



Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila.

**ANDRES CAMILO MEDINA TORRES
OSCAR JAVIER ARIAS**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Neiva, Colombia
2020

Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila.

**ANDRES CAMILO MEDINA TORRES
OSCAR JAVIER ARIAS**

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

Director (a):
Ingeniera Andrea Marín Zambrano

Línea de Investigación:
GEPRO Percepción y Robótica

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Neiva, Colombia
2020

(Dedicatoria o lema)

La preocupación por el hombre y su destino siempre debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico. Nunca olvides esto entre tus diagramas y ecuaciones.

Albert Einstein

Agradecimientos

Queremos agradecer a nuestros padres, por apoyarnos en todo momento para poder terminar esta carrera, por ser el motor principal en nuestras vidas e inspiración para ser mejores cada día, al personal académico y administrativo de la Universidad Antonio Nariño de Neiva quienes supieron impartir sus conocimientos con mucho esfuerzo para hacer posible nuestra preparación profesional, a nuestra tutora Ingiriera Andrea Marín por su aporte a la realización de esta tesis; por ultimo y no menos importante a nuestros compañeros de carrera y amigos cercanos que nos acompañaron en este camino.

Resumen

En el mercado existe un gran número de tostadoras de café de uso industrial con grandes bondades incorporadas, sin embargo, pueden ser consideradas sobredimensionadas para la producción regional en el Departamento del Huila, junto a esto, no son asequibles a nuestros campesinos cafeteros debido a los altos costos de importación de este tipo de tecnología.

El presente proyecto propone una solución alternativa a este problema, diseñando un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor de tosti3n para un tostador de café de 3kg de capacidad que ya existe, utilizando flujo de aire caliente que permita garantizar los valores de temperaturas necesarios para cumplir con los requerimientos solicitados por el beneficiadero donde ser3 instalado.

Controladores del tipo PID para el control de la temperatura y velocidad del tambor de tosti3n ser3n dise3ados y simulados para establecer los valores adecuados de los diferentes par3metros que intervienen en ello.

Con la implementaci3n real del sistema dise3ado, se lograr3 validar el correcto funcionamiento del control que se propone.

Palabras clave: Control de temperatura, control de velocidad, tosti3n del caf3, mezclador de caf3.

Abstract

The main idea of the project is to design and implement a temperature and speed control in the mixer of a coffee roaster that allows moving the roasting drum and carrying out the roasting process that allows obtaining a uniform product from the coffee beans. Coffee that meets the requirements requested by the mill. In the market, there are a large number of industrial coffee roasters with great built-in benefits, oversized for regional production. However, unfortunately they are not affordable to our coffee farmers due to the high costs of importing this type of technology. Roasting is one of the most delicate processes in the coffee chain, since it is here where aromas and flavors will finally be obtained, which will be perceived by users when tasting a cup of coffee. These aromas and flavors depend on the roasting system and in the same way on the tone that the coffee will have at the end of the roasting process. The present project proposes a solution to this problem by designing a temperature and speed control system of the roasting drum for a coffee roaster using hot air flow performing a temperature control and a speed control to the mixer.

Keywords: Systems, Controllers, Ball, Beam, stability.

Contenido

	Pág.
Contenido	
Resumen	IX
Abstract	X
Introducción	1
Objetivos	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
Capítulo 1. Marco Referencial	5
1.1 Estado del arte	5
1.2 Marco Conceptual	9
1.2.1 Detectores de temperatura por resistencia (RTD)	9
1.2.2 Tipos de sensores de temperatura RTD.....	10
1.2.3 Sensor de temperatura RTD PT100	11
1.2.4 Circuitos para configuraciones de media en dispositivos RTD	13
1.2.5 Proceso de tostado de café	16
1.2.6 Control de velocidad del motor AC (Motor monofásico).....	17
1.2.7 Control de fase	20
1.2.8 Medición de la velocidad del motor.....	21
Capítulo 2. Diseño de ingeniería	23
2.1 Diseño del control de temperatura del tostador de café automatizado.....	23
2.1.1 Modelo de la señal de temperatura por el método de Van Der Grinten	25
2.2 Diseño del control PID.....	28
2.3 Diseño del control de velocidad del tostador de café automatizado.	31
2.3.1 Diseño del circuito de detector de cruce por cero	31
2.3.2 Circuito sensor de velocidad	34
2.3.3 Captura de la variable de velocidad	36
Capítulo 3. Análisis de resultado	43
Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones	57
4.1 Conclusiones.....	57
4.2 Recomendaciones	59
Bibliografía	61

Lista de figuras

	Pág.
Figura 0- 1: Esquema de tostador de café.....	1
Figura 1- 1: Sistema de controlador automático para la tostación del café – Universidad de La Salle	6
Figura 1- 2: Control de temperatura y tiempo para una tostadora de café	7
Figura 1- 3: Esquema del proceso del prototipo	8
Figura 1- 4: Proceso de automatizado de torrefacción del café (Coffea arábica) en un tostador convencional.....	9
Figura 1- 5: Tipos de RTD	11
Figura 1- 6: Puente de Wheatstone con el método de dos hilos.....	13
Figura 1- 7: Puente de Wheatstone con el método de tres hilos.....	14
Figura 1- 8: Configuración de medida basada en el método de cuatro hilos.....	15
Figura 1- 9: Configuraciones de medida.....	16
Figura 1- 10: Proceso de tosti3n del café	17
Figura 1- 11: Motor monofásico síncrono.....	18
Figura 1- 12: Partes de un motor A.C. síncrono.....	19
Figura 1- 13: Formas de onda del control de fase.....	20
Figura 1- 14: Símbolo del (a) SCR y del (b) Triac.....	21
Figura 1- 15: Representación de las señales incrementales A, B y Z en disco óptico.	21
Figura 1- 16: Representación gráfica de las señales incrementales A, B, y Z.....	22
Figura 2- 1: Panel frontal de la interfaz gráfica que permite la adquisición de la temperatura del tostador de café.....	24
Figura 2- 2: Diagrama de bloques del aplicativo que permite la adquisición de la temperatura del tostador de café.....	24
Figura 2- 3: Método de identificación gráfica.....	25
Figura 2- 4: Comportamiento real y aproximado del tambor del horno.....	27
Figura 2- 5: Simulación en Matlab del comportamiento aproximado de la temperatura del tambor del horno.....	28
Figura 2- 6: Simulación en Matlab del comportamiento aproximado de la temperatura del tambor del tostador de café.....	29
Figura 2- 7: PID Tuner de la variable de temperatura del tambor Tostador de café.....	30

Figura 2- 8: PID Tuner de la variable de temperatura del tambor Tostador de café.	31
Figura 2- 9: Configuración interna del MOC3040 para el circuito detector de cruce por cero.	32
Figura 2- 10: Circuito de disparo para el control de velocidad del motor AC.	34
Figura 2- 11: Configuración interna del OPB606A para el circuito del sensor de velocidad.	35
Figura 2- 12: Circuito del encoder digital para el control de velocidad de motor A.C.	36
Figura 2- 13: Parte del código generado para realizar la captura de la velocidad mediante el encoder.	37
Figura 2- 14: Respuesta del motor para el proceso de identificación.	38
Figura 2- 15: Ingreso de los datos al Toolbox de identificación	38
Figura 2- 16: Verificación de las señales ingresadas al Toolbox de identificación	39
Figura 2- 17: Estimación de la función de transferencia con el Toolbox de identificación.	40
Figura 2- 18: Simulación del Control PID de la velocidad del tambor de la tostadora de café.	41
Figura 3- 1: Tostadora de café automatizada.	44
Figura 3- 2: Parte del código embebido en Arduino de la tostadora de café	45
Figura 3- 3: Parte del código del control PID embebido en Arduino de la tostadora de café.	46
Figura 3- 4: Respuesta del Control PID de la tostadora de café a diferentes temperaturas.	47
Figura 3- 5: Parte del código embebido en Arduino para el control PID de velocidad del tambor de la tostadora de café.	48
Figura 3- 6: Respuesta del controlador PID de velocidad del tambor de la tostadora de café.	49
Figura 3- 7: Respuesta del controlador PID de temperatura del tambor de la tostadora de café.	50
Figura 3- 8: Respuesta del controlador de velocidad del tambor de la tostadora de café.	51
Figura 3- 9: Resultado del primer experimento con la tostadora de café.	51
Figura 3- 10: Respuesta del controlador de temperatura del tambor de la tostadora.	52
Figura 3- 11: Respuesta del controlador de velocidad del tambor de la tostadora.	53

Lista de tablas

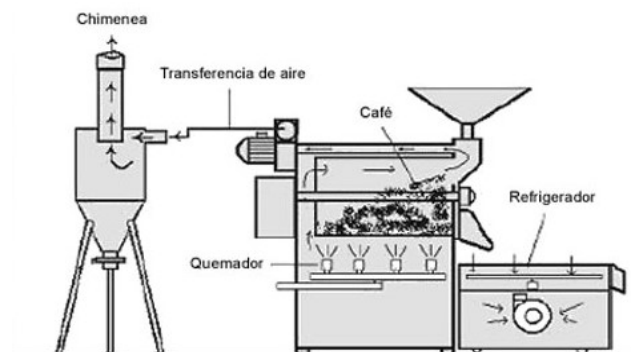
	Pág.
Tabla 1- 1: Tipos de materiales de RTD con rango de temperatura.	10
Tabla 1- 2: Tabla normalizada para el PT100 ohms	12
Tabla 2- 1: Características del optoacoplador MOC3040.	32
Tabla 2- 2: Características eléctricas del sensor OPB606A.	35
Tabla 3- 1: Condiciones iniciales de las tres pruebas experimentales.	50

Introducción

El proceso de transformación del grano de café tiene tres etapas: secado, tuestión y enfriamiento. La fase de tuestión es fundamental dentro del proceso de elaboración del café, ya que es ahí donde los granos logran revelar su esencia, sus aromas y sabores más importantes. Durante el proceso de tostado, las temperaturas que alcanzan los granos de café se encuentran entre los 193 °C para un tueste claro, cerca de los 200 °C para un tueste medio y cerca de los 218 °C para un tostado oscuro. Ya terminado el proceso de tostado, los granos pasan a bandejas de acoplamiento para enfriarse rápidamente y así terminar el proceso.

En el proceso de tuestión, el café es sometido a una fuerte transferencia de temperatura, lo cual provoca un cambio en el aspecto del grano, aumentando de tamaño, cambiando de color y tornándose quebradizo tal como se esquematiza en la (Ver Figura 1-1), también aumentan las sustancias grasas, disminuye los azúcares y los ácidos clorogénicos; surgiendo más de 700 compuestos aromáticos (Amaliyah & Sunarti, 2018).

Figura 0- 1: Esquema de tostador de café.



Fuente: (Amaliyah & Sunarti, 2018).

2 Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila.

La temperatura de tuestión en las máquinas industriales inicia con el horno precalentado a 200°C. Luego de cargar el café, la temperatura disminuye la mitad para luego volver a subir gradualmente a razón de 10°C por minuto. Si sube demasiado rápido, los granos de café se tuestan externamente, pero quedan crudos y huecos en el interior (Camacho, Martínez, Saad, Valenzuela, & Valdés, 2014a).

A los 12 minutos de haber iniciado el proceso, cuando la temperatura ha subido nuevamente a 193°C, ocurre el primer “crack”. Se trata de un sonido en forma de chasquido como el de una palomita de maíz al reventar. Este sonido o crepitación ocurre porque la semilla de café se expande, aumenta su volumen y explota internamente dejando salir al exterior gases y vapor de agua (del Campo Tejedor & Luna, 2001).

Para el proceso de tuestión no existe una referencia única a cerca de la velocidad ideal del cilindro de la tostadora, pero se considera que entre mayor tamaño posea más lento será su movimiento. En el caso particular de una tostadora de 1 a 2 kg se recomienda una velocidad de giro de 70 a 80 RPM y para el caso de un tambor con capacidad de 60 Kg se podrían manejar de 40 a 44 RPM (Perfect Daily Grind, 2019).

Generalmente el proceso de tuestión se realiza de forma manual por parte de los pequeños productores, ya que debido a la poca tecnificación del agro colombiano no se puede tener acceso a herramientas tecnológicas como apoyo al desarrollo de estas labores. Los tostadores artesanales calibran el tiempo tuestión por métodos empíricos (vista y audición). Es decir, que observan los cambios de color en las almendras conforme transcurre el tiempo de tostado. El usar estos métodos tradicionales se puede conducir a una eventual pérdida de la calidad del producto final y por tanto a una disminución de su precio de venta.

La tecnificación del campo es por tanto la vía que permite impulsar la productividad del grano, situación que proporciona un incremento en la competitividad y rentabilidad de los pequeños productores (del Campo Tejedor & Luna, 2001). Además, el Gobierno Nacional ha buscado acrecentar el número de exportaciones, el consumo y la productividad del sector cafetero en un tiempo estimado de 10 años, con el propósito de incrementar las ventas en los mercados internacionales y las condiciones de producción interna (Revista Dinero, 2019).

Esta situación promueve y justifica el desarrollo de proyectos que permitan mejorar el proceso de producción de café e incrementar la calidad de este. Especialmente para los pequeños productores de las regiones apartadas y retiradas de la geografía colombiana, en donde difícilmente se pueden aplicar las políticas anteriormente expuestas (César Cantú-Martínez, 2014).

Como solución a esta problemática, el presente proyecto pretende diseñar e implementar un control de temperatura y velocidad para el tambor de tostión de café de una tostadora, en busca de mejorar la calidad del producto ofrecido al público. Para ellos se requiere realizar el cálculo de dos controladores, uno para el control de temperatura y otro para controlar la velocidad del tambor de tostión a fin de garantizar un proceso más homogéneo.

El documento está organizado de la siguiente manera: En el Capítulo I se expone el marco referencial donde se definen conceptos asociados al presente. Adicionalmente, menciona investigaciones destacadas con el producto del café. En el Capítulo II, se describe la metodología trabajada. En el Capítulo III, se manifiesta un análisis de resultados obtenidos al ejecutar el sistema. Finalmente, en el capítulo IV se comunica las conclusiones y recomendaciones.

- 4 Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila.
-

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir un sistema de control de temperatura y de velocidad del motor del mezclador para una tostadora de café con capacidad para 3kg.

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización de la tostadora identificando su capacidad de carga, velocidad del giro de motor, temperatura optima de tostado, variables de entrada y salida del sistema.
- Determinar las constantes proporcional, derivativa e integral de los controladores.
- Desarrollar los algoritmos de control PID para la temperatura del tostado y la velocidad del motor del mezclador.
- Validar las respuestas de los sistemas de control.

Capítulo 1. Marco Referencial

En este capítulo se desarrolla el marco referencial del trabajo; se destaca diversas investigaciones y trabajos realizados que se tuvieron en cuenta para la realización de este. Adicionalmente, explica el significado de los conceptos principales, involucrados para desarrollar del tema de investigación actual.

1.1 Estado del arte

El cultivo del café ha sido y se mantiene en la actualidad como una de las actividades más importantes en la agricultura de Colombia, especialmente en el departamento del Huila; siendo este junto con el cacao unos de los productos más exportados desde la época colonial (Heyd, Broyart, Hernandez, Valdovinos-Tijerino, & Trystram, 2007), (Hadzich et al., 2014). A nivel departamental se destacan los municipios de Algeciras y La Plata como los principales productores del grano.

Sin embargo el proceso de convertir este fruto en una taza de café es muy complejo y requiere de maquinaria especializada para su realización a nivel macro (Nasution, Putramas, Soeharwinto, Fahmi, & Siregar, 2018), (Milani, Montorsi, & Terzi, 2017) . Uno de los pasos más importantes es la etapa de tostión, en esta los granos se someten a temperaturas entre 120°C - 170°C para secarlos, luego se tuestan (170°C - 200°C) y posteriormente se enfrían.

Los pequeños productores generalmente realizan esta actividad de forma manual sin la intervención de dispositivos electrónicos debido a los altos costos de estos, sin embargo, se han adelantado algunos proyectos con el propósito de automatizar este proceso; a continuación, se nombran algunos de estos.

6 Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila.

A nivel nacional en la Universidad de La Salle, se diseñó e implementó un controlador automático para el proceso de tuestión del café en pequeña y media producción (Acero Morales, 2007). En el mencionado sistema se realizó un control ON/OFF de temperatura, se automatizaron los sistemas de carga y descarga del grano, utilizando el microprocesador 16F877A se controlaron las entradas y salidas del grano, así como la velocidad del tambor preestablecida.

En este proyecto se también se automatizo el tiempo de tuestión por medio de tres valores definidos y preestablecidos, se contó además con medición de temperatura a través de una termocupla tipo K y presentación de los tiempos de tuestión y las variables definidas por el usuario en una LCD (Acero Morales, 2007); en la siguiente figura se puede observar el prototipo desarrollado.

