically closes the valve with spring force when the power supply is interrupted.



Types

RGD15..40 nodular iron two-way valves with the MF200Y emergency actuator for water up to 120 °C, 25 bar, as well as for hot water and steam up to 200 °C, 20 bar
Type-tested according to DIN EN 14597, registration number 1F162/12

	DN	PN	Kvs	Δp (bar)	Travel time (s)	Weight (kg)	Emergency function
RGD15/0,4MF200Y	15	25	0.4	18	30	6.0	Valve: Closed
RGD15/0,63MF200Y	15	25	0.63	18	30	6.0	Valve: Closed
RGD15/1,0MF200Y	15	25	1.0	18	30	6.0	Valve: Closed
RGD15/1,6MF200Y	15	25	1.6	18	30	6.0	Valve: Closed
RGD15/2,5MF200Y	15	25	2.5	18	30	6.0	Valve: Closed
RGD15MF200Y	15	25	4.0	18	30	6.0	Valve: Closed
RGD25/6,3MF200Y	25	25	6.3	11	30	7.6	Valve: Closed
RGD25MF200Y	25	25	10	11	30	7.6	Valve: Closed
RGD32MF200Y	32	25	16	7	30	9.1	Valve: Closed
RGD40MF200Y	40	25	25	4.5	30	11.5	Valve: Closed

Technical Data: RGD.. Valves

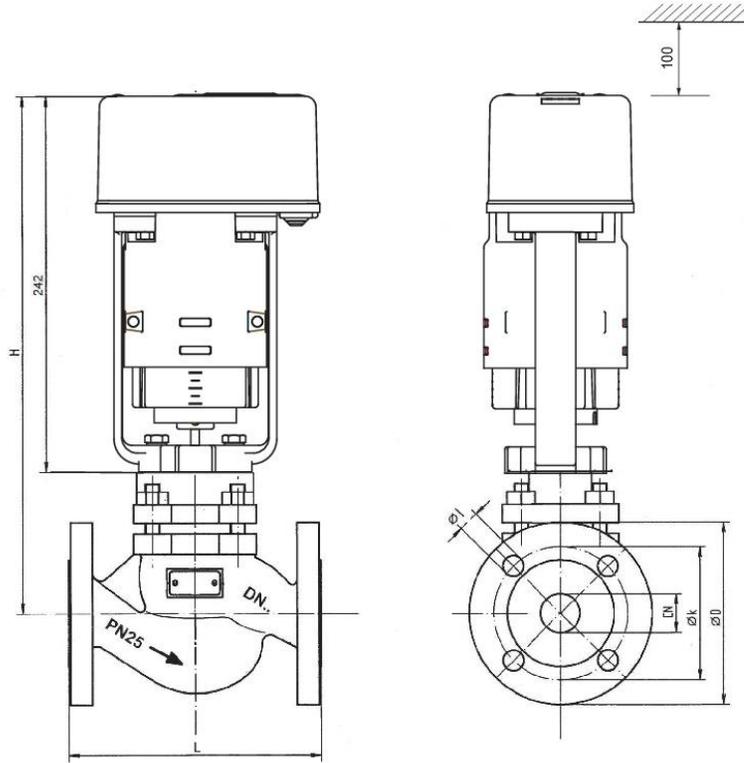
Nominal diameter	DN15 to DN40
Pressure rating	PN 25
CE marking	CE marking starting from DN32, notified body: 0525
Connection	Flange according to DIN 2501-1, PN25, raised face Form C DIN 2526
Characteristic curve	Equal percentage
Nominal stroke	15 mm
Leak rate	In accordance with EN 1349, leakage class VI
Medium temperature	0 °C to 200 °C
Housing	Nodular ironGGG-40.3
Seat ring	Stainless steel 1.4021
Cone	DN15 to DN32 Stainless steel 1.4571 DN40 Stainless steel 1.4021
Valve spindle	Stainless steel 1.4571
Spindle seal	Univerdit gaskets with PTFE sleeve (maintenance-free)

Product Description

MF200Y Emergency Actuator

with two-way/three-way valve of the RK/RB/RF/RFH/RGD/RWG/RGDE.. series

Dimensions



DN	L	Ø D	Ø K	Ø I	H
15	130	95	65	4xØ14	327
25	160	115	85	4xØ14	335
32	180	140	100	4xØ18	335
40	200	150	110	4xØ18	346
Measurements L through H in mm					



