



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE HIDALGO



INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y SISTEMAS

MAESTRÍA EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL CLÁSICO OPTIMIZADO A TRAVÉS DE UN
SISTEMA SCADA PARA UN PROCESO DE TEMPERATURA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

PRESENTA:

JOSÉ CARLOS CARMONA ROSAS

DIRECTORES DE TESIS:

DR. OMAR JACOBO SANTOS SÁNCHEZ

DR. CARLOS CUVAS CASTILLO

PACHUCA HGO., MÉXICO 9 DE FEBRERO DE 2024



José Carlos Carmona Rosas

Instrumentación y control
clásico optimizado a través de
un sistema SCADA para un
proceso de temperatura



Mineral de la Reforma Hidalgo, a 15 de diciembre de 2023

Número de control: ICBI-AACyE/1965/2023
Asunto: Autorización de impresión de tema de tesis

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

El Comité Tutorial del nombre del producto que indique el documento curricular del programa educativo de posgrado titulado **“INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL CLÁSICO OPTIMIZADO A TRAVÉS DE UN SISTEMA SCADA PARA UN PROCESO DE TEMPERATURA”**, realizado por el sustentante **José Carlos Carmona Rosas** con número de cuenta 387694, perteneciente al programa de la Maestría en Ciencias en Automatización y Control, una vez que se ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente.

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir con los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
 “Amor, Orden y Progreso”

Dr. Omar Jacobo Santos Sánchez
 Director de Tesis

Comité Tutorial

Dr. Hugo Romero Trejo	Presidente	UAEH
Dr. Jesús Patricio Ordaz Oliver	Secretario	UAEH
Dr. Omar Jacobo Santos Sánchez	Vocal 1	UAEH
Dra. Liliam Rodríguez Guerrero	Vocal 2	UAEH
Dr. Jorge Manuel Ortega Martínez	Vocal 3	ULAM
Dr. Carlos Cuvas Castillo	Suplente	UAEH <u>Carlos Cuvas C.</u>

Ciudad del Conocimiento
 Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia
 Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
 México, C.P. 42184
 Teléfono: +52 (771) 71 720 00 ext. 2250, 2251
 Fax 2109
 aacyo_icbi@uaeh.edu.mx



Gracias a

CONACYT por la beca de Maestría
otorgada durante el periodo
Agosto 2017 - Junio 2019, con CVU
850822

CITIS-UAEH, por la guía formación
académica brindada durante el
posgrado y el apoyo para la
realización de la presente memoria.

Agradecimientos

La presente tesis se la dedico a mis padres que con su esfuerzo me brindaron el mejor regalo que podría recibir, una buena educación tanto académica como cívica y gracias a ellos me fue posible concluir con mis estudios de grado y ahora con uno de posgrado. De igual manera mis profundos agradecimientos al personal que conforma la Maestría en ciencias en automatización y control por su docencia y guía en estos dos años en especial a mis directores de tesis, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración me permitió el desarrollo de este trabajo. Finalmente quiero expresar mi gratitud a todos mis amigos y compañeros del área académica de computación y electrónica que me ayudaron de una manera desinteresada y lograron crear un ambiente de trabajo ameno.

Notación

- x Representación del estado del sistema.
- u Representación de la entrada del sistema.
- A Parámetro escalar asociado a la dinámica del sistema.
- B Parámetro escalar asociado a la entrada del sistema.
- \mathbf{A} Matriz de parámetros asociados a la dinámica del sistema.
- \mathbf{B} Matriz de parámetros asociados a la entrada del sistema.
- $\hat{\mathbf{A}}$ Matriz estimada de \mathbf{A} .
- $\hat{\mathbf{B}}$ Matriz estimada de \mathbf{B} .
- $\tilde{\mathbf{A}}$ Error de estimación de \mathbf{A} .
- $\tilde{\mathbf{B}}$ Error de estimación de \mathbf{B} .
- $\tilde{\boldsymbol{\theta}}$ Matriz de error de estimación.
- φ Vector de regresión.
- \mathbf{I}_n Matriz identidad de tamaño n .

Resumen

En este trabajo se presenta la implementación de un control avanzado en una planta de deshidratación, la cual cuenta con dos cámaras. En una de ellas se encuentra una resistencia eléctrica que se encarga de elevar la temperatura requerida por el proceso de deshidratación a efectuarse, además se cuenta con ventiladores de corriente directa (CD), que giran a velocidad constante y se encargan de transferir la energía calorífica de la resistencia al producto a deshidratar, ubicado en la segunda cámara. Dicho producto será deshidratado mediante aire caliente.

Para la regulación de la temperatura se emplea un control Proporcional, Integral y Derivativo (PID), aplicado por medio de un Controlador Lógico Programable (PLC de sus siglas en inglés) SIEMENS S71200 y un controlador PID industrial Honeywell DC1040. El PLC es programado por medio del software TIA PORTAL-Simatic y a la vez es enlazado mediante el protocolo OPC SERVER a una computadora personal por medio del software LabVIEW-National Instruments. El controlador PID programado en el PLC, es sintonizado por medio del algoritmo de optimización Hill-climbing, con el objetivo de minimizar el consumo energético; para ello, se define el índice de desempeño que penaliza la convergencia y la señal de control, esto repercute en la calidad del producto. También se realiza una comparación de los resultados obtenidos en simulación y experimentales, lo cual permite obtener conclusiones acerca de la eficiencia de ambos métodos.