Figura 1- 1: Sistema de controlador automático para la tostación del café – Universidad de La Salle



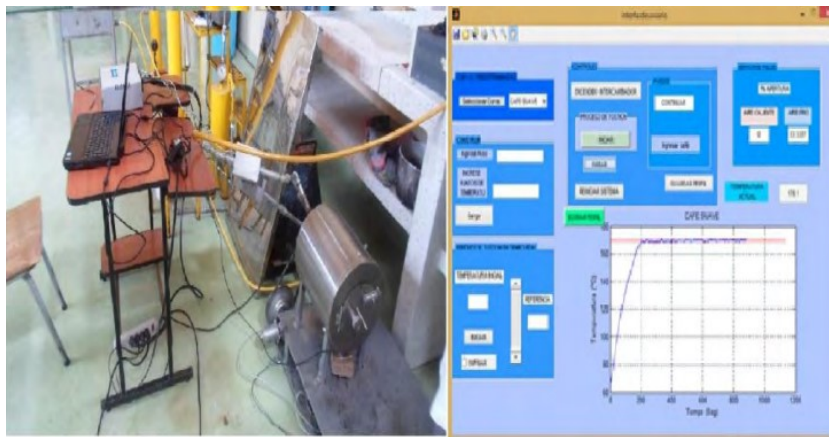
Fuente: (Acero Morales, 2007)

En la Universidad de Nariño también construyeron un sistema automatizado para controlar la temperatura y el tiempo del proceso de tuestión de café en una máquina de laboratorio. En el proyecto implementaron un control PID y lo compararon con los resultados obtenidos con un control Lógico Difuso obteniendo valores similares. Desarrollaron una interfaz con Matlab y usaron el microcontrolador 18F4550 para realizar el control. Utilizaron termocuplas para la adquisición de la temperatura y contadores por medio del

microprocesador para controlar el tiempo de tuestión del grano, previa programación desde la interfaz realizada en un GUI en Matlab (Chaves & Jaramillo, 2014).

Para presentar las mediciones al usuario se utilizó un LDC de 2x16, de esta forma se podía tener acceso a los datos de las variables utilizadas. El control de velocidad del motor AC se realizó mediante modulación de ancho de pulso. A continuación, se pueden evidenciar algunas asociadas con el desarrollo del mencionado proyecto.

Figura 1- 2: Control de temperatura y tiempo para una tostadora de café



Fuente: (Chaves & Jaramillo, 2014)

En la Universidad Javeriana también se desarrolló un dispositivo para realizar el control de calidad del nivel de tuestión del café molido y al mismo permitió establecer un control estadístico del mencionado proceso basado en la técnica de visión artificial, por tanto utilizaron esta tecnología para el desarrollo de un colorímetro; este proyecto permitió desarrollar procesos de control de calidad del proceso de tuestión, clasificar el grado de tuestión y llevar control estadístico del proceso de calidad. El dispositivo funciono de forma adecuada ya que permitió realizar la clasificación de diferentes muestras de café tostado y molido (Rincón & Cano, 2010). En la siguiente imagen se puede observar el esquema del proceso del prototipo desarrollado.

8 Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila.

Figura 1- 3: Esquema del proceso del prototipo



Fuente: (Rincón & Cano, 2010)

A nivel internacional, en 2017 en la Universidad de Costa Rica se desarrolló un proyecto denominado: “Estudio del proceso de automatizado de torrefacción del café (*Coffea arábica*) en un tostador convencional”. Para la medición de la temperatura de tuestión se utilizó un termopar tipo K, colocado en la cámara interna del tostador. Para comprobar la medición ofrecida por el sistema se utilizó un termómetro infrarrojo portátil marca General®, que proporciona lecturas desde -32 hasta 1650 °C, con un tiempo de respuesta de 0,5 s, una precisión de 0,1 °C. Además, se usaron cámaras para evaluar los patrones de color de los granos en el proceso de tuestión. Se realizó un análisis de la masa específica aparente, la variación específica aparente, modelos de expansión aparente del gramo, entre otras (Abarca Mora, 2017). En la siguiente figura se puede observar el prototipo desarrollado.

Figura 1- 4: Proceso de automatizado de torrefacción del café (Coffea arábica) en un tostador convencional



Fuente: (Abarca Mora, 2017)

1.2 Marco Conceptual

En esta sección explica el significado de los conceptos principales, involucrados para desarrollar del tema de investigación actual.

1.2.1 Detectores de temperatura por resistencia (RTD)

Un detector de temperatura por resistencia conocido por sus siglas RTD funciona bajo el principio de la resistencia eléctrica de la mayoría de los metales varia en relación con los cambios de temperatura (Rodríguez et al., 2007). Un material que pueda ser usado como RTD debe cumplir con unas características básicas:

- Alta resistividad.
- Variación de resistividad eléctrica conforme a los cambios de temperatura y la resolución deseada, siendo de comportamiento lineal.
- Propiedades mecánicas apropiadas, asegurando fiabilidad en la medición.

Frecuentemente los dispositivos RTD poseen una resistencia de platino (Pt). Sin embargo, se pueden utilizar otros elementos de construcción, tales como: Níquel, Cobre, entre otros. Estas resistencias variables poseen valores entre 20Ω y $20k\Omega$, con un rango de temperatura de -200°C y 850°C (Rodríguez et al., 2007). En la **Tabla 1-1** se visualiza los tipos de materiales y el rango de temperatura asociado a cada elemento.

Tabla 1- 1: Tipos de materiales de RTD con rango de temperatura.

Material	Rango de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Variación coef ($\%/^{\circ}\text{C}$ a 25°C)
Platino	-200 a +850	0.39
Níquel	-80 a 320	0.67
Cobre	-200 a +260	0.38
Níquel - acero	-200 a +260	0.46

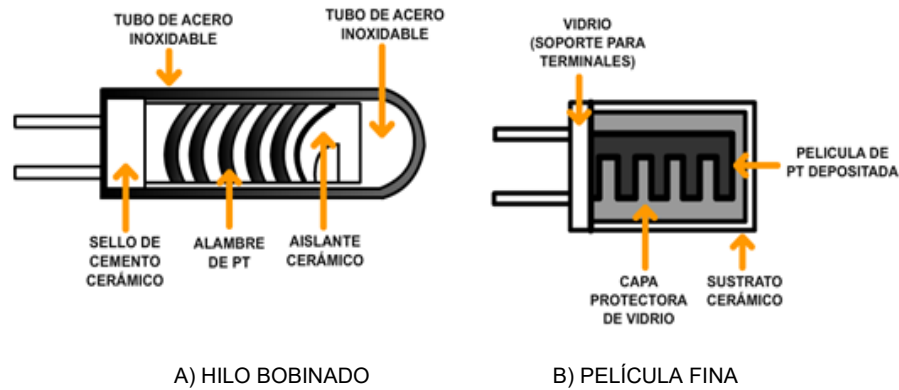
Fuente: (Rodríguez et al., 2007)

1.2.2 Tipos de sensores de temperatura RTD

Existen dos tipos principales de RTD como se ilustra en la **Figura 1-5**, aquellos de hilo bobinado y los de película fina; a continuación, se presenta una breve descripción.

Hilo bobinado: La construcción de este sensor dispone de un hilo de tipo conductor bobinado alrededor de un elemento que es aislante eléctrico y excelente conductor del calor, probablemente cerámica. Su funcionamiento se basa en las dilataciones del mencionado hilo al variar la temperatura, la bobina es empaquetada con mica e insertada al interior de un tubo protector (Ver Figura 2-1 inciso A).

Película fina: La construcción de la película fina, se aplica una fina capa de platino sobre un sustrato cerámico, a su vez se cubre con una película de vidrio fundido para su protección. A diferencia del hilo bobina este sensor de temperatura es a menor costo (Ver Figura 2-1 inciso B) (Ferrero, 2006).

Figura 1- 5: Tipos de RTD

Fuente: Adaptado de (Ferrero, 2006).

1.2.3 Sensor de temperatura RTD PT100

PT100 es el tipo de sensor temperatura RTD más común, siendo un material de fabricación en platino. Su característica fundamental se basa en una resistencia eléctrica de 100 ohmios con una temperatura de 0 °C. Normalmente están montados sobre una funda protectora y posteriormente forman una sonda de temperatura más robusta conocida como sonda PT100 (Engineering, 2020). Existen dos formas para realizar la conversión de voltaje a temperatura, la primera de ellas acude a las tablas normalizadas de conversión R/T y la otra es una técnica de aproximación polinómica de la respuesta no lineal.

- **Conversión de voltaje a temperatura por tablas normalizadas R/T:** En la **Tabla 1- 2** se puede ver la tabla normalizada para el PT100.

12 Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila.

Tabla 1- 2: Tabla normalizada para el PT100 ohms

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.41
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.74	110.12	110.51	110.90	111.29
30	111.67	112.06	112.45	112.84	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.16
40	115.54	115.93	116.32	116.70	117.09	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.48	122.86
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69
70	127.07	127.46	127.84	128.22	128.60	128.99	129.37	129.75	130.13	130.51
80	130.89	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.56	133.94	134.32
90	134.70	135.08	135.46	135.84	136.22	136.60	136.98	137.36	137.74	138.12

Fuente: (Engineering, 2020)

- **Conversión de voltaje a temperatura mediante aproximación polinómica de la respuesta no lineal:** Este método está dado por la ecuación polinómica (ver ecuación 1.1):

$$RTD(T) = RTD_0(1 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3(T - 100)) \quad (1.1)$$

Donde se denota $RTD(T)$ como elemento resistivo a T (Ω), RTD_0 como elemento resistivo a temperatura referencia (Ω), T Elemento de temperatura en ($^{\circ}\text{C}$), $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ como coeficiente de temperatura de la resistencia.

Los valores ITS-90 estándar son:

$$RTD_0 = 100\Omega$$

$$a_1 = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$a_2 = -5.775 \times 10^{-7} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-2}$$

$$a_3 = -4.183 \times 10^{-12} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-4}, T < 0 \text{ } ^{\circ}\text{C} = 0, T \geq 0 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

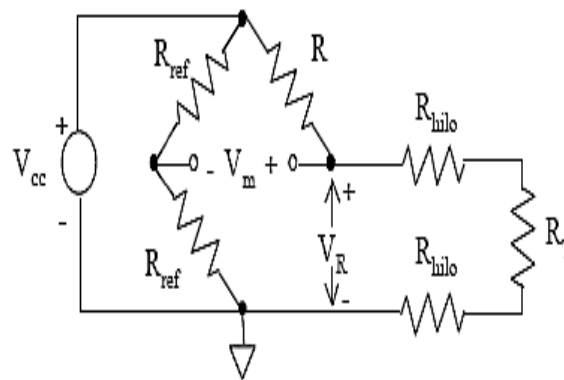
1.2.4 Circuitos para configuraciones de media en dispositivos RTD

Los RTD a diferencia de los termopares, no necesitan una referencia para su conexión a una unidad de medida, en este tipo de dispositivos se realizan unas configuraciones especiales para la medición de valores bajos de resistencia y la posterior conversión a datos de temperatura (Miranda, 2015).

Con el propósito de registrar los datos de temperatura provenientes de la RTD, es necesario hacer circular una corriente fija de tal forma que se genere un voltaje entre las terminales del sensor. Por lo tanto, en el momento que se presenta una variación de temperatura, la RTD cambia su resistividad generando una diferencia de potencial entre sus terminales. El circuito básico que permite generar esta corriente indispensable para el funcionamiento de una RTD es el Puente de Wheatstone en configuración de tres hilos. (Miranda, 2015). A continuación, se expone diversas configuraciones de este circuito.

- **Método de dos hilos:** Debido a que la RTD es un transductor que posee una resistencia muy baja, genera un error en la conexión con dos hilos a un multímetro debido a la resistencia intrínseca de los hilos de conexión. (Miranda, 2015). En la Figura 1-6 se exhibe el circuito para esta configuración correspondiente.

Figura 1- 6: Puente de Wheatstone con el método de dos hilos.



Fuente: Extraído de (Miranda, 2015)

Por ejemplo, una Pt-100 conectada a un multímetro con dos cables de resistencia de 2Ω produce el error de temperatura (Ecuación 1.2):

$$\text{Error} = \frac{2\Omega}{0.00385\frac{\%}{^{\circ}\text{C}} \times 100\Omega} = \frac{2\Omega}{0.00385\frac{\Omega}{^{\circ}\text{C}} \times 100\Omega} = 5.1948 \approx 5^{\circ}\text{C} \quad (1.2)$$

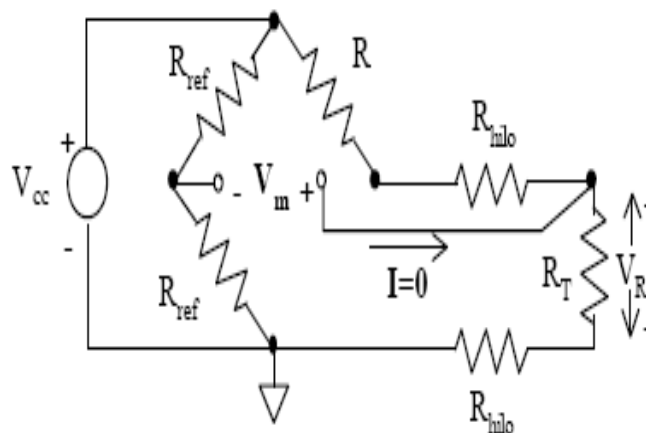
Formando un puente de Wheatstone con un método de tres hilos y excitación de tensión, o una configuración de cuatro hilos con excitación de corriente.

- **Puente de Wheatstone con el método de los tres hilos:** En esta configuración expuesta en la ecuación 1.3, la tensión medida en el multímetro está dada por;

$$V_m = V_R - \frac{V_{cc}}{2} \quad (1.3)$$

La tensión V_R se mide en realidad en una resistencia suma de la del RTD y la de los hilos de conexión. Para minimizar el error se emplea la configuración de tres hilos (Ver **Figura 1-7**), en la que se reduce a la mitad la resistencia parásita de los hilos (Miranda, 2015).

Figura 1- 7: Puente de Wheatstone con el método de tres hilos.



Fuente: Extraído de (Miranda, 2015).

La ecuación 1.4 permite obtener la resistencia del RTD en función del resto de los parámetros del circuito:

$$R_T = (R + R_{hilo}) \left(\frac{V_{cc} + 2V_m}{V_{cc} - 2V_m} \right) - R_{hilo} \quad (1.4)$$

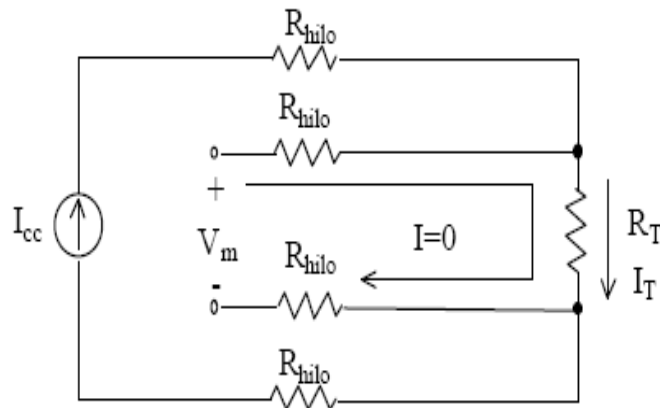
Para obtener esta resistencia, se calcula la tensión VR y luego se aplica $V_m = V_R - V_{cc}/2$. Cabe mencionar, que la configuración elimina el error de hilos de conexión. A tal fin se emplea la configuración de cuatro hilos.

Método de los cuatro hilos: La **Figura 1-8** se muestra la configuración de medida de cuatro hilos, que consigue eliminar el error asociado a los hilos de conexión, empleando una fuente de corriente de polarización en lugar de una fuente de tensión (Miranda, 2015). Por lo tanto, la ecuación 1.5 determina el valor de RTD.

$$R_T = \frac{V_m}{I_T} \quad (1.5)$$

Para minimizar los errores por auto calentamiento la corriente por el RTD no debe superar 1 mA. En consecuencia, la tensión medida no debe superar 0,01 V en una Pt-100.

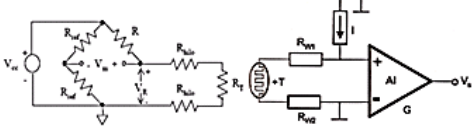
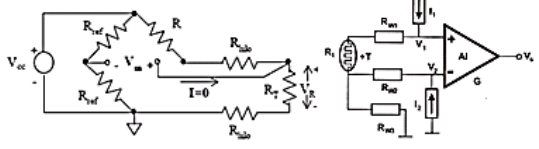
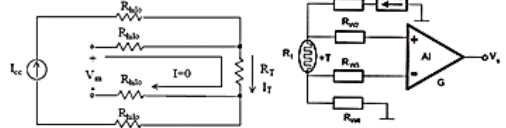
Figura 1- 8: Configuración de medida basada en el método de cuatro hilos.