7" Touchscreen HMI + PLC



- Touchscreen
- 800 x 480 Pixel Resolution TFT
- Ethernet
- 5 I/O Expansion Ports
- 2 Serial Ports

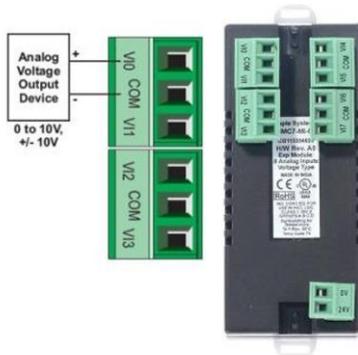
System	CPU	32-bit RISC, 400 MHz
	Memory	128 MB total
	Application Memory	45 MB
I/O Ports	USB	1 host port, 1 slave port
	Serial Ports	COM1: RS-232/RS-422/RS-485, 2 wire or 4 wire COM2: RS-232/RS-422/RS-485, 2 wire or 4 wire
	Ethernet Port	10/100 Base-T (RJ45)
	Expansion Ports	5 (for optional I/O modules)
	RTC	Built-in
Display	Display Type	7.0" TFT color LCD
	Size (W x H)	6" x 3.6" [152 x 91 mm]
	Max. Resolution (pixels)	800 x 480
	Max. Colors	32 K
	Contrast Ratio	500:1
	Backlight	LED
Touchscreen / Keypad	Backlight Longevity	30,000 hours at 25° C
	Brightness (cd/ m ²)	300
	Type	4 wire analog resistive
Mechanical	Lifespan	1 million activations minimum
	Resolution	Continuous
	Enclosure	Plastic molding
	Ratings	IP66
	Mounting	Panel
	Dimensions (W x H x D)	7.68" x 5.91" x 1.97" [195 x 150 x 50 mm]
	Panel Cutout (W x H)	7.24" x 5.16" [184 x 131 mm]
Environmental	Net Weight	1.37 lbs (.62 Kg)
	Power Requirements	24 VDC, 375 mA
	Operating Temperature	32 ~ 122°F (0~50° C)
	Storage Temperature	-4 ~ 176°F (-20 ~ 80° C)
	Relative Humidity	10 ~ 85% (non-condensing)
Notes	Shock (operation)	25 g acceleration for 11 ms x 3 shocks each axis
	Certifications	CE, cULus (Class I, Div 2 rated), RoHS
	This unit is compatible with all HMC7 I/O modules. Specifications subject to change without notice.	

HMC7-MI-03 (8 Voltage Input Analog Module)

This module is an analog input module for the HMC7000 Series models. It has eight analog inputs, which can measure 0-10V, and -10 to +10V signals.

**Specifications:**

Power	3.9 VDC from HMC7000 base
Approvals	CE, UL
Analog Inputs	8 Inputs (0-10V, -10 to +10V)
Resolution	12 bit
Connection method	Removable terminals (3.81 mm pitch)
Voltage Mode	
Input range	-10V to +10V, 0 - 10V
Value of LSB:	For 0-10V: 2.44mV For +/-10V: 4.88mV
Input Impedance	200K Ω
Accuracy	At 25°C: 0.1% of full scale Overall Accuracy (-25°C to 55°C) 1% of full scale
Frequency Limit (-3db)	3.5KHz
Behavior upon sensor failure	Input goes to 0, as if no input is connected
General	
Operating Temperature	0 to 55°C
Operating Humidity	10% to 90% (non condensing)
Mechanical Dimension (LxWxH)	3.11x1.18x1.42 inches [79x30x36mm]
Input Power Supply	
Input Voltage	24VDC
Input Current	50mA

Wiring:**Configuration:**

Use MAPware-7000 to assign input (XW) and configuration (MW) memory addresses to the module. These addresses are created according to the slot location of the module, where **nn** refers to the slot number (ex. 01...05):