Abstract

This paper presents the implementation of an advanced control in a plant dehydration, which has two chambers. In one of them is an electrical resistance that is responsible for raising the temperature required by the process of dehydration to be carried out, there are also direct current (CD) fans, which rotate at constant speed and transfer the heat energy of the product resistance to dehydration, located in the second chamber. Said product shall be dehydrated by hot air. For temperature regulation a Porportional, Integral and Derivative control is used (PID), applied by means of a Programmable Logic Controller (PLC) of SIEMENS S71200 and a Honeywell DC1040 industrial PID controller. The PLC is programmed through the software TIA PORTAL-Simatic and at the same time is linked via the OPC SERVER protocol to a personal computer via the Labview-National Instruments software. The PID controller programmed into the PLC, is tuned using the Hill-climbing optimization algorithm, with the objective of minimizing energy consumption; for this,the performance index is defined that penalizes convergence and the control signal, this affects the quality of the product. Also a comparison of simulation and experimental results is carried out, which allows conclusions to be drawn about the efficiency of both methods.

Acrónimos

- **PID** Control Proporcional Integral y Derivativo
- **PI** Control Proporcional Integral
- **P** Control Proporcional
- **PWM** Modulación por ancho de pulso
- **CA** Corriente alterna
- **VCA** Voltaje de corriente alterna
- **CD** Corriente directa
- **VCD** Voltaje de corriente directa
- **MCR** Mínimos cuadrados recursivos
- **PLC** Programador lógico controlable (Program Logic Control)
- **OPC** Proceso de control OLE (OLE for Process Control)
- **RTD** Dectector de temperatura de resistencia (Resistance temperature detector)
- **LabView** Laboratory Virtual instrument engineering workbench

Índice general

Agradecimientos	III
Notacion	V
Resumen	VII
Abstract	IX
Resumen	VII
Acronimos	XI
Glosario	XII
Índice general	XII
Índice de figuras	XIV
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del problema	5
1.3. Justificación	5
1.4. Objetivo general	6
1.5. Objetivos específicos	6
1.6. Hipótesis	7
1.7. Metodología empleada	7
1.7.1. Método Hill- climbing	7
1.8. Herramientas de Hardware	7
1.8.1. Software LabVIEW con OPC SERVER	9
1.8.2. Sensor de temperatura RTD	10
1.8.3. Acondicionador de señal	10
1.9. Marco teórico	10
1.9.1. Publicaciones	12
1.9.2. Conclusiones	12
2. Introducción	13
2.1. Plataforma experimental	13
2.1.1. Descripción del prototipo	13
2.1.2. Soportes para las resistencias calefactoras	15

2.1.3. Regulador de voltaje por cruce por cero	21
2.1.4. Instrumentación de la planta experimental	22
2.2. Protocolo de comunicación OPC SERVER	25
2.2.1. Sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) . .	26
2.2.2. Comunicación	26
2.2.3. Diagrama PLC	28
2.2.4. Identificación del modelo (aproximado)	29
3. Implementación y Resultados experimentales	31
3.1. Programación OPC SERVER	31
3.2. Método de Hill Climbing	35
3.3. Resultados experimentales	37
3.3.1. Dinámica de la planta en lazo abierto	38
3.4. Experimentos	41
4. Conclusiones y trabajo futuro	52
Bibliografía	53
A. Configuraciones	56
A.1. Código de Arduino para conversión de voltaje a pwm	56
A.2. Código de Arduino para conversión de voltaje a pwm	57
A.3. Código de Arduino para conversión de voltaje a pwm	58
A.4. Código de LabView respuesta escalón	59
A.5. Código de LabView respuesta PID digital	60
A.6. Documentación TRL	61
A.7. Herramientas computacionales	72
A.7.1. Matlab	72
A.7.2. LabView	73
A.7.3. TIA Portal	73

Índice de figuras

2.1. Diagrama de la planta	15
2.2. Soporte de acero inoxidable	16
2.3. Dispositivos del lazo de control	17
2.4. Configuraciones de comunicaión y pantalla de control HMI	17
2.5. Dispositivos del lazo de control y algunas de sus configuraciones	18
2.6. Dispositivos del lazo de control y algunas de sus configuraciones	18
2.7. Convertidor de temperatura	19
2.8. Circuito convertidor de temperatura a corriente	20
2.9. Circuito de cruce por cero	21
2.10. Planta Experimental empleada	22
2.11. Resistencias eléctricas	23
2.12. Ventiladores encargados de transferir el calor de las resistencias	23
2.13. Sensores RTD	24
2.14. Entrada y salida de aire	24
2.15. Sistema SCADA	26
2.16. Comunicación Profinet	27
2.17. Diagrama PLC	29
2.18. Respuesta a un escalón unitario de una planta.	30
3.1. Panel Programación del dispositivo	32
3.2. Menú del dispositivo y dirección	33
3.3. Panel Programación dispositivo	33
3.4. Panel Quickclient	34
3.5. Configuración cliente en labview	34
3.6. Ganancias PID	37
3.7. Gráfica experimento 1	38
3.8. Gráfica experimento 2	39
3.9. Simulación vs Real	40
3.10. Grafica temperatura	41
3.11. Gráfica del error	42