Fuente: Extraído de (Miranda, 2015).

En **Figura 1-9**, se expone los métodos utilizados y establecidos para obtener la medida de la resistencia de una RTD, con su correspondiente esquemático y características.

Figura 1- 9: Configuraciones de medida.

MÉTODO	ESQUEMÁTICO	CARACTERÍSTICAS
Dos hilos	<p>Con puente de Wheatstone</p>  <p>Con amplificador</p>	<ul style="list-style-type: none"> - De fácil implementación - Bajo coste. - Error elevado en la medición debido a las resistencias de los hilos de conexión.
Tres hilos	<p>Con puente de Wheatstone</p>  <p>Con amplificador</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Minimiza el error de los hilos de conexión. - Implementación moderada, ya que se necesita tener más consideraciones - Su coste es bajo - Fuente de corriente menor de 1mA para minimizar el error por autocalentamiento.
Cuatro hilos	<p>Con divisor</p>  <p>Con amplificador</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Elimina el error de los hilos de conexión. - Fuente de corriente menor de 1mA para minimizar el error por autocalentamiento.

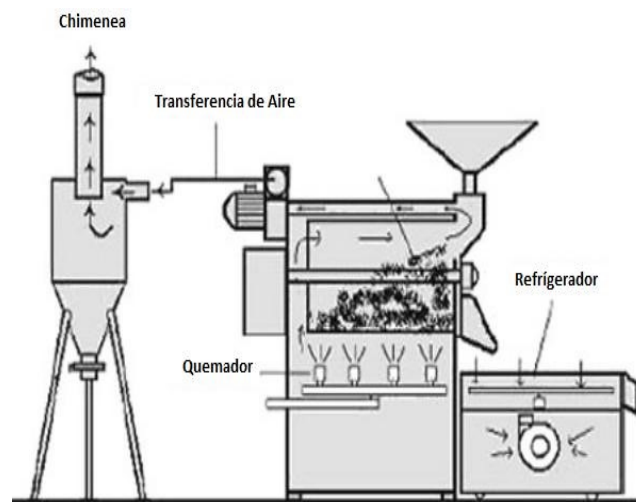
Fuente: Tomado de (Miranda, 2015).

1.2.5 Proceso de tostado de café

El proceso de tostado de café genera una serie de cambios físicos químicos y sensoriales en los granos. El primer paso consiste en el secado, en esta etapa los granos pierden entre el 10 y 12% de humedad, produciendo una redistribución del agua, la caramelización de la sacarosa, así como la pirolisis de los carbohidratos y de las proteínas (Sánchez, Anaya, Vizcarra, & Gutiérrez, G. Santiago, 2007).

El segundo paso está designado por el proceso de tuestión que depende del sabor que se desea lograr; durante este proceso el grano absorbe calor, reduce su humedad y genera una serie de gases. Posteriormente, se genera el denominado "primer crack" el cual el grano aumenta su tamaño, adquiriendo una tonalidad oscura. En algunos casos, se presenta un "segundo crack", liberando calor (Rincón & Cano, 2010). Cabe resaltar, que el sabor depende directamente del grado de pirolisis y la reducción de peso, siendo el color del grano una de las variables a medir para definir el punto deseado de tostado (Sánchez et al., 2007). En la **Figura 1-10** se puede observar un diagrama del proceso de tuestión del café.

Figura 1- 10: Proceso de tuestión del café



Fuente: Extraído de (Rincón & Cano, 2010).

1.2.6 Control de velocidad del motor AC (Motor monofásico)

Los motores monofásicos como su nombre lo indica, son un sistema de alimentación monofásica, establecida por dos líneas, una correspondiente a la fase y neutro. En general, este control de velocidad se ejecuta con una potencia baja, aunque en la industria son utilizados a diversas potencias según a emplear. En la **Figura 1-11**, se observa un motor AC monofásico síncrono empleado para el control de velocidad, de 0.5 H.P. operando hasta 1.800 R.P.M. con alimentación de 120/220 VAC (Camacho, Martínez, Saad, Valenzuela, & Valdés, 2014).

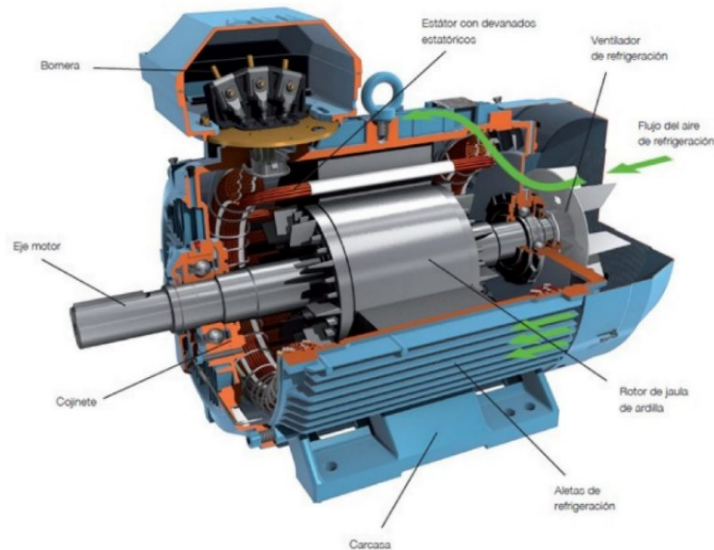
Figura 1- 11: Motor monofásico síncrono



Fuente: (Camacho, Martínez, Saad, Valenzuela, & Valdés, 2014)

La velocidad de un motor monofásico síncrono se puede inspeccionar de dos formas según su alimentación; la primera forma está dada por el ajuste de la tensión y la segunda consiste en la variación de frecuencia. En el presente trabajo la variación de velocidad se realizó mediante el cambio de la tensión sobre el control de fase, en otras palabras, se alteró la tensión eficaz de alimentación designada con sus siglas VRMS (Camacho, Martínez, Saad, Valenzuela, & Valdés, 2014).

En la **Figura 1-12**, se observa las partes de un motor A.C síncrono, identificando las piezas de bodega, eje motor, cojinete, rotor de jaula de ardilla, ventilador de refrigeración y estator con devanados estáticos. Cabe destacar, que un motor tiene dos piezas fundamentales, que son el estator que depende del tipo de máquina sincrónica y del rotor, que contiene un devanado de campo y en corto circuito, al contar con estas piezas se puede tener una conexión para el trabajo a ejecutar. (De, Javier, Claudia, & Flores, 2014)

Figura 1- 12: Partes de un motor A.C. síncrono.

Fuente: (De et al., 2014)

Así mismo, existe dos máquinas según su rotor; máquina con rotor salientes y máquinas con rotor liso; considerando la primera, cuando el rotor presenta una ampliación y las segunda, cuando el devanado de campo se encuentra dividido en bobinas localizadas en lugares donde hay movimiento del rotor (De et al., 2014) (Sanjuán Pinilla & Sarmiento, 2010).

Las bobinas asignadas como, inductor e inducido están conectados en serie mediante las escobillas y el colector. Cuando una corriente circula por ellos, el bobinado inductor forma el campo magnético y el inducido al ser recorrido por la corriente y sometido a la influencia del campo magnético inductor, genera un desplazamiento debido al este par inducido, dando origen al giro del rotor. Por consiguiente, para aumentar la velocidad del motor se debe aumentar la fuerza en dependencia de los parámetros dinámicos que pueda tener la carga (Sanjuán Pinilla & Sarmiento, 2010).

1.2.7 Control de fase

El control de voltaje se logra mediante el control de fase en virtud de la conmutación física que utiliza pares de controlado de silicio rectificadores (SCR) o en su defecto un triac (Figura 1-13).

Figura 1- 13: Formas de onda del control de fase.

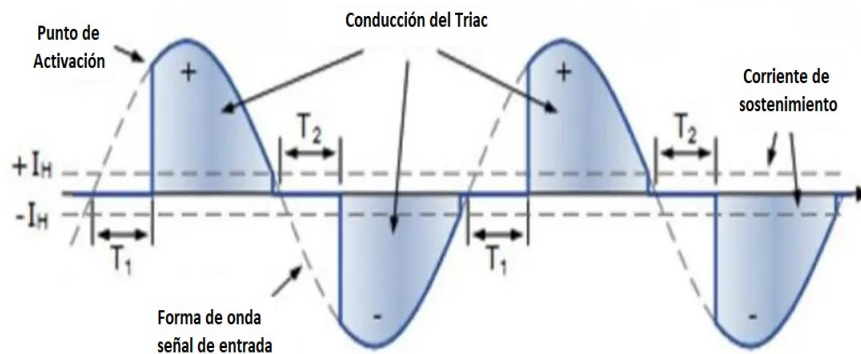
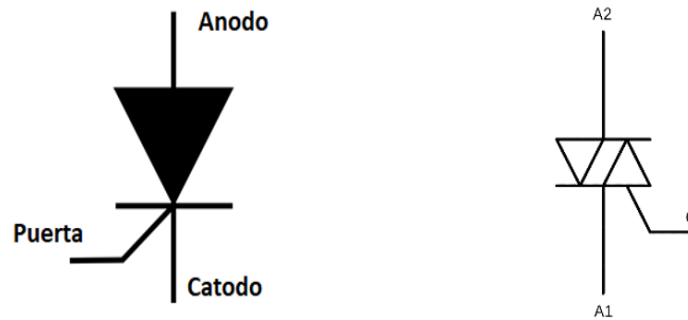


Figura: (Ximhai, Aguilera-Morales, Hernández-Sánchez, Mendieta-Sánchez, & Herrera-Fuentes, 2012)

Un rectificador controlado de silicio (S.C.R.), es un tipo de tiristor que contiene tres terminales, siendo estas, ánodo asignada con la letra A, el cátodo relacionado con la letra C y la puerta, con la letra G, como se puede observar en la **Figura 1-14**. El funcionamiento de un rectificador controlado de silicio esta dado cuando se circula una corriente eléctrica por el terminal denominado puerta, activando la conexión completa. En otras palabras, conectando el terminal ánodo y cátodo. Si se desea tener una conexión en ambos sentidos se opta por conectar dos SCR en anti paralelo, uniendo las terminales puerta (Ximhai et al., 2012).

Figura 1- 14: Símbolo del (a) SCR y del (b) Triac.



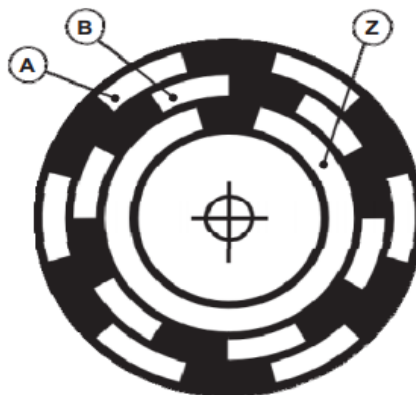
Fuente: (Ávila, 2013)

Para el control de fase se requiere la sincronización de la onda sinusoidal con la red eléctrica para lograr disparar el TRIAC, este disparo esta dado un tiempo conocido como ángulo de disparo, que conlleva a activar el motor. Para el control de velocidad del tambor de la tostadora se utilizó la alimentación de 120V a 60Hz, es decir, un periodo de 16,66ms de la red eléctrica y un tiempo de retardo con un rango de 0 y 10ms, correspondiente al 100% y 0% de la potencia eficaz, entregada al motor (Ávila, 2013).

1.2.8 Medición de la velocidad del motor

Las mediciones de velocidad son muy utilizadas en los encoders incrementales, (Ver **Figura 1-15**) en vista que permite ejecutar dos trenes de pulso en forma de ondas cuadradas, es decir, ondas desfasadas en 90° (López Morales & Morales Ceballos, 2016).

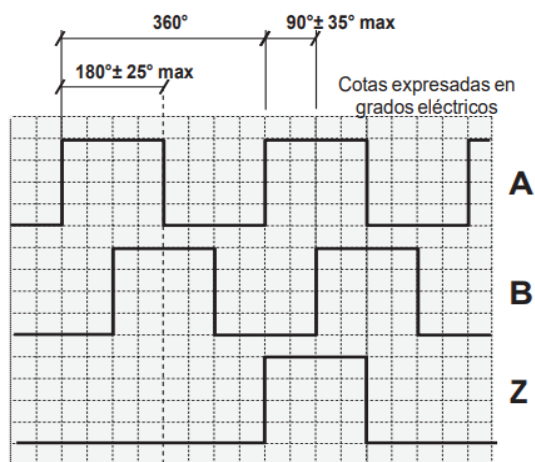
Figura 1- 15: Representación de las señales incrementales A, B y Z en disco óptico.



Fuente: (López Morales & Morales Ceballos, 2016).

Usualmente, los encoders poseen tres canales; siendo el primer canal, nombrado como “Canal A” que adquiere la velocidad de rotación, y el segundo canal denominado como, señal "B" que define el sentido de rotación. Por último, dispone del canal Z, cero o nulo, el cual permite otorga la perspectiva absoluta de cero del eje del encoder, como se exhibe en la **Figura 1-16** (López Morales & Morales Ceballos, 2016).

Figura 1- 16: Representación gráfica de las señales incrementales A, B, y Z.



Fuente: (Rodríguez Palacios & Peñarete Rodríguez, 2011).

Para poder determinar los grados eléctricos es necesario aplicar la ecuación 2.11; la cual decreta el error del encoder para dos ondas seguidas.

$$360^{\circ} \text{ electricos} = \frac{360^{\circ} \text{ mecanicos}}{\# \text{ de impulsos/giro}} \quad (2.11)$$

En contraste, el enconder tiene un rango de error incremental de $\pm 25^{\circ}$, dicho de otra manera, corresponde a un desplazamiento de aproximadamente 7% del valor teórico (Rodríguez Palacios & Peñarete Rodríguez, 2011).

Capítulo 2. Diseño de ingeniería

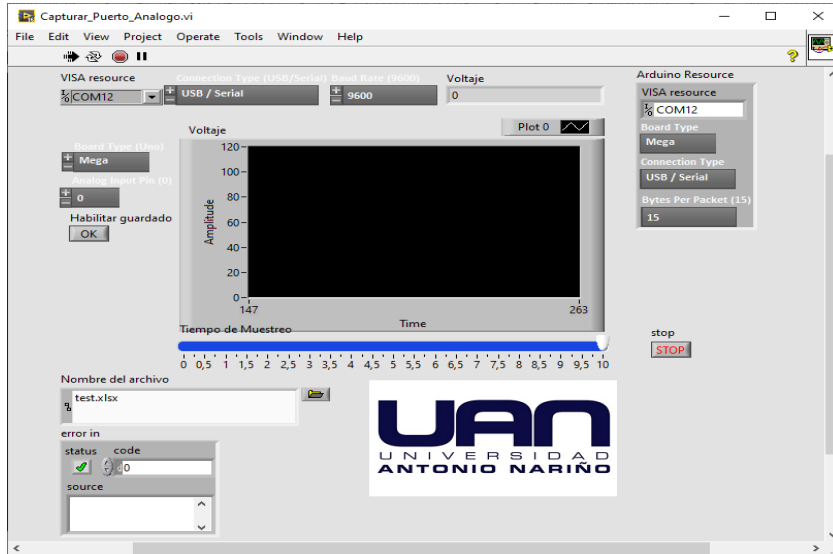
Este capítulo se describe el proceso de adquisición de las señales, además de la identificación y las características de diseño del Controlador PID para el control de temperatura del tostador de café automatizado.

2.1 Diseño del control de temperatura del tostador de café automatizado

En la **Figura 2-1** y **Figura 2- 2**, se puede observar la interfaz gráfica y el diagrama de bloques de programación de la aplicación desarrollada en Labview, por medio de esta se realizó una conexión con una placa de desarrollo Arduino para la adquisición de la temperatura usando el termopar PT100. Los datos de estas mediciones se registraron en un archivo de Excel con el propósito de realizar la posterior identificación de la planta.

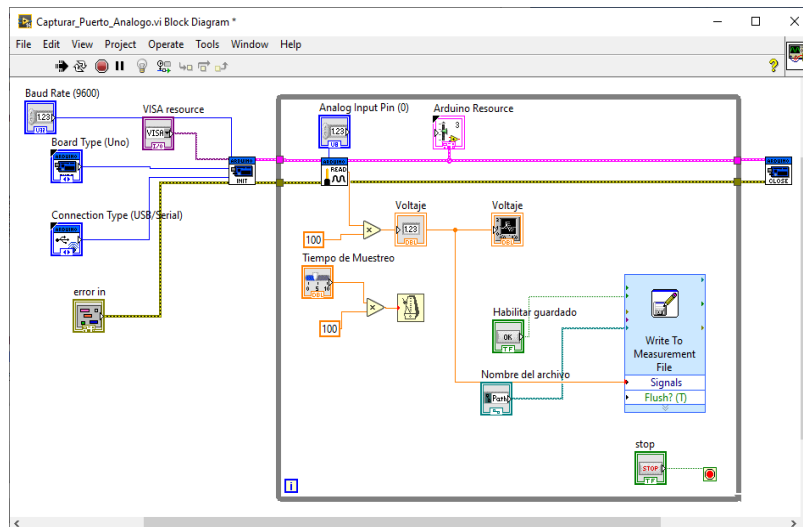
24 Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila.