Register	Description	Access
XWnn00	Input Channel 1 Data	Read Only
XWnn01	Input Channel 2 Data	Read Only
XWnn02	Input Channel 3 Data	Read Only
XWnn03	Input Channel 4 Data	Read Only
XWnn04	Input Channel 5 Data	Read Only
XWnn05	Input Channel 6 Data	Read Only
XWnn06	Input Channel 7 Data	Read Only
XWnn07	Input Channel 8 Data	Read Only
MWnn00	Input Channel 1 Configuration Register	Read/Write
MWnn01	Input Channel 2 Configuration Register	Read/Write
MWnn02	Input Channel 3 Configuration Register	Read/Write
MWnn03	Input Channel 4 Configuration Register	Read/Write
MWnn04	Input Channel 5 Configuration Register	Read/Write
MWnn05	Input Channel 6 Configuration Register	Read/Write
MWnn06	Input Channel 7 Configuration Register	Read/Write
MWnn07	Input Channel 8 Configuration Register	Read/Write

Reference the table below when configuring each Input Configuration Register (MWnn00-MWnn07):

Input Channel Signal Type	Value
Voltage (0 - 10V)	1
Voltage (-10 to +10V)	2

HMC7-MIO-06 (8 Bidirectional Input, 6 Relay, 2 Sinking Output Digital Module)

This module is a digital input/output module for the HMC7000 Series models. It has eight bidirectional inputs and six relay outputs (3 per common), plus two sinking digital outputs. Four of the inputs can be configured as high speed counters (HSC) using the MW registers (see below). When used as HSCs, input X0 (channel 1), X5 (channel 2), X2 (channel 3), and X7 (channel 4) are used to record the incoming pulses. The sinking outputs support PWM.

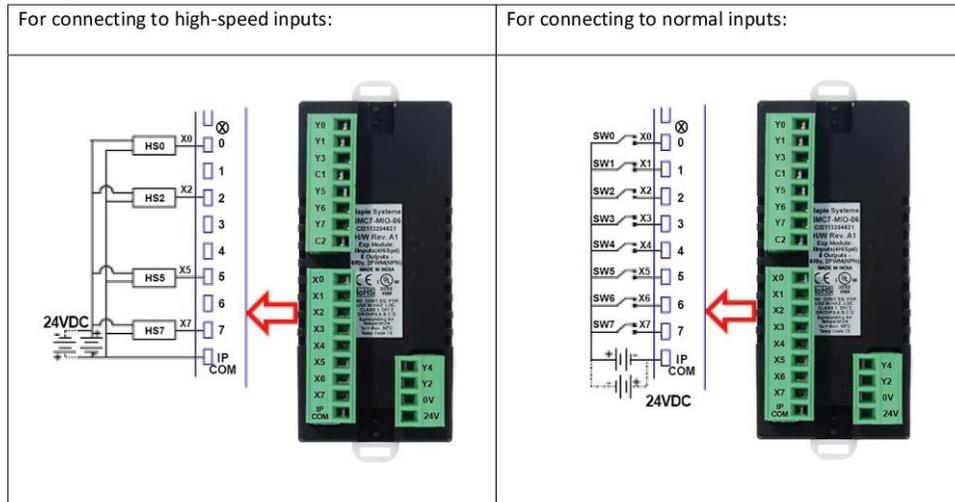


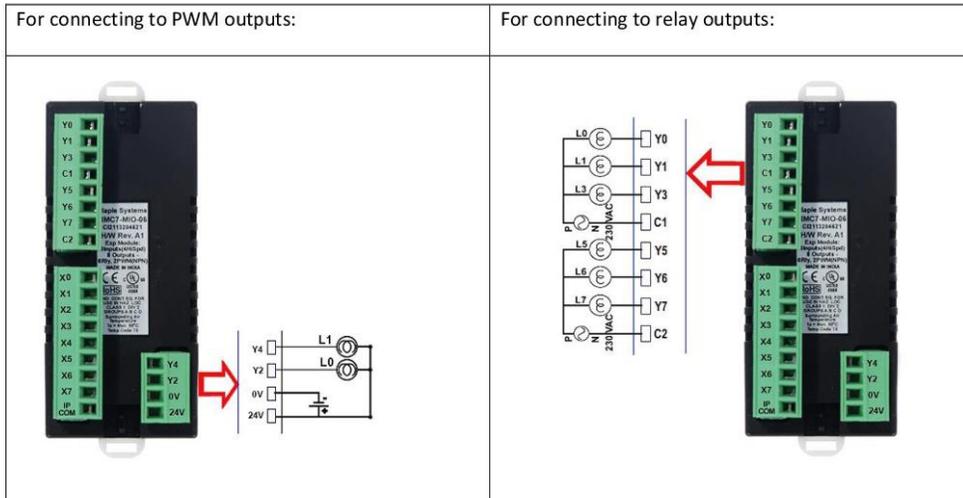
Specifications:

Power	3.9 VDC from HMC7000 base
Approvals	CE, UL
Digital Inputs	8 bidirectional inputs
Rated input voltage	24 VDC
Rated input current	Up to 5mA
Input impedance	4.9K ohms
Minimum ON voltage	15 VDC
Maximum OFF voltage	5 VDC
Turn ON Time	10 msec
Turn OFF Time	10 msec
Isolation	Optically isolated from internal circuit
Connection method	Removable terminals (3.81 mm pitch)
High Speed Channels	
No. of inputs	4 channels (X0 and X5, X2 and X7)
Maximum Input Frequency	25 KHz
Maximum Input Count	4,294,967,295 (32-bit)
Digital Outputs	6 relay, 2 sinking outputs (NPN-type)
Output Capacity (NPN)	500mA per output maximum
Output Capacity (relay)	2A per contact, 6A per common
Rated load	500mA @ 24VDC (300 mA PWM)

High Speed Channels	
No. of Outputs	2 channels (Y2 and Y4)
General	
Operating Temperature	0 to 55°C
Operating Humidity	10% to 90% (non condensing)
Mechanical Dimension (LxWxH)	3.11x1.18x1.42 inches [79x30x36mm]
Input Power Supply	
Input Voltage	24VDC
Input Current	4A maximum

Wiring:





Ratings, types and dimensions

Type designation

In column 4 on the right is the unique reference number that clearly identifies your drive by power rating and frame size. Once you have selected the type designation, the frame size (column 5) can be used to determine the drives dimensions, shown below.

Voltages

ACS150 is available in two voltage ranges:

- 2 = 200 to 240 V
- 4 = 380 to 480 V

Insert either "2" or "4", depending on your chosen voltage, into the type designation shown on the right.

Construction

The second portion of the type designation – "01U" or "03U" – describes the input voltage and status of the built-in EMC filter:

- 01 = Single phase input
- 03 = Three phase input

U = EMC filter installed but disconnected. This is the standard configuration for drives stocked in the U.S. The "U" indicates that a plastic screw has been inserted in the "EMC" location on the side of the drive. To ground the EMC filter and make it active, remove the plastic screw and replace it with the metal screw provided in the parts bag.

Cabinet-mounted drives (UL open)

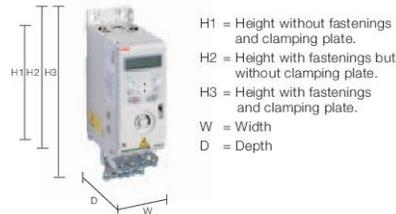
Frame size	IP20 UL open											
	H1		H1		H3		W		D		Weight	
	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	lb	kg
R0	6.65	169	7.95	202	9.4	239	2.8	70	5.6	142	2.5	1.1
R1	6.65	169	7.95	202	9.4	239	2.8	70	5.6	142	2.9	1.3
R2	6.65	169	7.95	202	9.4	239	4.1	105	5.6	142	3.3	1.5

Wall-mounted drives (NEMA 1)

Frame size	NEMA 1									
	H4		H5		W		D		Weight	
	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	lb	kg
R0	10.12	257	11	280	2.8	70	5.6	142	3.3	1.5
R1	10.12	257	11	280	2.8	70	5.6	142	3.8	1.7
R2	10.12	257	11.1	282	4.1	105	5.6	142	4.2	1.9