3.12. Gráfica control HoneyWell DC1040	43
3.13. Gráfica voltaje en rejilla	44
3.14. Gráfica de deshidratación del jitomate	45
3.15. Rodajas de jitomate con humedad inicial	46
3.16. Rodajas de jitomate deshidratado	46
3.17. Gráfica temperatura	47
3.18. Gráfica del error	47
3.19. Gráfica control PID500	48
3.20. Gráfica voltaje en rejilla	49
3.21. Gráfica de deshidratación del jitomate	50
3.22. Rodajas de jitomate con humedad inicial	51
3.23. Rodajas de jitomate deshidratado	51
A.1. Programación respuesta escalón	59
A.2. PID digital	60
A.3. Software Matlab.	72
A.4. Software LabView.	73
A.5. Software TIA Portal.	73

Capítulo 1

Introducción

México cosecha una amplia variedad de hortalizas, una de las más importantes es el *Solanum lycopersicum* [1], comúnmente llamado jitomate. Debido a esto, en los últimos años se han exportado cantidades importantes de jitomate fresco y deshidratado, colocando a México en el lugar número 10 a nivel mundial como exportador [2]. Este trabajo de investigación se centro en el tema del control de temperatura para un prototipo de deshidratadora de jitomate. La deshidratación de un producto ayuda a extender su vida de anaquel durante un lapso de tiempo más prolongado [3]. La cuestión más importante en este proceso es mantener y cuidar la calidad del producto a deshidratar. Dicha calidad puede verse afectada debido a los cambios de temperatura que sufre el producto durante el proceso de deshidratación, así como variaciones en la velocidad del flujo de aire caliente que impactan sobre este mismo [4].

Para el estudio de la regulación de la temperatura del sistema de control considerado, el proceso de deshidratado se realiza en una planta deshidratadora de tipo atmosférica, donde la forma de transmisión de calor es por convección forzada [5]. La técnica de deshidratación de tipo atmosférica, consiste en pasar flujo de aire caliente por el alimento a deshidratar [2], sin embargo, esto tiene como consecuencia alto consumo de energía [4]. Esto motiva el uso de técnicas avanzadas para la síntesis de controladores optimizados.

En el prototipo se tiene una distancia fija entre la fuente de calor (resistencia calefactora) y el producto a deshidratar (jitomate), esto produce que la temperatura cercana a la fuente de calor no sea la misma que la temperatura cercana al producto a deshidratar, este fenómeno es conocido como retardo en el transporte [3]. Cuando no es posible despreocuparse del retardo debido a su gran magnitud, es necesario considerarlo en el análisis de

estabilidad o compensarlo.

Una técnica popular para la compensación del retardo en los procesos de producción de alimentos [6] y en la industria en general, es el predictor de Smith [7, 6], el cual ya se incluye como una opción programable en algunos controladores PID (Proportional, Integral y Derivativo) industriales, como es el caso del controlador Honeywell DC1040 usado en la presente tesis. Otras técnicas más avanzadas para la compensación del retardo se basan en el conocimiento de la solución analítica del modelo lineal de la planta [8], sin embargo, su uso en la industria es aún incipiente.

La compensación del retardo puede ser mezclada con estrategias de control óptimas para plantas, lineales y no lineales [9]. Algunos resultados experimentales sobre procesos de temperatura con dichas técnicas se han presentado en [10, 11], sin embargo, las estrategias de control óptimas no son fáciles de implementar en el control de procesos industriales, debido a que se requiere incorporar nuevo hardware y software en el lazo de control [1].

Con la simplicidad del PID, se puede asegurar un desempeño satisfactorio para una amplia gama de procesos [12], es por ello que el 95 % de los procesos industriales son controlados por el controlador PID, de los cuales el 20 % se utilizan con las ganancias de fábrica por defecto [13]. Aunado a ello, la relación costo/beneficio que proporciona el PID, es difícil de lograr con otros controladores, por ello es que los ingenieros de proceso en todo el mundo usan dicho controlador en su trabajo diario [13].

En este trabajo de tesis se realiza la optimización de las ganancias para el controlador PID, el cual es implementado en una plataforma industrial (PLC S7-1200 SIEMENS), en conjunto con un protocolo de comunicación OPC SERVER y software especializado LabVIEW. La optimización está enfocada en el ahorro de energía en el proceso de deshidratado del jitomate, al mismo tiempo que se considera el desempeño temporal de la planta en lazo cerrado, el cual afecta la calidad del producto final.

1.1. Antecedentes

La capacidad de los controladores PID para controlar las variables de los procesos industriales de manera eficiente, ha contribuido a una amplia aplicación en la industria. Esto ha traído consigo la propuesta de reglas de sintonización para determinar sus parámetros,

una colección de ellas se encuentra en [14].

La mayoría de las reglas de sintonización para cualquier proceso de control son generales, esto genera un problema en las ganancias, esto provoca un campo de estudio hacia el controlador PID optimizado con el fin de evitar dicho problema.

Las fórmulas de sintonización que se proponen están relacionadas con los coeficientes de un PID, son abordadas en [15] por medio de los parámetros de la planta, con el fin de minimizar un índice de desempeño (ISE), esto se obtiene a partir de emplear algoritmos genéticos, los cuales se sabe que proporcionan un óptimo local de un problema en un marco estocástico (aleatorio). Con estas fórmulas se realiza una sintonización óptima de los controladores PID para procesos integrales e inestables.