Figura 2- 1: Panel frontal de la interfaz gráfica que permite la adquisición de la temperatura del tostador de café.



Fuente: Autores.

Figura 2- 2: Diagrama de bloques del aplicativo que permite la adquisición de la temperatura del tostador de café.



Fuente: Autores.

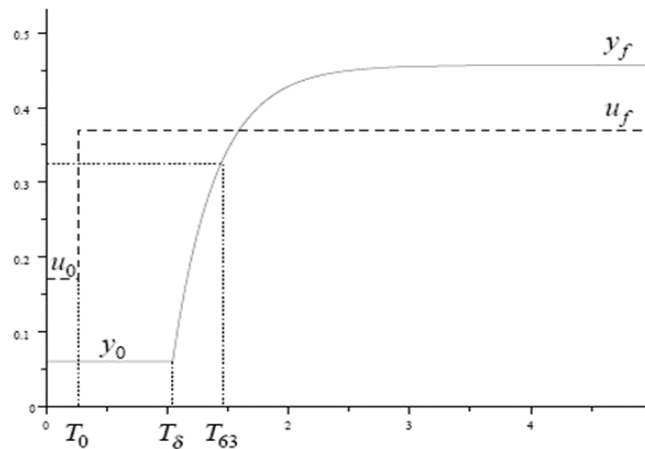
2.1.1 Modelo de la señal de temperatura por el método de Van Der Grinten

En la práctica existen diferentes sistemas dinámicos o procesos, los cuales carecen de identificación de su función de transferencia. En la actualidad existen diversos métodos para la obtención de los parámetros del modelo matemático del proceso, entre estos se destaca el método de VAN DER GRINTEN, en esta técnica los parámetros de la respuesta del sistema a lazo abierto se hallan de forma gráfica.

Por otra parte, existen técnicas más avanzadas llamadas técnicas de identificación de sistemas, en donde se realizan análisis de correlación, análisis espectral, y estima de mínimos cuadrados con modelo ARX.

La finalidad de la obtención del modelo es poder diseñar el controlador de la planta que va a ser embebido, para posteriormente realizar el control clásico o moderno, realizando una comparación.

Figura 2- 3: Método de identificación gráfica.



Fuente: Autores.

La forma de identificar el sistema de primer orden con retardo a partir de una respuesta escalón dio con las siguientes mediciones:

Medir:

- u_0 Nivel inicial de entrada.
- U_f Nivel final de entrada.
- y_0 Nivel inicial de salida.
- y_f Nivel final de salida.
- T_0 Tiempo de cambio de la entrada.
- T_δ Tiempo en que la salida comienza a responder.
- T_{63} Tiempo en que la salida alcanza el 63.2% de $y_f - y_0$.

Calculando,

$$K = \frac{y_f - y_0}{u_f - u_0}$$

$$\tau = T_{63} - T_\delta$$

$$T_r = T_\delta - T_0$$

La función de transferencia se expresa en la ecuación 2.1.

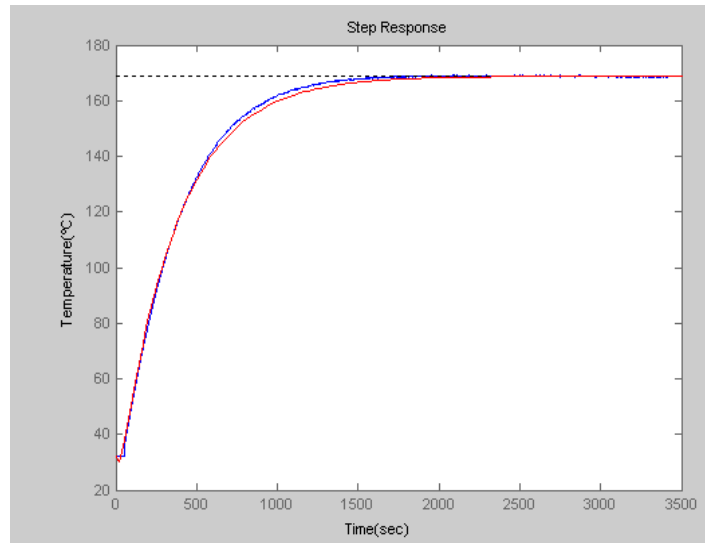
$$G(s) = \frac{Ke^{-sT_r}}{\tau s + 1} \quad (2.1)$$

El método de VAN DER GRINTEN, es un método de fácil implementación para la identificación de plantas; en este proyecto se utilizó la gráfica de respuesta a un escalón en la entrada, siguiendo los siguientes pasos:

- Paso 1: La entrada al horno consistió en un voltaje de 20V, para alcanzar la curva de máxima excursión en temperatura.
- Paso 2: Posteriormente se enviaron los datos capturados al computador para su posterior análisis.

- Paso 3: Los datos obtenidos, se graficaron teniendo en cuenta que el eje x designado como tiempo de muestreo en segundos; el eje y, denominado la temperatura, medida en °C. En la **Figura 2- 4**, se puede observar el resultado obtenido. La curva azul corresponde a la real resultante.

Figura 2- 4: Comportamiento real y aproximado del tambor del horno.



Fuente: Autores

- Paso 4: Se calculó la curva aproximada. Para esto se evidenció el comportamiento real de la planta en primer orden. Utilizando las ecuaciones anteriores se obtuvo la ecuación que modela el comportamiento de la planta (ecuación 2.2). Los cálculos se realizaron en MATLAB en el archivo datosPlanta2.m que se puede encontrar en el cd.

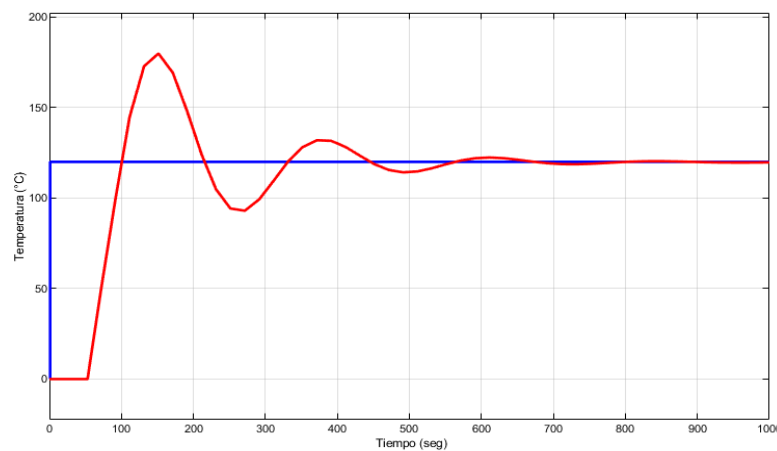
$$G(s) = \frac{6.822e^{-52s}}{345s+1} \quad (2.2)$$

Con esta ecuación se logró graficar y comparar el comportamiento real de la planta. En la **Figura 2- 4**, la curva de color rojo evidenció el comportamiento aproximado de la planta. Realizando este respectivo paso, se visualizó que el comportamiento calculado se aproxima en gran medida al comportamiento real de la planta.

2.2 Diseño del control PID

La modelación de la planta se realizó en la plataforma de Matlab con Autotuning, por medio de este se lograron calcular las constantes del controlador PID de temperatura del tambor de la tostadora de café. En la **Figura 2-5** se observa la respuesta en lazo cerrado del sistema identificado, señalando un sobreimpulso del 30% con un tiempo muerto no mayor a los 60 segundos, el cual es el tiempo requerido para iniciar el calentamiento; el tiempo de establecimiento total es de unos 900 segundos.

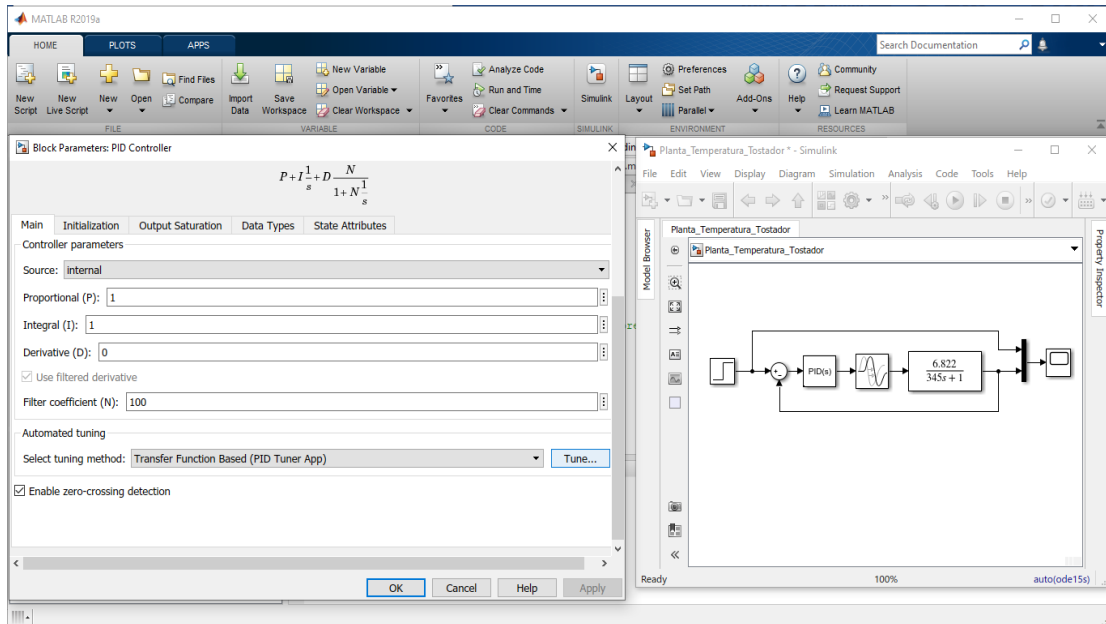
Figura 2- 5: Simulación en Matlab del comportamiento aproximado de la temperatura del tambor del horno.



Fuente: Autores.

En la **Figura 2- 6**, se puede evidenciar que la utilización del sintonizador PID proporcionó un método de ajuste de lazo cerrado rápido y de amplia aplicación para los bloques del controlador PID Simulink®. Con este método, se optó por ajustar los parámetros del controlador PID logrando un diseño robusto con el tiempo de respuesta deseado.

Figura 2- 6: Simulación en Matlab del comportamiento aproximado de la temperatura del tambor del tostador de café.



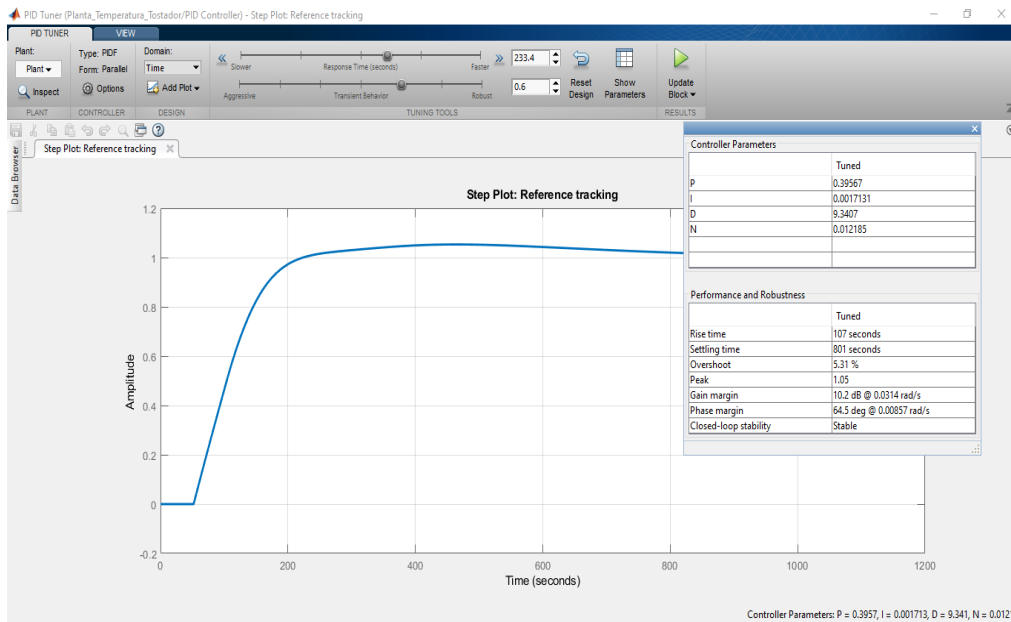
Fuente: Autores.

Al ejecutar el sintonizador PID, el software calculó un modelo de planta linealizado visto por el controlador, logrando un equilibrio razonable entre rendimiento y robusta. El software automáticamente identificó la entrada y salida de la planta, utilizando el punto de operación actual para la linealización. Cabe mencionar, que la planta puede tener cualquier configuración y retrasos.

En la **Figura 2- 7**, se puede observar los parámetros del PID obtenidos para la planta, siendo estos; un $P=0,39567$, un $I=0,0017131$ y un $D=9,3407$. De igual manera, se observó que el tiempo de levantamiento, t_r , es de 107 segundos, el tiempo de establecimiento, t_s , es de 801 segundos, presenta un sobre impulso del 5,31%, con un margen de ganancia de 10,2 dB con frecuencia de $\omega_{MG}=0,0314$ rad/s. Así mismo, una margen de fase de 64,5 grados acompañado con una frecuencia de $\omega_{MF}=0,00857$ rad/s.

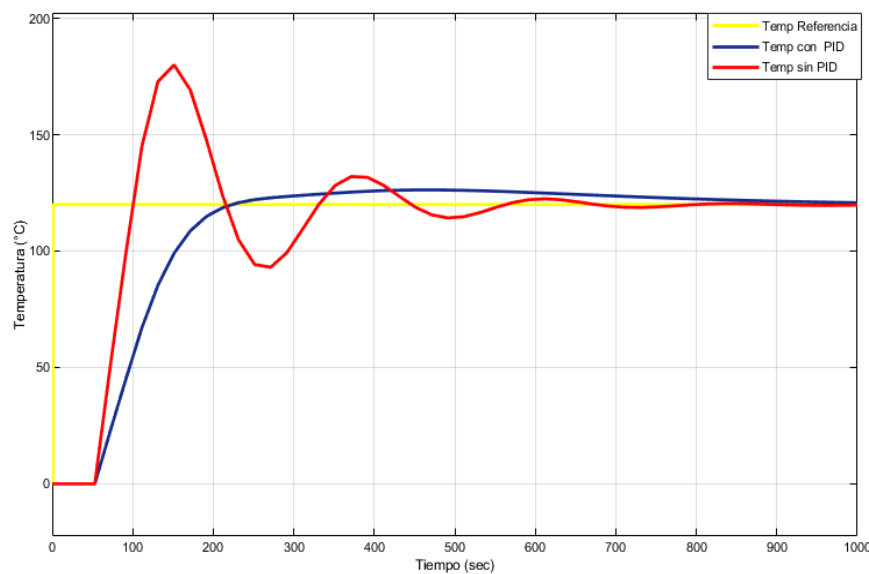
30 Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila.

Figura 2- 7: PID Tuner de la variable de temperatura del tambor Tostador de café.



Fuente: Autores.

En la **Figura 2- 8** se visualizó la entrada de referencia al sistema fijo en 120 °C, línea de color amarillo. La respuesta del sistema sin controlador se observa de color rojo y la respuesta del sistema con control PID de color azul. Durante esta fase se demostró la disminución del sobre impulso del 30%, aunque su tiempo de levantamiento fue más largo (tres veces) con respecto a la respuesta del sistema sin controlador y un tiempo de establecimiento un poco menor, aproximadamente 100 segundos con respecto al sistema sin controlador.

Figura 2- 8: PID Tuner de la variable de temperatura del tambor Tostador de café.

Fuente: Autores.

2.3 Diseño del control de velocidad del tostador de café automatizado.

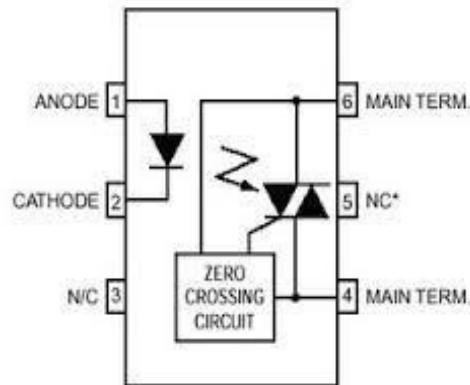
A continuación, se describe el proceso de adquisición de la señal de velocidad del motor de la tostadora de café para la identificación y las características de diseño del controlador PID de velocidad del tostador de café automatizado.