Ratings			Type designation	Frame size
P_N hp	P_N kW	I_{2N} A		
1-phase AC supply, 200 to 240 V				
0.5	0.37	2.4	ACS150-01U-02A4-2	R0
1	0.75	4.7	ACS150-01U-04A7-2	R1
1.5	1.1	6.7	ACS150-01U-06A7-2	R1
2	1.5	7.5	ACS150-01U-07A5-2	R2
3	2.2	9.8	ACS150-01U-09A8-2	R2
3-phase AC supply, 200 to 240 V				
0.5	0.37	2.4	ACS150-03U-02A4-2	R0
0.75	0.55	3.5	ACS150-03U-03A5-2	R0
1	0.75	4.7	ACS150-03U-04A7-2	R1
1.5	1.1	6.7	ACS150-03U-06A7-2	R1
2	1.5	7.5	ACS150-03U-07A5-2	R1
3	2.2	9.8	ACS150-03U-09A8-2	R2
3-phase AC supply, 380 to 480 V				
0.5	0.37	1.2	ACS150-03U-01A2-4	R0
0.75	0.55	1.9	ACS150-03U-01A9-4	R0
1	0.75	2.4	ACS150-03U-02A4-4	R1
1.5	1.1	3.3	ACS150-03U-03A3-4	R1
2	1.5	4.1	ACS150-03U-04A1-4	R1
3	2.2	5.6	ACS150-03U-05A6-4	R1
5	4	8.8	ACS150-03U-08A8-4	R1

Note: The European variant of the ACS150 drive may have an "E" in the type designation. This indicates the drive has been provided with the metal grounding screw inserted in the "EMC" location.



Technical data

Mains connection	
Voltage and power range	1-phase, 200 to 240 V ± 10% 0.5 to 3 hp (0.37 to 2.2 kW) 3-phase, 200 to 240 V ± 10% 0.5 to 3 hp (0.37 to 2.2 kW) 3-phase, 380 to 480 V ± 10% 0.5 to 5 hp (0.37 to 4 kW)
Frequency	48 to 63 Hz
Motor connection	
Voltage	3-phase, from 0 to U_{supply}
Frequency	0 to 500 Hz
Continuous loading capability (constant torque at a max. ambient temperature of 40 °C)	Rated output current I_{2N}
Overload capability (at a max. ambient temperature of 40 °C)	At heavy duty use $1.5 \times I_{2N}$ for 1 minute every 10 minutes At start $1.8 \times I_{2N}$ for 2 s
Switching frequency	Default 4 kHz Selectable 4 to 16 kHz with 4 kHz steps
Acceleration time	0.1 to 1800 s
Deceleration time	0.1 to 1800 s
Braking	Built-in brake chopper as standard
Motor control method	Scalar U/f
Environmental limits	
Ambient temperature	14 to 104 °F (-10 to 40 °C), no frost allowed, 122 °F (50 °C) with 10% derating
Altitude Output current	Rated current available at 0 to 3281 ft (0 to 1000 m) reduced by 1% per 328 ft (100 m) over 3281 to 6562 ft (1000 to 2000 m)
Relative humidity	Lower than 95% (without condensation)
Degree of protection	IP20/Optional NEMA 1 enclosure
Enclosure colour	NCS 1502-Y, RAL 9002, PMS 420 C
Contamination levels	IEC 721-3-3
Transportation	No conductive dust allowed Class 1C2 (chemical gases)
Storage	Class 1S2 (solid particles)
Operation	Class 2C2 (chemical gases) Class 2S2 (solid particles) Class 3C2 (chemical gases) Class 3S2 (solid particles)
Input reactor and output filter	
AC input reactor	External option. For reducing THD in partial loads and to comply with EN 61000-3-2.
dv/dt output filter	External option. For use with longer motor cables

Programmable control connections	
One analog input	
Voltage signal	0 (2) to 10 V, $R_{in} > 312 \text{ k}\Omega$
Current signal	0 (4) to 20 mA, $R_{in} = 100 \Omega$
Potentiometer reference value	10 V ± 1% max. 10 mA, $R < 10 \text{ k}\Omega$
Resolution	0.1%
Accuracy	± 2%
Auxiliary voltage	
	24 V DC ± 10%, max. 200 mA
Five digital inputs	
	12 to 24 V DC with internal or external supply, PNP and NPN, pulse train
	0 to 16 kHz
Input impedance	2.4 kΩ
One relay output	
Type	NO + NC
Maximum switching voltage	250 V AC/30 V DC
Maximum switching current	0.5 A/30 V DC; 5 A/230 V AC
Maximum continuous current	2 A rms
Product compliance	
Low voltage Directive 2006/95/EC with supplements	
Machinery Directive 2006/42/EC	
EMC Directive 2004/108/EC with supplements	
Quality assurance system ISO 9001	
Environmental system ISO 14001	
UL, cUL, CE, C-Tick and EAC (replaces GOST-R) approvals	
RoHS compliant	