Otro trabajo que hace uso de algoritmos genéticos es [9], presentan resultados en simulación de un control PD y PID óptimos, donde los parámetros de sintonización son obtenidos con la técnica de búsqueda de un algoritmo genético (GA), con el objetivo de minimizar el índice de desempeño ISE.

Por otra parte, industrias de procesamiento de alimentos eliminan el agua que contiene el producto, con ello inhiben los microorganismos y también reducen el peso en el producto. En [16] desarrollan la sintonización de un PID por medio de algoritmos genéticos (GA), evaluando el controlador considerando el IAE. A su vez realizan la sintonización de un PID con las reglas de Ziegler-Nichols. Ambas sintonizaciones son aplicadas para controlar la temperatura de un calentador infrarrojo de cerámica y se presentan resultados de simulación.

Un proceso de temperatura representado por un modelo de primer orden con retardo, aplicando un PID optimizado sintonizado por el método PSO (Particle Swarm Optimization) es presentado en [17], el índice de desempeño del cual hace uso es el ISE, con fines comparativos realizan la sintonización del PID con las reglas de Ziegler-Nichols y se presentan resultados de simulación.

En [18], se reporta una investigación documental sobre patentes, software y hardware usados para la implementación de un PID. En el documento se puede observar el gran incremento de las patentes de sintonización del controlador PID. Los métodos más usados son reglas que optimizan un índice de desempeño dado, reglas obtenidas mediante lógica difusa, optimización mediante redes neuronales. Ejemplo de ello es la patente que presenta Samsung Electronics (1999): Unit and method for determining gains of a PID controller using genetic algorithm, otras marcas importantes que han registrado patentes

son: Omron, Siemens, ABB, Yaskawa, AB y Honeywell.

Un modelo de primer orden con retardo es el más usado para el desarrollo de las reglas de la sintonización del PID y obtener las patentes. De acuerdo con esto, los métodos modernos de sintonización numérica han ganado popularidad e impulso y representa un complemento importante de los métodos de Ziegler-Nichols.

En [10] se utilizó el algoritmo numérico Hill Climbing, para sintonizar una ley de control subóptima para sistemas con retardo en el estado, con el fin de minimizar el índice de desempeño de la forma:

$$J = \int_0^{t_1} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t))dt, \quad t_1 < \infty. \quad (1.1)$$

$$Q \geq 0, R > 0 \quad (1.2)$$

donde $x(t)$ es el estado del sistema y $u(t)$ es el controlador. La estructura del método Hill Climbing es:

- 1.- Proponer $K_b \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$, vector que contiene los parámetros del controlador, aleatoriamente.
- 2.- Se establece K_b una ganancia óptima
- 3.- Realizar la mutación de K_b .
- 4.- Se evalúa en el índice de desempeño de K_b óptimo y de la mutación, con la respuesta de la planta y la señal de control, se comparan ambos y se toma el mínimo valor del índice de desempeño, si dicho valor es menor para la mutación, entonces estas ganancias mutadas son almacenadas en K_b óptimo.
- 5.- Si se alcanzó el número máximo de iteraciones se termina el proceso, si no se regresa al paso 3.

En [4] se estudian los efectos de un control de temperatura aplicado a una deshidratadora de jitomate, consideran dos estrategias de control: controlador PID (sintonizado por el método de D-particiones y el método Hill Climbing en tiempo continuo) y el control óptimo lineal para sistemas lineales con retardo en la entrada, el cual considera un predictor de estado para compensar los efectos del retardo en la entrada. El objetivo de usar dos estrategias de control es comparar los resultados y concluir cual estrategia es mejor para el ahorro de energía, los mejores resultado se obtuvieron con el control óptimo lineal

con retardo en la entrada.

En [19] es abordado el estudio de un control de temperatura aplicado a una deshidratadora de jitomate, aplicando un control PI y PID optimizado sobre un plataforma industrial PLC Siemens S7-1200 en el que se analizan las zonas de estabilidad por medio de la verificación de la estabilidad en el sentido de Jury y la obtención de ganancias por medio de Hill-climbing.

1.2. Planteamiento del problema

El consumo energético en un proceso de deshidratación de productos alimenticios, es uno de los más elevados en la industria [20]. Esto puede explicarse en parte, a una incorrecta sintonización del controlador PID encargado de regular el proceso de temperatura. Además, en dicho proceso es crucial considerar los parámetros temporales (tiempo de establecimiento y máximo sobreimpulso) de la respuesta de la planta, debido a que impactan directamente en la conservación de nutrientes [1]. Con el uso de técnicas avanzadas de control se ha demostrado que es posible mejorar el desempeño de dicho proceso [21], pero éstas requieren generalmente el uso de hardware especializado. En ese sentido, un problema interesante es la integración de técnicas de control avanzado en un lazo de regulación automático de corte industrial. La utilización de protocolos industriales de comunicación que consideren el sistema operativo Windows es de gran ayuda para integrar software y hardware especializado, lo cual incida en la reducción de costos, cuando se compara con el uso de plataformas industriales mas versátiles (por ejemplo Controladores Automáticos Programables, PAC's), pero mas costosas.