2.3.1 Diseño del circuito de detector de cruce por cero

El circuito detector de cruce por cero está fijado por el optoacoplador MOC304 (**Figura 2-9**) que permite aislar la corriente alterna (AC) que afecta el microcontrolador. Por otro lado, el optoacoplador de salida MOC3041 de Fairchild, es un conductor TRIAC de cruce cruzado compuesto por DIP de 6 pines. Adicionalmente, esta configuración contiene un diodo emisor infrarrojos (GaAs) que se ajusta a un detector de silicio monolítico logrando una funcionalidad de un TRIAC doble de cruce de voltaje nulo. Este circuito alimenta

corriente alterna con valor de 115V; los relés de estado sólido, controles industriales, impresoras láser, motores, electrodomésticos, entre otros son algunos ejemplos donde es empleado (Sarmiento, 2016).

Figura 2- 9: Configuración interna del MOC3040 para el circuito detector de cruce por cero.



Fuente: (César Cantú-Martínez, 2014)

Para calcular el valor de las resistencias se hizo uso de los datos entregados por el fabricante, como podemos ver en la **Tabla 2-1**.

Tabla 2- 1: Características del optoacoplador MOC3040.

Entrada del diodo		
Variable	Cantidad	Unidad
Corriente en directa	50	mA
Voltaje inverso	6	Voltios
Potencia disipada	120	mW
Salida del fotoTriac		
Variable	Cantidad	Unidad
Voltaje de salida	400	Voltios
Corriente pico inverso	1	Amperio
Potencia disipada	150	mW

Fuente: (Díaz Encinas & Fuentes Navarro, 2018)

La entrada del diodo la corriente en directa se maneja es de 50mA, según fabricante, cuyo valor mínimo es el 26% de dicho valor. El voltaje con que trabajo el Arduino es 5 voltios, en el cual se calculó con la ecuación 2.3.

$$R_D = \frac{V_{CC} - V_T}{0.25 * I_D} = \frac{5v - 0.7v}{0.26 * 50mA} = 330\Omega \quad (2.3)$$

La potencia máxima que disipó se calculó con la ecuación 2.4.

$$P_D = V_{CC} * I_D = 5v * 50mA = 0.25 W \quad (2.4)$$

Para calcular la resistencia del circuito a la salida se consultó el datasheet, trabajando a una frecuencia de 60 Hz, es decir, un periodo de 16,66mS y voltaje de 120v. Este cálculo se realizó con la ecuación 2.5.

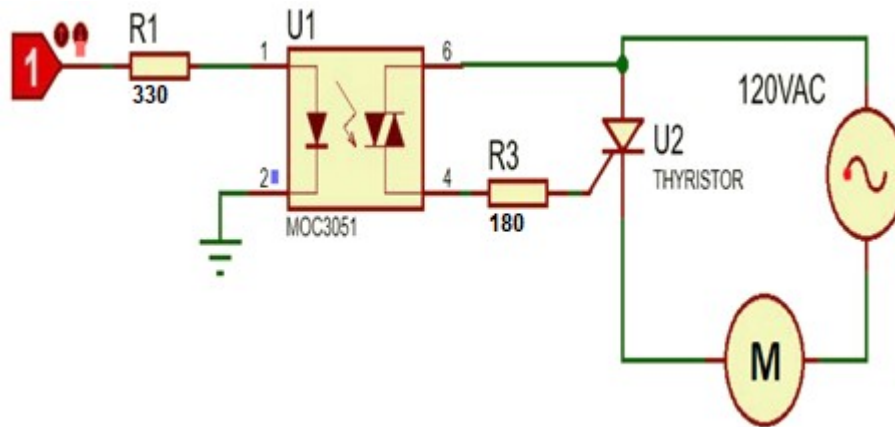
$$R_s = \frac{V_p}{0,95 I_{DPI}} = \frac{\sqrt{2} * 120V}{0,95(1 Amp)} = 178,63\Omega \quad R_s \cong 180 \quad (2.5)$$

Otro fenómeno importante para asegurar el correcto funcionamiento del optotriac es el dv/dt estático, por el cual el TRIAC puede ser engatillado como resultado del ruido eléctrico en la carga de salida, aun sin ninguna señal de engatillado ($L_f=0$) en la entrada. Según los datos suministrados por el fabricante se realizó la ecuación 2.6.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{0,63 V_{m\acute{a}x}}{\tau_{RC}} = \frac{0,63 * 120V}{180\Omega * 0.01\mu F} = 42 \frac{v}{\mu s} \quad (2.6)$$

La **Figura 2-10** se expone el circuito de disparo utilizado para el control de velocidad del motor en corriente alterna.

Figura 2- 10: Circuito de disparo para el control de velocidad del motor AC.

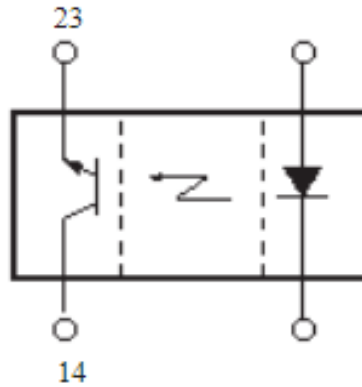


Fuente: (Batista de Oliveira & Ciqueto Peres, 2015)

2.3.2 Circuito sensor de velocidad

El sensor tomado para realizar esta función es OPB606A (**Figura 2-11**). Los sensores reflectantes consisten en un diodo emisor de infrarrojos y un fototransistor de silicio NPN montados uno al lado del otro en una carcasa de plástico negro. La radiación en el eje del emisor y la respuesta en el eje del detector son perpendiculares a la cara del OPB606A. El fototransistor responde a la radiación emitida por el diodo solo cuando un objeto o superficie reflectante se encuentra en el campo de visión del detector (León Sicard, 2005).

Figura 2- 11: Configuración interna del OPB606A para el circuito del sensor de velocidad.



Fuente: (León Sicard, 2005)

Tabla 2- 2: Características eléctricas del sensor OPB606A.

Entrada del diodo		
Variable	Cantida d	Unidad
Corriente en directa ($V_F = 1.7v$)	50	mA
Voltaje inverso	5	Voltios
Potencia disipada	100	mW
Salida del Opto Transistor		
Variable	Cantida d	Unidad
Voltaje colector emisor	10	Voltios
Corriente colector ($V_{CEsat} = 0,4v$)	100	μA
Potencia disipada	100	mW

Fuente: (DigiKey, n.d.)

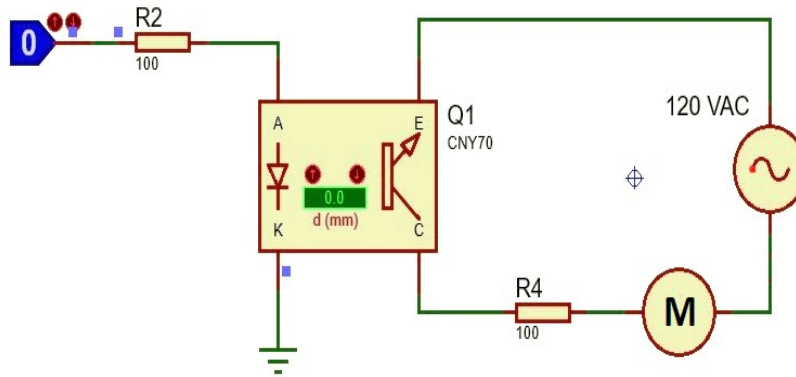
Para calcular el valor de las resistencias se usó los datos entregados por el fabricante para el sensor, como podemos ver en la **Tabla 2-2**. La entrada del diodo la corriente en directa que se maneja es de 50mA, a un voltaje en directa de 1.7v. Calculando se obtuvo la ecuación 2.7.

$$R_D = \frac{V_{CC}-V_T}{I_D} = \frac{5v-1.7v}{50mA} \cong 66\Omega \tag{2.7}$$

Esta resistencia se toma de 120Ω . Para la etapa de salida se polarizo el fototransistor. Para ello se recurrió a los datos del fabricante para poder determinar la correcta operación de este. La corriente de saturación de salida del fototransistor es 20mA , a un voltaje en directa de 0.4V (**Figura 2-12**). Se determinó R_S con la ecuación 2.8:

$$R_S = \frac{V_{CC} - V_T}{I_S} = \frac{5\text{V} - 0.4\text{V}}{100\mu\text{A}} \cong 46\text{K}\Omega \quad (2.8)$$

Figura 2- 12: Circuito del encoder digital para el control de velocidad de motor A.C.



Fuente: (Zoraida Plazas-Leguizamón & Francisco García-Molano, 2014)

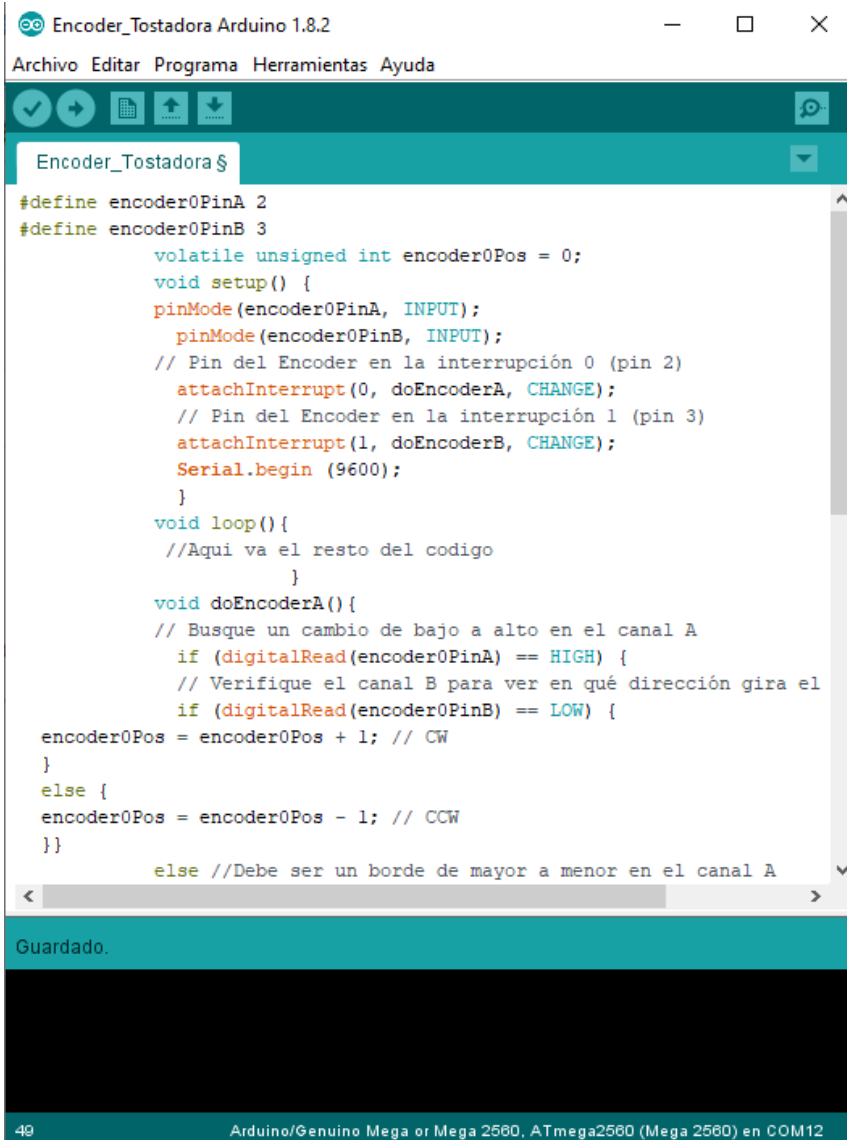
2.3.3 Captura de la variable de velocidad

Para recopilar la información capturada por el sensor y monitorear la variable de velocidad del tambor del tostador, fue necesario implementar un sistema para capturar la variación de dichas señales en el tiempo. Esto se logró mediante la transmisión y visualización de datos vía puerto USB en el monitor serial de la interfaz Arduino con un while-loop creado en Labview que permitió capturar los datos en un Excel para ser exportados a Matlab y poder realizar la identificación de esta. Para esto se estableció los pines 2 y 3 como entradas para el encoder, siendo estos mismos definidos como entrada en el Arduino. Posteriormente, estos son activados mediante las interrupciones de forma tal que este

aviso provocado por el módulo del PIC, por un cambio en el estado de un pin correspondiente. Es entonces cuando interrumpirá la tarea que se esté haciendo en ese momento y pasaremos a ejecutar la rutina de interrupción, como se puede observar en la **Figura 2-13**.

Las señales obtenidas en Matlab, como se muestra en la **Figura 2-14**, son exportadas por intermedio del Toolbox de identificación hallando el modelo de la planta para el control de velocidad.

Figura 2-13: Parte del código generado para realizar la captura de la velocidad mediante el encoder.



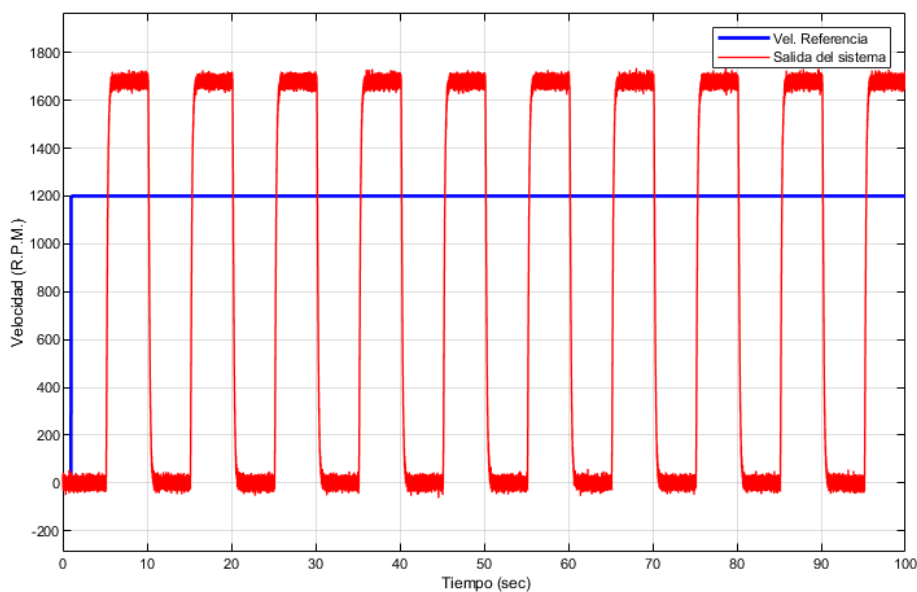
```
Encoder_Tostadora Arduino 1.8.2
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

Encoder_Tostadora $
#define encoder0PinA 2
#define encoder0PinB 3
    volatile unsigned int encoder0Pos = 0;
void setup() {
  pinMode(encoder0PinA, INPUT);
  pinMode(encoder0PinB, INPUT);
  // Pin del Encoder en la interrupción 0 (pin 2)
  attachInterrupt(0, doEncoderA, CHANGE);
  // Pin del Encoder en la interrupción 1 (pin 3)
  attachInterrupt(1, doEncoderB, CHANGE);
  Serial.begin (9600);
}
void loop(){
  //Aqui va el resto del codigo
}
void doEncoderA(){
  // Busque un cambio de bajo a alto en el canal A
  if (digitalRead(encoder0PinA) == HIGH) {
    // Verifique el canal B para ver en qué dirección gira el
    if (digitalRead(encoder0PinB) == LOW) {
encoder0Pos = encoder0Pos + 1; // CW
    }
  }
  else {
encoder0Pos = encoder0Pos - 1; // CCW
  }
}
  else //Debe ser un borde de mayor a menor en el canal A
```

Fuente: Autores.

38 Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila.