1.3. Justificación

Los controladores PID son los más empleados en la industria, sin embargo, estos habitualmente están sintonizados sin técnicas de optimización de energía, [4]. En la literatura especializada es posible observar que el controlador PID es referente, porque es común compararlo con otras técnicas de control avanzadas, pero, en muchos casos, esta comparación se realiza sin una optimización de la sintonización de sus ganancias. Aunque existen resultados de controladores PID que reducen el consumo energético [19], su implementación se ve afectada a causa de que los controladores industriales y software especializados podrían tener precios relativamente elevados, y del conocimiento técnico y científico re-

querido por el ingeniero de procesos. Una posible alternativa que coadyuve a la solución de este problema, es el uso de protocolos industriales de comunicación para integrar hardware de corte industrial con hardware de relativo bajo costo, el cual ejecute software especializado (por ejemplo LabVIEW) en donde esté programado un algoritmo optimizante o un control avanzado.

1.4. Objetivo general

Crear un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA, de sus siglas en inglés), con el fin de integrar hardware y software de distinta naturaleza y de esta forma permitirle al usuario la implementación de técnicas de control, mediante el uso del protocolo de comunicación industrial OPC Sever UA y el software LabVIEW.

1.5. Objetivos específicos

- Implementar un sistema SCADA que comunique a través de un protocolo industrial un PLC (Programmable Logic Controller) industrial, una Interfaz Hombre-Máquina (HMI por sus siglas en inglés Human Machine Interface) y una computadora personal, para la implementación de un lazo de control en el prototipo.
- Instrumentar el prototipo mediante el uso de electrónica, sensores y actuadores necesarios para la correcta implementación de un lazo de control.
- Optimizar la sintonización del controlador PID de corte industrial mediante el método de optimización Hill Climbing para la mejora del desempeño de la planta.
- Implementar el controlador PID optimizado sobre un PLC industrial mediante un sistema SCADA, para la regulación de la temperatura del proceso.
- Realizar un análisis comparativo entre un controlador sintonizado con la técnica de Ziegler-Nichols y el propuesto, mediante el cálculo numérico de índices predefinidos, para determinar la eficiencia de ambos.

1.6. Hipótesis

Mediante el uso de técnicas numéricas de optimización y teoría de control clásico optimizado es posible obtener la optimización de las ganancias de un controlador PID y programarlas en una plataforma industrial que incluya el algoritmo PID y un sistema SCADA, y con esto mejorar del desempeño de la planta.

1.7. Metodología empleada

Para el desarrollo de este trabajo de tesis, se utilizó el método de D-particiones y la técnica de control numérico Hill - climbing, así como un sistema SCADA por medio de OPC SERVER los cuales son brevemente descritos a continuación.

1.7.1. Método Hill- climbing

Los parámetros de ajuste de un controlador PID son: k_p , k_i y k_d los cuales generan una señal de control y una señal de error diferente, lo que complica la sintonización del controlador PID. El método de Hill-climbing es un algoritmo de búsqueda de un mínimo,, esta característica permite que siempre se obtenga una solución mejor o igual a la anterior [22].

1.8. Herramientas de Hardware

Para llevar acabo los experimentos a continuación se hace mención y descripción de las herramientas.

PLC S7-1200 Siemens

También se hace uso de un PLC de corte industrial, cuya CPU incorpora un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, circuitos de entrada y salida, puerto de Ethernet PROFINET integrado, y entradas analógicas incorporadas, todo ello en una carcasa compacta, conformando así un potente controlador, de bajo costo y amplio juego de instrucciones, lo cual lo hace idóneo para controlar una gran variedad de aplicaciones, entre ellas la temperatura, que es el caso de estudio a tratar. Los modelos S7-1200 y el software de programación STEP 7 basado en Windows ofrecen la flexibilidad necesaria para solucionar las tareas de control y automatización.

El S7-1200, tiene la opción de ser programado mediante los lenguajes de KOP, FUP y AWL, también puede manejar un gran número de lazos de control con PID, el cual está sólo limitado por la memoria del sistema, a diferencia de numerosas marcas de PLC's en el cual el número de lazos de control está limitada a un número específico, esto evidencia la capacidad de cómputo del S7-1200. Las instrucciones para el uso del PID son [23]:

- La instrucción 'PID_ Compact', se utiliza para controlar procesos con variables continuas de entrada y salida.
- La instrucción 'PID_ 3Step', se utiliza para controlar dispositivos accionados por motor, como válvulas que requieren señales discretas para las acciones de apertura y cierre.
- La instrucción 'PID_ Temp', ofrece un regulador PID universal que permite manejar los requisitos específicos de control de temperatura.

La instrucción 'PID_ Temp' es la que se utilizó para este caso de estudio.

El modelo del PLC que se empleó es el 1215C, el cual tiene integrado 14 entradas digitales y 10 salidas digitales, 2 entradas y 2 salidas analógicas. Cuenta con una velocidad de ejecución de funciones matemáticas con números reales de 2.3 microsegundos/instrucción y la velocidad de ejecución booleana es de 0.08 de microsegundos/instrucción. Cuenta también con un módulo de entradas analógicas configurables de 4 a 20 mA, 0 a 20 mA y 0 a 10 V_{cd} . Por último se tiene un módulo especial para la lectura de un sensor de temperatura RTD.