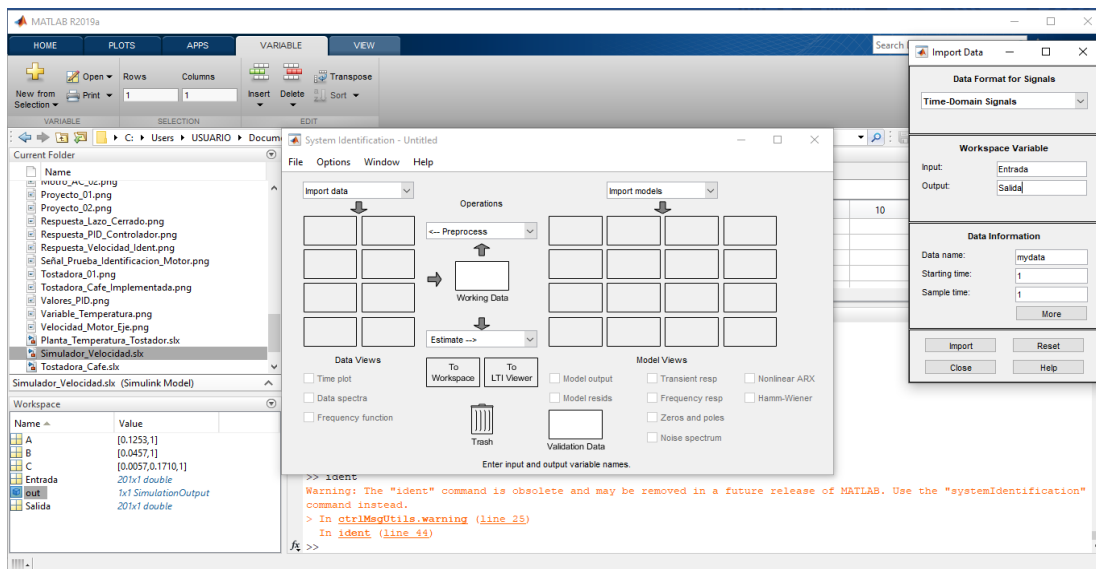
Figura 2- 14: Respuesta del motor para el proceso de identificación.



Fuente: Autores.

En la Figura 2-15 se evidencio la ventana principal de Toolbox de identificación, en la cual se agregaron las variables de entrada y salida en el dominio del tiempo.

Figura 2- 15: Ingreso de los datos al Toolbox de identificación

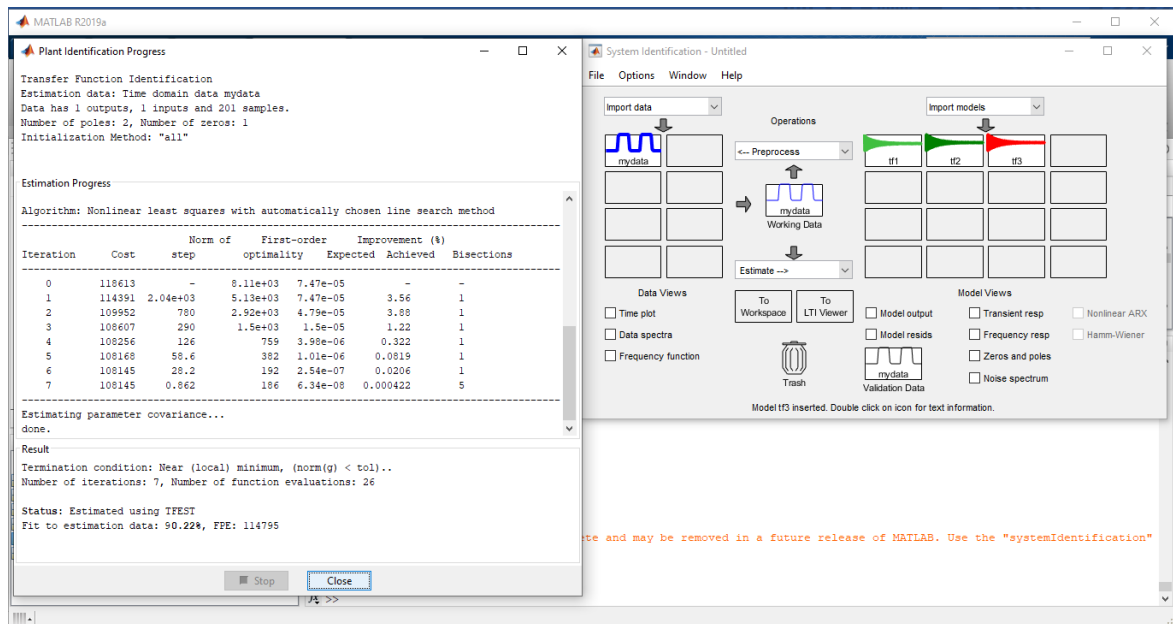


Fuente: Autores.

Posteriormente, se realizó el preprocesamiento de la señal para realizar la estimación de la función de transferencia del sistema (Ver **Figura 2-16**). Existen varias opciones para el preprocesamiento de la señal de entrada y salida del sistema; al desplegar el menú del cuadro de lista en la parte de operaciones, se observó varias opciones, siendo estas; Select Channel para asociar los datos de entrada y salida a un canal dado por el usuario, Select experiments para selección del conjunto de experimentos asociados a uno o múltiples canales, Mergen experiments para fusionar los datos de los objetos IDDATA, Select range para la selección de rangos de datos en entrada y salida en un estudio parcial del sistema.

Así mismo, Remove means para remover el valor medio de la señal de entrada y salida, Remove trends para remover las tendencias que puedan sesgar los registros y por último, Filters para filtrar el ruido que poseen las señales de entrada y salida por medio de un filtro pasa bajo o pasa banda según se desee.

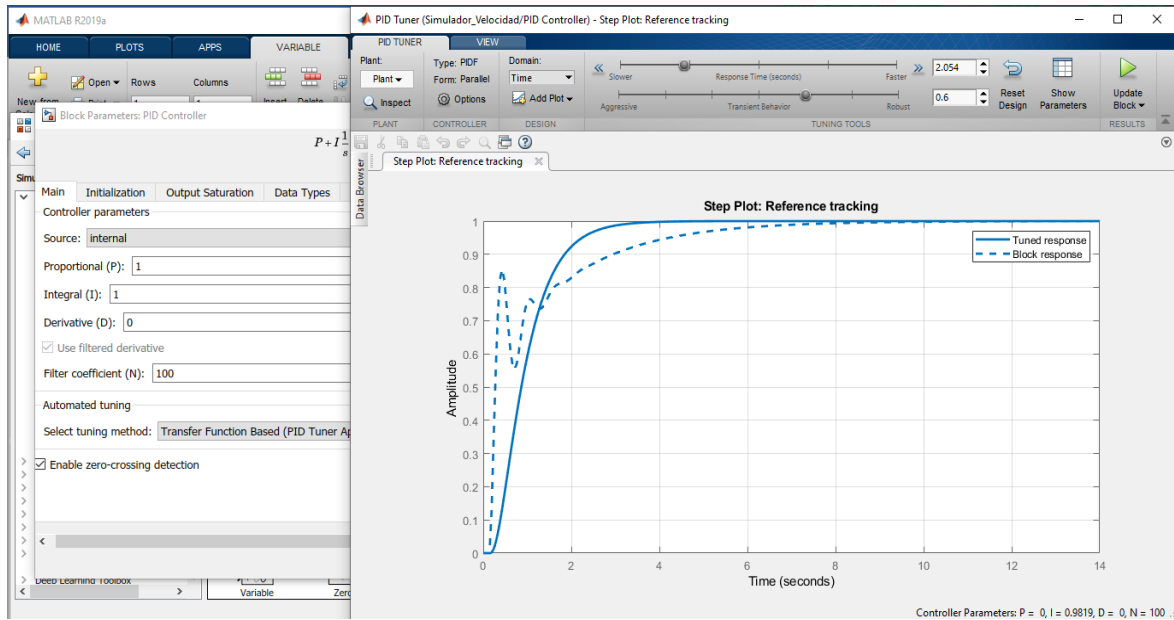
Figura 2- 16: Verificación de las señales ingresadas al Toolbox de identificación



Fuente: Autores

40 Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila.

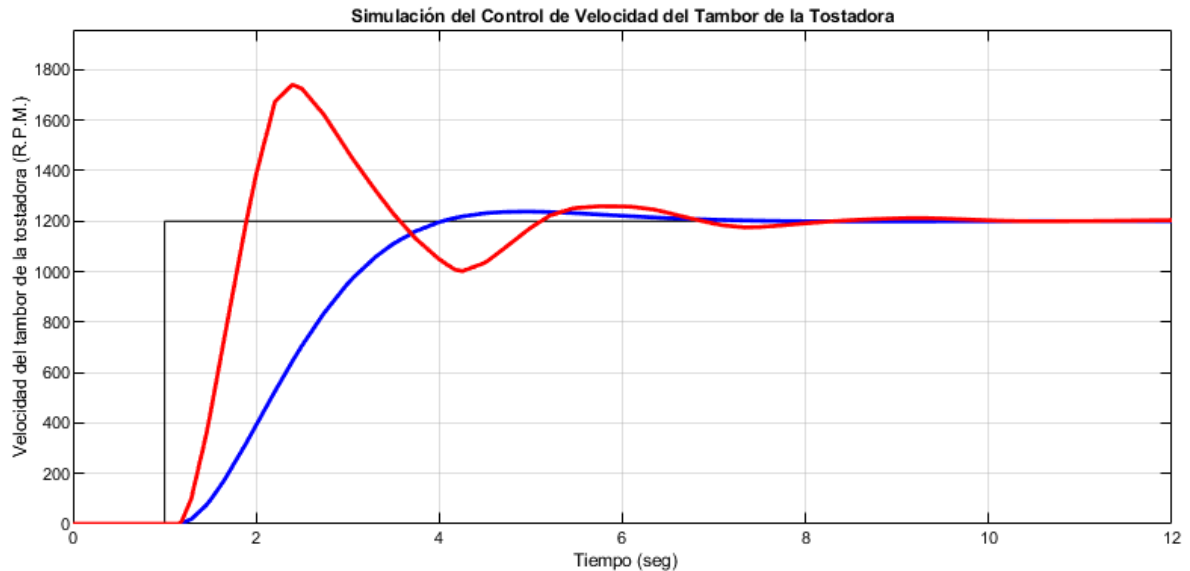
Figura 2- 17: Estimación de la función de transferencia con el Toolbox de identificación.



Fuente: Autores.

En la **Figura 2-17** se observó el PID Tuner con los valores iniciales del sistema. Las variables obtenidas fueron: $P = 1.84$, $I = 0.565$ y $D = 0.02191$. Los resultados de la simulación se observan en la **Figura 3-18**.

Figura 2- 18: Simulación del Control PID de la velocidad del tambor de la tostadora de café.



Fuente: Autores.

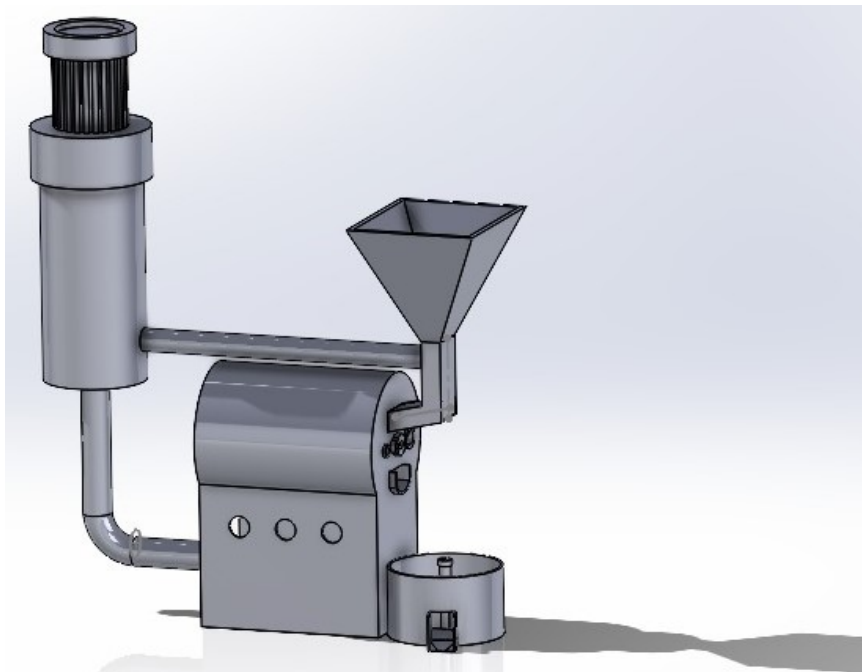
La **Figura 2- 18** compara la velocidad de referencia, la velocidad con PID y la velocidad sin PID respectivamente. Se examinó la sobre oscilación del 42% en la velocidad del sistema sin el control PID (color rojo), con tiempo de establecimiento de 10 segundos, el tiempo de levantamiento y retardo con 2 segundos. La velocidad del sistema con PID (color azul) elimina el sobre impulso suavizando la respuesta del sistema añadiendo un retardo de dos segundos. El tiempo de establecimiento se logró a los 18 segundos, un tiempo de levantamiento de once segundos y un retardo de cuatro segundos, respectivamente.

Capítulo 3. Análisis de resultado

Este capítulo describe los resultados obtenidos de los dos controladores en los procesos de control de temperatura en el tambor de tostión y de velocidad en el eje del tambor en la tostadora de café.

En la siguiente figura 3-1 podemos observar el diseño en Solidwork de la tostadora de café. Esta presenta las siguientes características: tiene un cilindro externo de 25 cm de diámetro y una profundidad de 32 cm. El cilindro interno tiene un diámetro de 20 cm y una profundidad de 23 cm. La entrada de la tolva es cuadrada de 22 cm de lado. La chumacera tiene un radio de 10 cm y una altura de 90 cm.

Figura 3- 1: Tostadora de café automatizada.



Fuente: Autores

44 Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y velocidad del tambor mezclador de una tostadora de café para el beneficiadero “La Esperanza”, en el municipio La Plata, Huila.

Al diseñar en Matlab los controles PID de velocidad del tambor de la tostadora (Ver **Figura 3-1**) y de temperatura se realizó la implementación en forma embebida, incluyendo los ficheros para manejar el encoder (TimerOne.h) y la LCD TFT Nextion (Nextion.h), respectivamente. Luego se estableció los pines de entrada analógica usados en la tarjeta arduino para los sensores de temperatura (A0) y para el sensor de velocidad (A2). Así mismo, se configuro los pines que de los actuadores en este caso la válvula proporcional y la compuerta del TRIAC, como se puede ilustra en la Figura 3-2.

Figura 3- 1: Tostadora de café automatizada.



Fuente: Autores

Figura 3- 2: Parte del código embebido en Arduino de la tostadora de café

```

Control_Embebido_PID_VELyTEMP Arduino 1.8.2
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Control_Embebido_PID_VELyTEMP $
/*****
 * ***** CONTROL PID DE TEMPERATURA Y VELOCIDAD *****
 * ***** By: OSCAR JAVIER ARIAS *****
 * ***** CAMILO ANDRES MEDINA TORRES *****
 * ***** UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO *****
 * *****
 */
#include <TimerOne.h>
#include <Nextion.h>
// Definiciones componentes de la tarjeta
#define sensor1 A0 //SENSOR TERMOCUPLA PT100
#define sensor2 A2 //SENSOR ENCODER
#define valve 3 //VALVULA PROPORCIONAL GAS
#define encoder 5 //ENCODER
#define hot 9 //Led
//Variables Globales
float T1,aux1; //Temperatura del tambor
float r1=0.0; //Referencia de Temperatura del tambor de la tostadora
float V1,aux2; //Velocidad del Tambor
float r2=0.0; //Referencia de Velocidad
volatile float u=0.0,u_l=0.0; //Acción de Control
byte Ts = 8; //Periodo de muestreo
//Parámetros del PID
float kp1,ti1,td1;
float kp2,ti2,td2;
Guardado.
8 Arduino/Genuino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) en COM12

```

Fuente: Autores

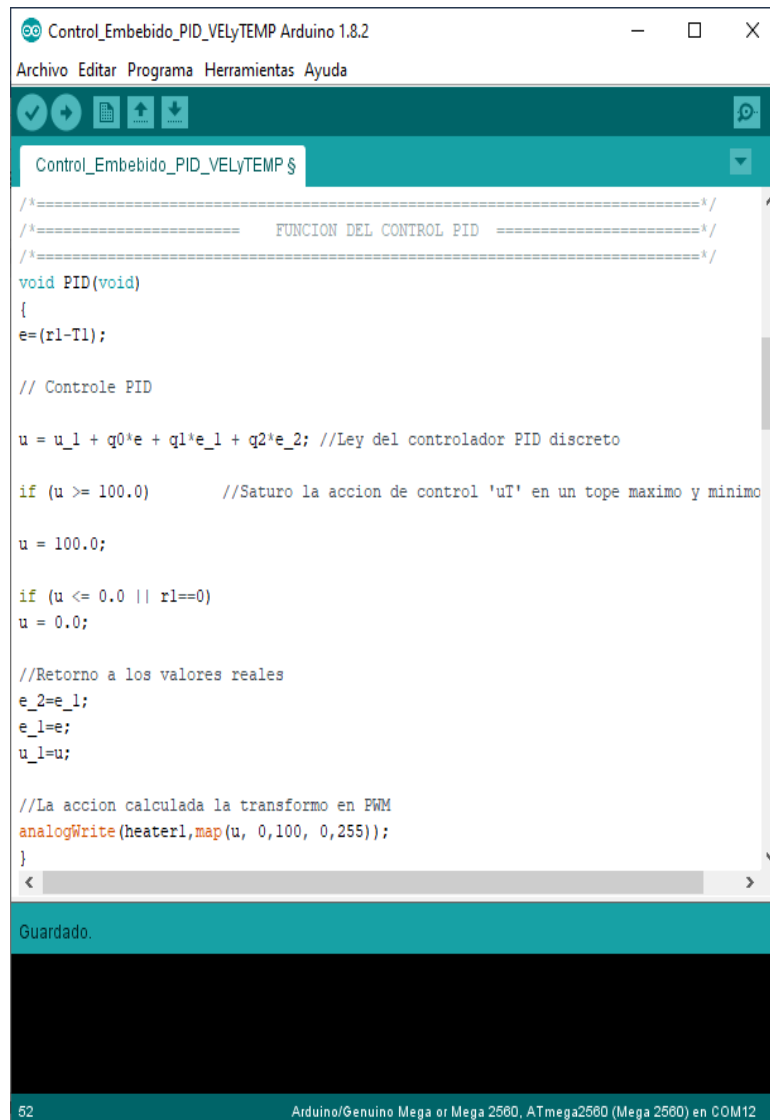
El presente trabajo se evaluó con variables globales T1, r1, V1 y r2 para manejar la temperatura (T1), su respectiva referencia (r1), la velocidad del tambor (V1) y su respectiva referencia (r2). Se utilizó las variables flotantes kp1, ti1, td1 para el controlador de temperatura y kp2, ti2, td2 para el control de velocidad para almacenar los parámetros de los PID.