HMI KTP700 basic

La interfaz de usuario abre una amplia gama de operaciones con facilidad de uso mejorada a través de controles y gráficos. La interfaz USB le permite conectar un teclado, mouse y escáner de código de barras y admite un fácil archivo de datos en una memoria USB. El dispositivo es capaz de crear gráficas en tiempo real, arranque de PLC indicadores, etc.

OPC SERVER

El protocolo industrial OPC (proceso de control OLE) es un estándar abierto porque su interoperabilidad viene dada por la creación, mantenimiento y mejora de unas especificaciones estándar realizadas por un grupo de trabajo multidisciplinar y que no se decanta

por ninguna marca en particular. La primera especificación fue resultado de la colaboración de un conjunto de fabricantes en colaboración con Microsoft. De ello resultó una tecnología basada en el DCOM de los sistemas operativos de Microsoft. La especificación detallaba un set de objetos, interfaces y métodos independientes para asegurar la interoperabilidad. La tecnología DCOM proporcionaba el framework para el desarrollo de las soluciones software de comunicación. Esa es la llamada especificación OPC Data Access.

Los paquetes de programación que tienen la capacidad de adquirir datos de los dispositivos de campo y servirlos en OPC son los llamados Servidores OPC o OPC Servers. El gran beneficio que aportan es poder desvincular los sistemas de explotación de datos superiores de la casuística concreta de campo. Con ello, se consigue toda la información del sistema, aunque se tengan controladores, HMIs, RTUs, de diferentes fabricantes que utilicen diferentes protocolos.

En su inicio, una aplicación OPC Server únicamente traducía un solo protocolo de un fabricante que manejaba Modbus, por ejemplo OPC DA. Actualmente, los OPC Servers líderes del mercado son capaces, desde una única aplicación, adquirir información de centenares de protocolos diferentes.

Tipos de OPC servers

- Servidor OPC DA: Diseñado para transmisión de datos en tiempo real.
- Servidor OPC HDA: Basado en la especificación acceso a datos historizados.
- Servidor OPC A y E server basado en la especificación de arquitectura unificada.
- Servidor OPC UA: Basado en la especificación de arquitectura unificada, este protocolo permite a los servidores OPC SERVER trabajar con cualquier tipo de datos provenientes de distintos software o hardware.

1.8.1. Software LabVIEW con OPC SERVER

Es un software de desarrollo de sistemas, con una sintaxis de programación gráfica de alto nivel, que facilita visualizar, crear y codificar sistemas de instrumentación industrial y aplicación de control.

OPC SERVER LabVIEW es un protocolo de comunicación y una herramienta del software el cual se encarga de decodificar los datos obtenidos por el PLC.

1.8.2. Sensor de temperatura RTD

Sensor de temperatura que aumenta o disminuye su resistencia a medida que la temperatura varia, este sensor esta basado en el puente de Wheatstone.

1.8.3. Acondicionador de señal

Los transmisores (que contienen acondicionadores de señal) son instrumentos que captan la variable de proceso y la transmiten a distancia a un instrumento receptor: indicador, registrador, controlador o una combinación de estos. La etapa de acondicionamiento de señal en los transmisores generan una señal estándar de 4-20 mA proporcional a la variable física cuantificada por el sensor.

1.9. Marco teórico

Estrategia de control PID

El controlador PID está conformado por la combinación de la acción Proporcional, Integral y Derivativa. El algoritmo puede describirse como [13]:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (1.3)$$

donde $u(t)$ es la señal de control y $e(t)$ es el error ($e(t) = y_{sp} - y$).

Existen tres formas diferentes de representar la estructura del controlador, estas se obtienen al considerar la expresión dada por (1.3):

1.- La forma estándar o no interactuante

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (1.4)$$

2.- La forma serie o interactuante

$$C(s) = K \left(1 + \frac{1}{\mathbf{T}_i s} \right) (1 + \mathbf{T}_d s), \quad (1.5)$$

donde la relación con una forma no interactuante esta dada por

Si se quisiera representar como un no interactuante los coeficientes están dados por:

$$K_p = K \frac{\mathbf{T}_i + \mathbf{T}_d}{\mathbf{T}_i}, \quad T_i = \mathbf{T}_i + \mathbf{T}_d,$$

$$T_d = \frac{\mathbf{T}_i \mathbf{T}_d}{\mathbf{T}_i + \mathbf{T}_i}.$$

3.- La forma paralelo

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (1.6)$$

donde los parámetros de este modelo se relacionan con los parámetros de la forma estándar a través de

$$K_p = K_p, \quad K_i = \frac{K_p}{T_i}, \quad K_d = K_p T_d.$$

De esta forma, la señal de control PID es la suma de tres términos: El término P (que es proporcional al error), el término I (que es proporcional a la integral del error) y su función es eliminar el error en estado estacionario, el término D (que es proporcional a la derivada del error) y que permite la estimación del error futuro. Los parámetros del controlador son la ganancia proporcional K_p , el tiempo integral T_i , y el tiempo derivativo T_d [13].