En la **Figura 3-3** se presenta la estructura del PID embebido en Arduino que fue implementado para el control de temperatura. La función void PID (void) muestra el cálculo

del error de temperatura con la resta de la referencia y el valor realimentado mediante el medidor. Luego, se calculó la Ley de control PID discreto, mediante la ecuación 3.1.

$$u = u_1 + q_0 * e + q_1 * e_1 + q_2 * e_2 \quad (3.1)$$

Figura 3- 3: Parte del código del control PID embebido en Arduino de la tostadora de café.



```
Control_Embebido_PID_VELyTEMP Arduino 1.8.2
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Control_Embebido_PID_VELyTEMP $
/*=====*/
/*=====  FUNCION DEL CONTROL PID  =====*/
/*=====*/
void PID(void)
{
  e=(r1-T1);

  // Controle PID

  u = u_1 + q0*e + q1*e_1 + q2*e_2; //Ley del controlador PID discreto

  if (u >= 100.0)      //Saturo la accion de control 'uT' en un tope maximo y minimo

  u = 100.0;

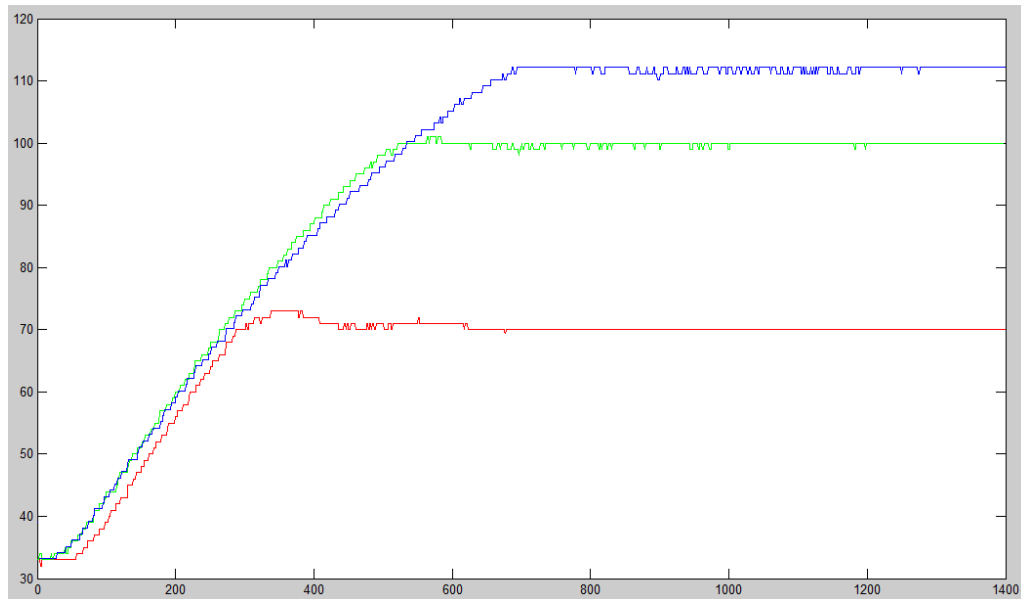
  if (u <= 0.0 || r1==0)
  u = 0.0;

  //Retorno a los valores reales
  e_2=e_1;
  e_1=e;
  u_1=u;

  //La accion calculada la transformo en PWM
  analogWrite(heater1,map(u, 0,100, 0,255));
}
Guardado.
52 Arduino/Genuino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) en COM12
```

Fuente: Autores


Figura 3- 4: Respuesta del Control PID de la tostadora de café a diferentes temperaturas.



Fuente: Autores

Los resultados obtenidos de las pruebas se muestran en la **Figura 3-4**, observando que las temperaturas por encima de los 100 °C no se presentaron ninguna sobre oscilación. Los tiempos de establecimiento está en el orden de los 500 segundos, lo que corresponde a un tiempo de ocho minutos que requiere la máquina para realizar el calentamiento del tambor. De igual forma, las temperaturas bajas (70°C), la respuesta del sistema presento una sobre oscilación de 5% (color rojo) aunque rápidamente llego a la estabilidad de la temperatura de referencia, aproximadamente a los 350 segundos. Así mismo, presento un tiempo muerto que es mayor a las demás curvas de temperatura.

Figura 3- 5: Parte del código embebido en Arduino para el control PID de velocidad del tambor de la tostadora de café.



```
Control_Embebido_PID_VELyTEMP Arduino 1.8.2
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Control_Embebido_PID_VELyTEMP $
}
else
I = I;

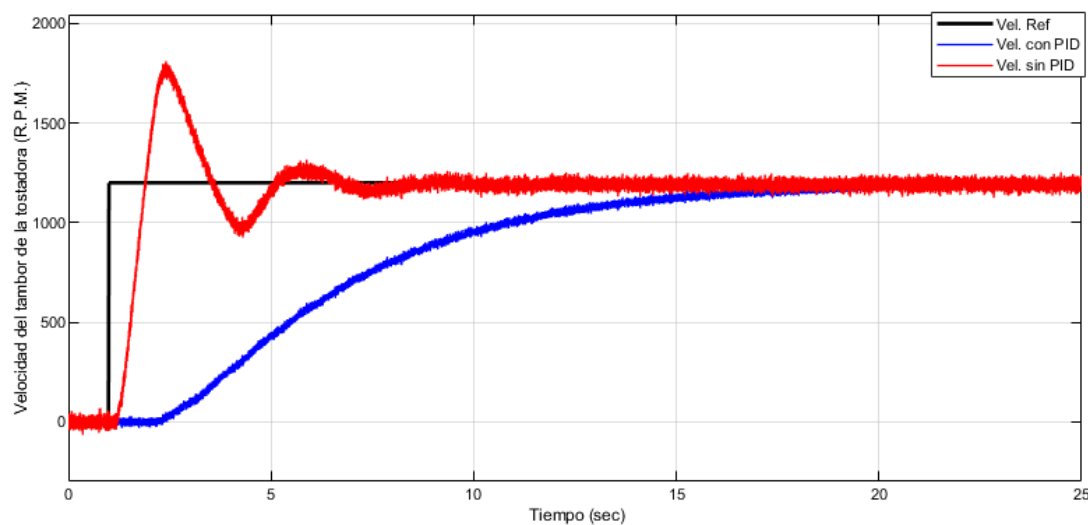
/** D */
errDif = (error - errAnterior)*1000 / dT;
D = (float)(kd * errDif*1000 / dT );

/** PID */
u = P + I + D; // señal del controlador sin prealimentación
// Limitación de la señal de control //
if (u > umax) {
u = umax;
}
else if (u < umin) {
u = umin;
}
else
u = u;
c = (300-(300*u / umax) ); // escalado de señal a microsegundos para el
disparo del triac
if ((c<=1))
c=1;
if (c>300)
c=300;
```

Fuente: Autores

En la **Figura 3-5** se puede expuso el cálculo de las constantes del control PID embebido implementado, las limitaciones del controlador para su funcionamiento y el escalonado de la señal a milisegundos para lograr el disparo del TRIAC.

Figura 3- 6: Respuesta del controlador PID de velocidad del tambor de la tostadora de café.



Fuente: Autores

Como se muestra en la **Figura 3-6** se tomó como referencia la velocidad de 1.200 R.P.M. La línea de color negro representa dicha velocidad de referencia; como se desprende de la figura la respuesta del sistema sin controlador (color rojo) presenta un sobre impulso alcanzando los 1.700 R.P.M lo que represento una sobre oscilación del 38%, un tiempo de establecimiento de 10 segundos y un tiempo de levantamiento de tan solo 2 segundos. Este cambio tan abrupto es contraproducente para la etapa de tostion debido a que se podría quebrar el grado por la fuerza centrífuga generada en el interior de tambor de tostion.

De igual modo, el comportamiento del control PID de velocidad del tambor (color azul), no evidencia ninguna sobre oscilación, un tiempo de establecimiento de casi 20 segundos y un tiempo de levantamiento de 16 segundos respectivamente. Se analizó que la velocidad de referencia la alcanza de una manera más suave respecto a la alcanzada sin la compensación debida al controlador.

El comportamiento de las variables en el proceso de tosti3n se muestra a continuaci3n. En la siguiente **Tabla 3 -1**, se muestra tres ensayos experimentales realizados en la tostadora de caf3 automatizada teniendo en cuenta las curvas de tosti3n requeridas.

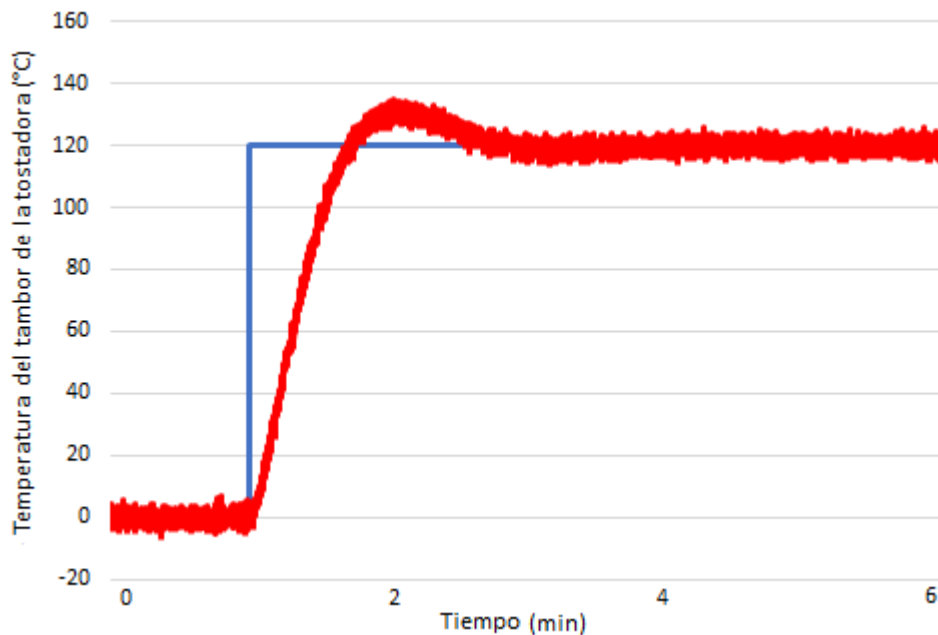
Tabla 3- 1: Condiciones iniciales de las tres pruebas experimentales.

No Muestra	Temperatura Final (°C)	Masa (Kg)	Velocidad (R.P.M)
1	120	1	40
2	140	2	60
3	150	3	70

Fuente: Autores

Para el primer experimento se ubicó un kilogramo de café en la tostadora la cual se calentó a 120 °C con una velocidad de 40 R.P.M. En la **Figura 3- 7** se observa el primer experimento realizado con una masa de 1 Kg de café. También se fijó la velocidad del tambor en 40 R.P.M, registrando un ligero sobre impulso mientras se estabilizo al valor de referencia. El crack de la semilla del café se alcanzó a los 12 minutos. Este procedimiento se describe en Palacio & León, 2019.

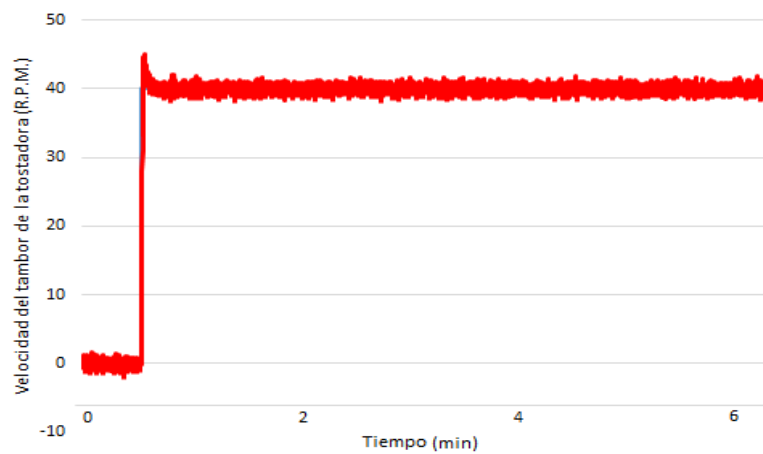
Figura 3- 7: Respuesta del controlador PID de temperatura del tambor de la tostadora de café



Fuente: Autores

Al ejecutar el programa con un setpoint de 40 R.P.M con una temperatura inicial de 120 grados centígrados en el tambor de toston y la respuesta del controlador se observa en la **Figura 3-8**. El sobre impulso máximo es 11.25% y tiempo de establecimiento a los 2 minutos. La respuesta del controlador se mantuvo con un error del 3.25% el cual está dentro de una tolerancia admisible ya que puede tener un error máximo del 5%. En la **Figura 3-9** se exhibe el resultado del proceso de toston del primer experimento.

Figura 3- 8: Respuesta del controlador de velocidad del tambor de la tostadora de café.



Fuente: Autores

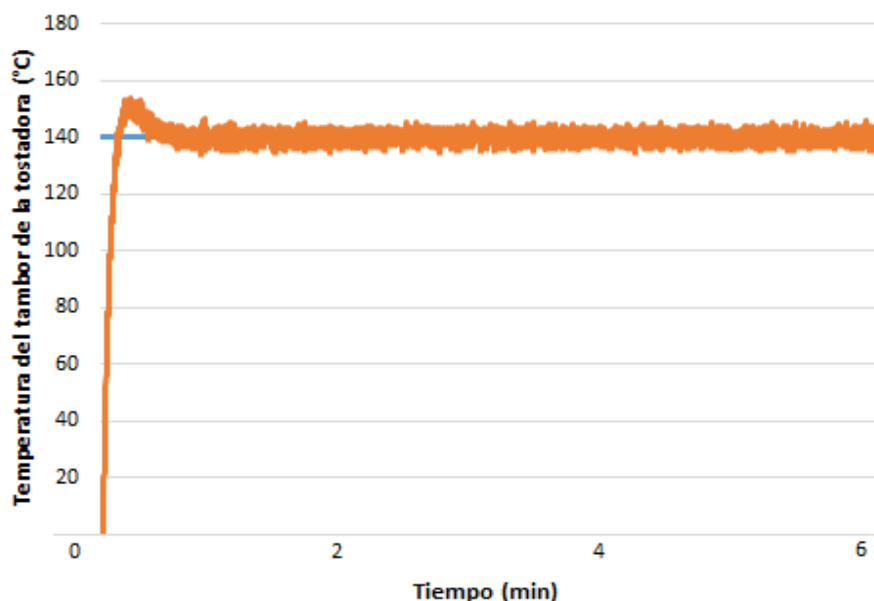
Figura 3- 9: Resultado del primer experimento con la tostadora de café.



Fuente: Autores

Para el segundo experimento se ubicó un kilogramo de café en la tostadora la cual se calentó a 140 °C con una velocidad de 60 R.P.M. En la **Figura 3- 9** se expone el primer experimento realizado con una masa de 2 Kg de café, fijando la velocidad del tambor en 60 R.P.M., registrando un ligero sobre impulso mientras se establece al valor de referencia. El crack de la semilla del café se alcanzó a los 14.5 minutos (**Ver Figura 3-10**).

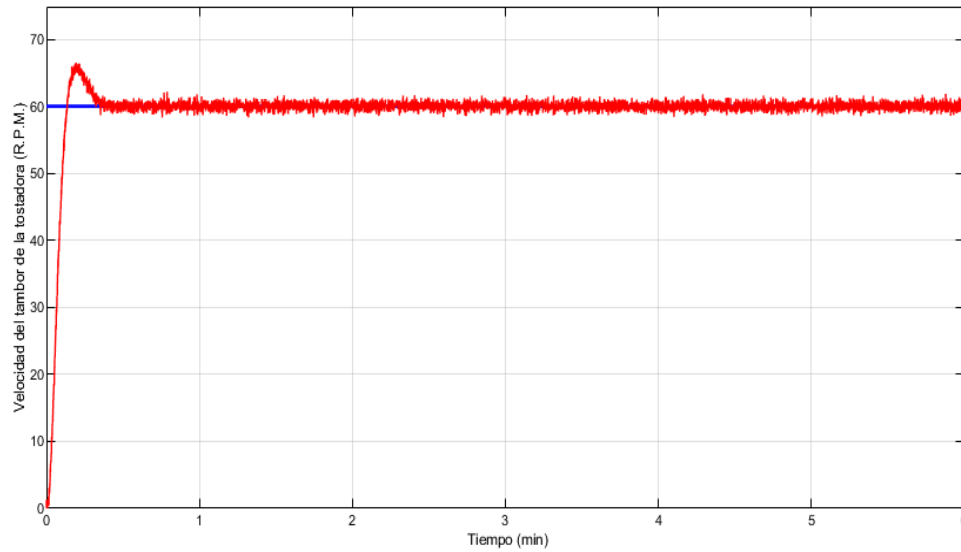
Figura 3- 10: Respuesta del controlador de temperatura del tambor de la tostadora.



Fuente: Autores

En la **Figura 3-11** se presenta un sobreimpulso máximo es 8.33% y tiempo de establecimiento a los 2.5 minutos. La respuesta del controlador se mantuvo con un error del 4.3% el cual está dentro de una tolerancia admisible, dado que puede tener un error máximo del 5%.

Figura 3- 11: Respuesta del controlador de velocidad del tambor de la tostadora.



Fuente: Autores

Los tres experimentos entregan el café en un nivel de tostado óptimo, como se comprueba a través de la certificación de las muestras obtenidas, y por inspección de la tabla de color para tostado de café



Neiva, 25 de noviembre de 2020

Señores
OSCAR JAVIER ARIAS
CAMILO ANDRES MEDINA TORRES
Neiva - Huila

Asunto: Ficha Técnica del producto tostado

Cordial saludo.

En calidad de Coordinador de Desarrollo de La **COOPERATIVA DEPARTAMENTAL DE CAFICULTORES DEL HUILA LTDA – CADEFIHUILA**, me permito entregarle los resultados obtenidos de la curva de tostion de la muestra de 250 gr entregada por ustedes para el análisis.

Perfil de taza		
1. Fragancia/Aroma	8.00	Frutos rojos caramelo
2. Sabor	7.80	Achocolatado, notas cítricas
3. Sabor residual	7.90	Dulce corto
4. Acidez	8.01	Media
5. Cuerpo	7.00	Medio
6. Dulzor	10.00	Acaramelado
7. Uniformidad	10.00	Uniforme
8. Limpieza de taza	10.00	Limpio
9. Balance	8.00	Balanceado
10. Global	8.00	Café desarrollado en su sabor
Puntaje Total (SCAA)		84.71

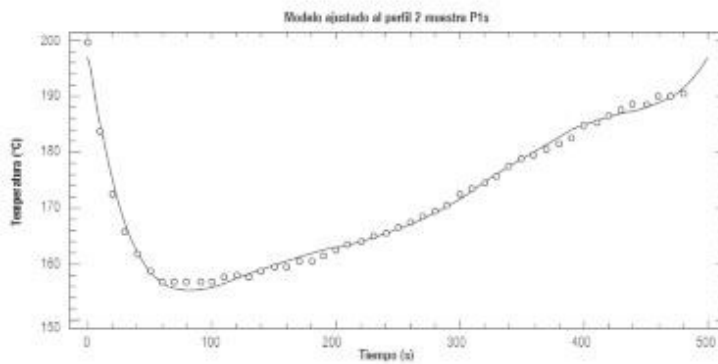
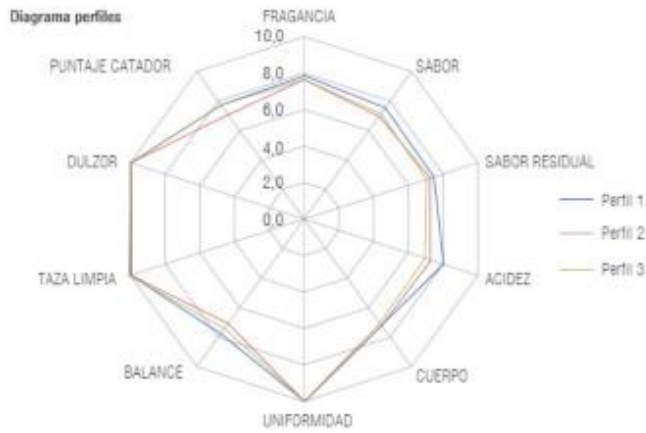
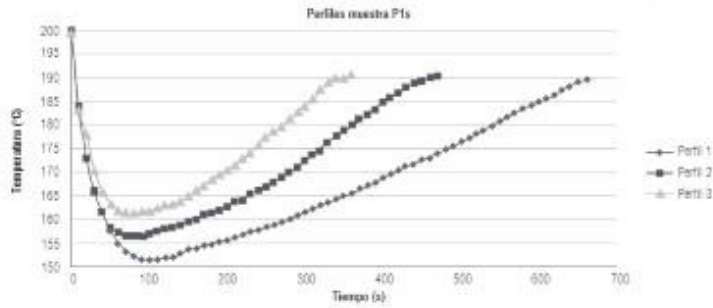
Así mismo, dejo constancia de los resultados en la copia anexa.

Atentamente,


JOSE MIGUEL LOZANO GARCIA
Coordinador de Desarrollo
CADEFIHUILA LTDA.



Orgullo que Crece entre Cafetales



www.cadefihulla.com | correo electrónico: info@cadefihulla.com
 Cll 4 No 3- 37. Neiva (H), Colombia – Tels.: (57)(8) 8721605 - 8721526
 • Sede Pitalito: Carrera 6 No 4 – 01, Piso 2 – Tels.: 8360980 Fax: 8362070
 • Sede La Plata: Carrera 2 No 3E – 95 – Tel.: 8372058

Orgullo que Crece entre Cafetales

Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Se logró establecer que tostadora tiene una capacidad de carga máxima de 3kg, sus rangos de temperatura para el proceso de tuestión del grano son de 120, 140 y 160 °C, dependiendo de la cantidad de café introducido, que puede estar entre 1,2 o 3 Kg, también se determinaron los set point para el control de velocidad, siendo estos de 40 50 y 60 rpm y por último se encontraron los pasos que comprenderían el proceso en su totalidad.

- Se encontraron las constantes proporcional, integral y derivativa obtenidos para la planta un $P=0,39567$, un $I=0,0017131$ y un $D=9,3407$. De igual manera, se observó que el tiempo de levantamiento, t_r , es de 107 segundos, el tiempo de establecimiento, t_s , es de 801 segundos, presenta un sobre impulso del 5,31%, con un margen de ganancia de 10,2 dB con frecuencia de $\omega_{MG}=0,0314$ rad/s. Así mismo, una margen de fase de 64,5 grados acompañado con una frecuencia de $\omega_{MF}=0,00857$ rad/s.

- El algoritmo de control PID de temperatura de tostado y la velocidad del motor del mezclador fueron desarrollados a satisfacción ya que se logró demostrar en la simulación que para el control de temperatura se dio una disminución del sobre impulso del 30%, aunque su tiempo de levantamiento fue más largo (tres veces) con respecto a la respuesta del sistema sin controlador y un tiempo de establecimiento un poco menor, aproximadamente 100 segundos con respecto al sistema sin controlador.

- La respuesta del controlador de temperatura se mantiene con un error del 3.25% el cual está dentro de una tolerancia admisible ya que puede tener un error máximo del 5%, se corrobora mediante el estudio y certificación de la muestra de café tostado realizada por

Cadefihuila, en el que los valores arrojados corresponden a un buen nivel de tostado del grano.

- Los modelos matemáticos constituyen unas herramientas eficientes y competentes para analizar y estudiar el comportamiento de sistemas físicos como los presentados en este proyecto. Matlab se convierte en una herramienta efectiva para la identificación de los sistemas lineales y no lineales. A través de ellos se han podido obtener los modelos objeto de análisis para los diferentes interrogantes sobre el comportamiento de la tostadora de café en relación con las variables de temperatura del tambor de tosti3n y la velocidad de este.

- La propuesta del sistema de control PID para el tambor del tostador de café, presenta ventajas cualitativas muy importantes como son: la eficiencia de funcionamiento, la precisi3n en el proceso térmico y la mayor seguridad hacia los futuros operadores lo cual disminuye riesgos laborales donde se va a operar esta planta.

- La simulaci3n del sistema de control PID de temperatura del tambor de la tostadora de café, demostr3 una reducci3n considerable del sobre impulso de las variables de proceso (temperatura y velocidad) comparado con los controles ON/OFF que poseía anteriormente la planta.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda agregar un mecanismo de recambio en la parte de la termocupla para facilitar el mantenimiento de la tostadora y prevenir fallas. Adicionalmente, examinar las ventajas de incorporar un sistema de recirculación de aire, para añadir eficiencia energética a la tostadora de café.

Por otro lado, se recomienda implementar una estrategia de control óptimo para mejorar los tiempos de respuesta del controlador de velocidad para mejorar el tiempo de levantamiento del sistema.

Bibliografía

- Abarca Mora, R. (2017). *Estudio del proceso de torrefacción del café (Coffea arabica) en tostador convencional*. Universidad de Costa Rica.
- Acero Morales, W. F. (2007). *Diseño e implementación de un controlador automático para la tostación del café en pequeña y media producción*. Universidad de la Salle.
- Amaliyah, N. P., & Sunarti, S. (2018). Analisis Relationship Marketing Terhadap Kepuasan Pelanggan Dan Dampaknya Pada Loyalitas Pelanggan(Survei Pada Pelanggan Java Dancer Coffee Roaster). *Jurnal Administrasi Bisnis*, 55(1), 222–228.
- Ávila, N. (2013). Desalojando agrotóxicos: Agricultura ecológica en el Parque Pereyra Iraola. In *Theomai*. Retrieved from Red Internacional de Estudios sobre Sociedad, Naturaleza y Desarrollo website:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12429901011>
- Batista de Oliveira, N., & Ciqueto Peres, H. H. (2015). *Evaluación del desempeño funcional y calidad técnica de un Sistema de Documentación Electrónica del Proceso de Enfermería*. <https://doi.org/10.1590/0104-1169.3562.2548>
- Camacho, A. D., Martínez, L., Saad, H. R., Valenzuela, R., & Valdés, M. (2014a). Potential of Different Microorganisms for Solid Waste Composting. In *Terra Latinoamericana* (Vol. 32). Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
- Camacho, A. D., Martínez, L., Saad, H. R., Valenzuela, R., & Valdés, M. (2014b). Potential of Different Microorganisms for Solid Waste Composting. In *Terra Latinoamericana* (Vol. 32). Retrieved from Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. website: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57332975004>
- César Cantú-Martínez, P. (2014). Educación ambiental y la escuela como espacio educativo para la promoción de la sustentabilidad Environmental Education and School as an Educational Space to Promote Sustainability. *Revista Electrónica*

Educare (Educare Electronic Journal) EISSN, 18(3), 39–52.

<https://doi.org/10.15359/ree.18-3.3>

Chaves, O., & Jaramillo, J. (2014). *Sistema automatizado para controlar la temperatura y el tiempo en el proceso de tuestión de café en una máquina de laboratorio.*

Universidad de Nariño.

De, F., Javier, S., Claudia, S., & Flores, C. (2014). Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables. In *Portal de Libros de la Universidad Nacional de La Plata*. Retrieved from www.editorial.unlp.edu.ar

del Campo Tejedor, A., & Luna, J. N. (2001). Agricultura ecológica y cooperativismo en Andalucía. Una fórmula de desarrollo rural alternativa. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (26), 101–120.

Díaz Encinas, J., & Fuentes Navarro, F. (2018). *CPU-e.*

DigiKey. (n.d.). OPB606A. Retrieved November 24, 2020, from Electronics/Optek

Technology website: <https://www.digikey.com.mx/product-detail/es/tt-electronics-optek-technology/OPB606A/365-1088-ND/498715>

Engineering, O. (2020). ¿Qué es una Pt100 y cómo funciona? | Termorresistencia pt100.

Ferrero, F. J. (2006). *Lección 4 Medida de la temperatura* (p. 37). p. 37.

Hadzich, M., Veynandt, F., Delcol, J., Hadzich, L. M., Pérez, J. P., & Vergara, S. (2014).

Design of a Solar Coffee Roaster for Rural Areas. *Energy Procedia*, 57, 3215–3224.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.071>

Heyd, B., Broyart, B., Hernandez, J. A., Valdovinos-Tijerino, B., & Trystram, G. (2007).

Physical Model of Heat and Mass Transfer in a Spouted Bed Coffee Roaster. *Drying Technology*, 25(7–8), 1243–1248. <https://doi.org/10.1080/07373930701438683>

León Sicard, T. (2005). LA AGRICULTURA ECOLÓGICA COMO POSICIÓN POLÍTICA FRENTE AL ACTUAL MODELO DE DESARROLLO AGRARIO COLOMBIANO The Ecological Agriculture as a Political Position in the Current Model for Colombian Agrarian Development. In *Acta Biológica Colombiana* (Vol. 10). Retrieved from Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá website:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=319028576005>

López Morales, J., & Morales Ceballos, J. A. (2016). *Módulo de entrenamiento para el control de posición y velocidad de servomotores mediante PLC con interfaz SCADA.*

- Milani, M., Montorsi, L., & Terzi, S. (2017). Numerical analysis of the heat recovery efficiency for the post-combustion flue gas treatment in a coffee roaster plant. *Energy*, 141, 729–743. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.098>
- Miranda, A. (2015). Transductores Taller TecnologíaIV: Instrumentación GuíaNo. 2 Transductores.
- Nasution, T. H., Putramas, A., Soeharwinto, Fahmi, & Siregar, I. (2018). Automatic coffee roaster design using Arduino. *In AIP Conference Proceedings*, 020015. <https://doi.org/10.1063/1.5080068>
- Perfect Daily Grind. (2019). Velocidad Del Tambor de La Tostadora: ¿Cómo Afecta al Café? -.
- Revista Dinero. (2019). Situación del sector cafetero.
- Rincón, L. M., & Cano, L. M. (2010). *Desarrollo de un prototipo de laboratorio para el control de Calidad de la variable grado de tosti3n del caf3 t3stado molido, empleando visi3n artificial*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Rodr3guez, A., Jhovany, E., Ocampo, M., William, J., Ortega, S., & Armando, C. (2007). Medici3n de temperatura: sensores termoele3ctricos. *Scientia et Technica*, 34.
- Rodr3guez Palacios, D. F., & Peñarete Rodr3guez, H. E. (2011). *Medici3n y control de posici3n angular empleando Synchro-Resolver*. Pontificia Universidad Javeriana.
- S3nchez, J., Anaya, I., Vizcarra, M. G., & Guti3rrez, G. Santiago, T. (2007). Estudio de la hidrodin3mica del caf3 t3stado (*Coffea arabica* L.) en lecho fluidizado. *Revista Mexicana de Ingenier3a Qu3mica*, 6(2), 185–192.
- Sanju3n Pinilla, J., & Sarmiento, N. M. (2010). Aplicaci3n de insumos biol3gicos: una oportunidad para la agricultura sostenible y amigable con el medioambiente. In *Rev. Colomb. Biotecnol* (Vol. 1). Retrieved from Universidad Nacional de Colombia website: www.biofag.org.ar
- Sarmiento, N. M. (2016). La agricultura sostenible un reto para la microbiolog3a del suelo 5 Editorial La agricultura sostenible un reto para la microbiolog3a del suelo Sustainable agriculture a challenge for soil microbiology. *Rev. Colomb. Biotecnol*, 1(1), 5–6. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.57828>
- Ximhai, R., Aguilera-Morales, M. E., Hern3ndez-S3nchez, F., Mendieta-S3nchez, E., & Herrera-Fuentes, C. (2012). Producci3n integral sustentable de alimentos. *Ra Ximhai*, 8(3), 71–74. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46125176006>

Zoraida Plazas-Leguizamón, N., & Francisco García-Molano, J. (2014). LOS ABONOS ORGÁNICOS Y LA AGREMIACIÓN CAMPESINA: UNA RESPUESTA A LA AGROECOLOGÍA ORGANIC FERTILIZER AND PEASANT UNIONIZATION: A RESPONSE TO AGROECOLOGY FERTILIZANTE ORGÂNICO E CAMPONESAS SINDICALIZAÇÃO: UMA RESPOSTA A AGROECOLOGIA Artículos de Estudio de Caso. In *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* (Vol. 12). Julio-Diciembre.