Método Hill Climbing

El algoritmo de Hill Climbing es un método de búsqueda local con un componente estocástico, en general, utiliza una cadena de bits para representar un conjunto de prototipos, y en algunos experimentos, un conjunto de características [10]. Es una técnica para buscar una solución minimizando un índice de desempeño dado o criterio, su proceso puede ser descrito de la siguiente forma:

- 1.- Teniendo una función de penalización a optimizar, el algoritmo empieza cuando los parámetros a optimizar son inicializados mediante una cadena numérica, dicha cadena es aleatoria y representa una solución al problema de optimización planteado.
- 2.- Se realiza la mutación de la cadena de acuerdo a un criterio establecido que contiene una componente estocástica.

- 3.- Si la cadena mutada brinda una mejor solución, se conserva, de lo contrario, se opta por la cadena sin mutar.
- 4.- Si se conservó la cadena mutada, esta es arrojada como resultado, si no, se vuelve a realizar otra mutación.
- 5.- El proceso termina si no hay mejoras en la optimización de la función penalizada, o se alcanza un número máximo de iteraciones.

1.9.1. Publicaciones

A lo largo de este trabajo de tesis, la parte de instrumentación y adquisición de datos, dió pie a la siguiente publicación en revista indizada (Q2) en el JCR :

Santos-Sánchez, O. J., Mondié, S., Rodríguez-Guerrero, L., & Carmona-Rosas, J. C. (2019). Delays compensation for an atmospheric sliced tomatoes dehydration process via state predictors. *Journal of the Franklin Institute*, 356(18), 11473-11491.

1.9.2. Conclusiones

En el presente capítulo fueron descritos los temas básicos e importantes para llevar a cabo este tema de tesis.

Capítulo 2

Introducción

En este capítulo se describe la instrumentación de la plataforma experimental en la que se trabajó, y en la cual se aplicó el control PID Optimizado. También se obtiene el modelo matemático que caracteriza a la dinámica del sistema.

2.1. Plataforma experimental

2.1.1. Descripción del prototipo

El prototipo de la planta deshidratadora de jitomate que se utiliza en este trabajo de tesis está conformada por las siguientes partes:

- 6 ventiladores, los cuales tienen la tarea de generar el flujo de aire. La velocidad puede ajustarse mediante la regulación del voltaje aplicado a los motores de los ventiladores, dicho voltaje varía en la zona: 3 a 12 V_{cd} , para el caso de estudio se utilizó un flujo fijo de 2.1 m/s , el cual corresponde a un voltaje fijo de 11.46 Volts.
- Una resistencia eléctrica de tipo helicoidal como calefactor, la cual presenta las siguientes características técnicas: Resistencia eléctrica de 6Ω y una alimentación de 110 V_{ca} como voltaje máximo aplicado.
- Una charola agujerada de grado alimenticio construida con acero inoxidable 304, para colocar el producto a deshidratar.

En la parte de control e instrumentación se hace uso de los siguientes componentes:

- Software TIA Portal de Siemens V15, utilizado para la programación del PLC S7-1200 Siemens.

- Un PLC de la familia S7-1200, modelo 1215C marca Siemens, mismo que incluye 14 entradas digitales y 10 salidas digitales, 2 entradas (0-10 V_{cd}) y 2 salidas analógicas (4-20 mA). Se cuenta también con un módulo de entradas analógicas configurables y un módulo especial RTD para la lectura del sensor de temperatura RTD.
- Un controlador de corte industrial PID Honeywell DC1040, con salida estándar 4 a 20 mA y entrada programable para termopar.
- Software de Instrumentación virtual LabVIEW.
- Sensor de temperatura RTD PT100, el cual monitorea la variable de proceso (temperatura) de la cámara de deshidratado.
- Un microcontrolador Arduino nano, es el principal elemento de la etapa de control electrónico, dicho elemento es el encargado de recibir una señal analógica del controlador PID Honeywell o el controlador PID Siemens y proporcionar una salida por PWM y además tiene implementado un detector de cruce por cero, lo cual permite manipular el voltaje aplicado al actuador, y de ésta manera regular la variable del proceso (temperatura).
- En la parte de interfaz de potencia se hace uso de un triac de potencia BTA41C, el cual fué elegido por sus características de alta conmutación para la variación de voltaje, el cual permite adaptar la señal PWM generada por el microcontrolador y el cruce por cero, con lo que se controla el voltaje efectivo aplicado a la resistencia calefactora.

El prototipo está construido en acero inoxidable 304 de grado alimenticio y consta de tres niveles de deshidratación, donde cada uno de éstos cuenta con una cámara de calentamiento y además una cámara en donde se encuentra toda la electrónica que controla a las tres cámaras. Los tres niveles cuentan con charolas fijas agujeradas, donde se encuentra el producto a deshidratar. En las cámaras de calentamiento se localizan las resistencias eléctricas, y constan de una entrada de aire del ventilador y una salida hacia la segunda cámara de deshidratado. En la cámara de deshidratado se localiza el producto a ser procesado.

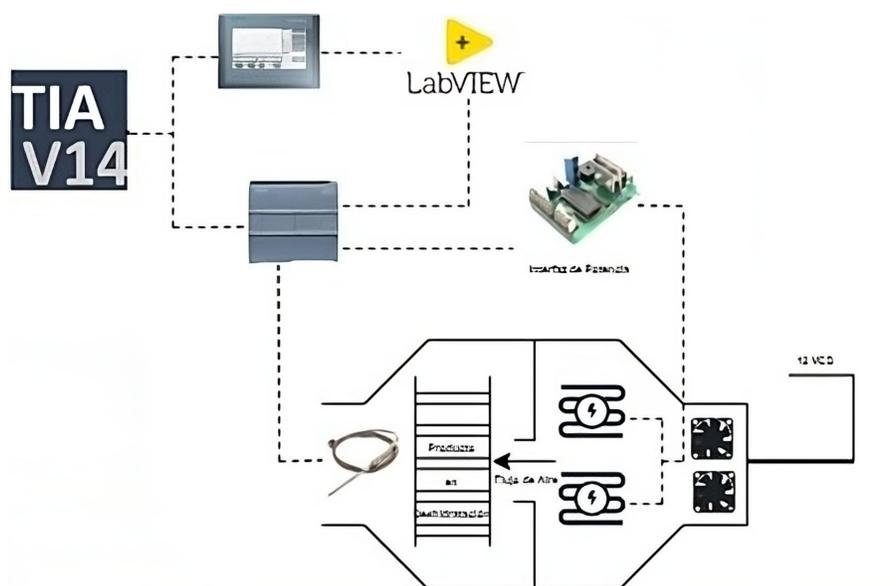


Figura 2.1: Diagrama de la planta

2.1.2. Soportes para las resistencias calefactoras

Los soportes de acero inoxidable para las resistencias calefactoras, se diseñaron en el software Solidworks y posteriormente se enviaron a fabricación, el diseño de éstos se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2: Soporte de acero inoxidable

Como puede observarse en la Figura 2.2, el diseño se adecuó a las necesidades de espacio disponible en el prototipo de acuerdo con el peso y forma de las resistencias.

Programación y configuración del PLC SIEMENS S7-1200 y la HMI KPT700

Para programar y comunicar un PLC S71200 SIEMENS, ver Figura 2.3a y la interfaz HMI KPT700 BASIC, ver Figura 2.3b, fué necesario el estudio de los manuales y documentación de los mismos, así como los protocolos de comunicación de estos, los cuales ejecutan un controlador PID sin necesidad de una unidad central de procesamiento personal o industrial, además de graficar las señales de temperatura y control, las configuraciones se muestran en la Figura 2.4b y 2.4a ,

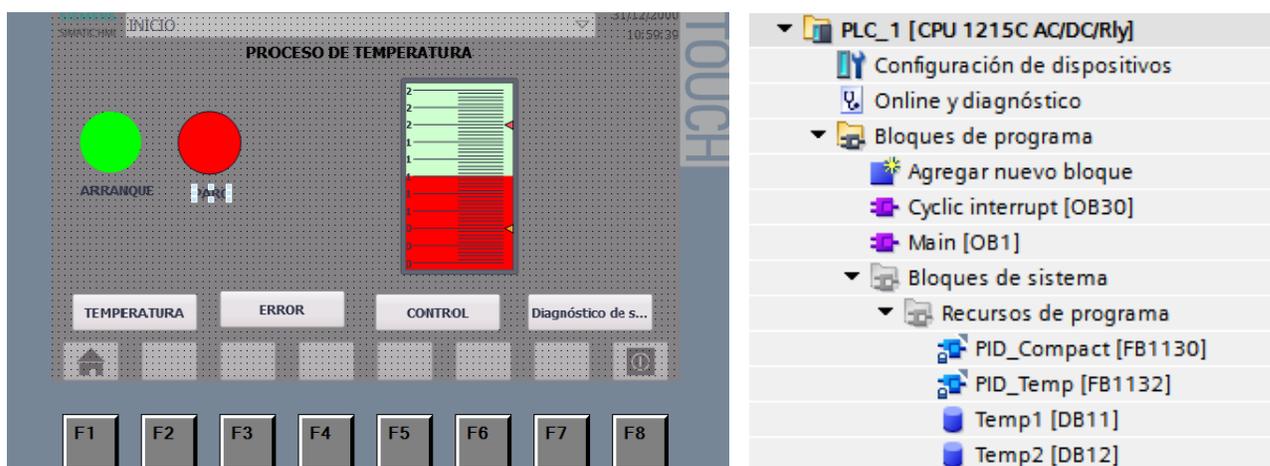
La Figura 2.5a y 2.5b muestra la programación del PLC, la configuración del PID en el PLC, y las gráficas generadas por la HMI, después de haber programado a esta última.



(a) PLC S71200

(b) HMI

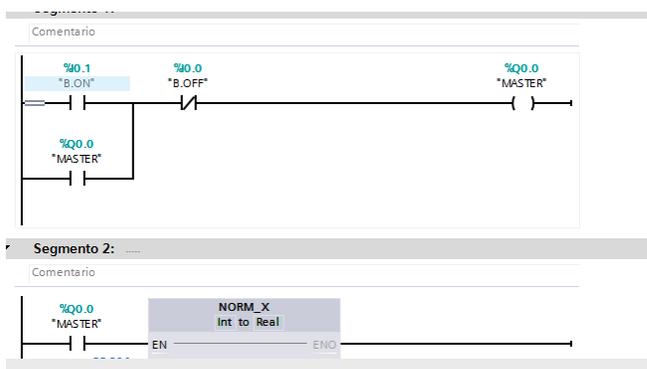
Figura 2.3: Dispositivos del lazo de control



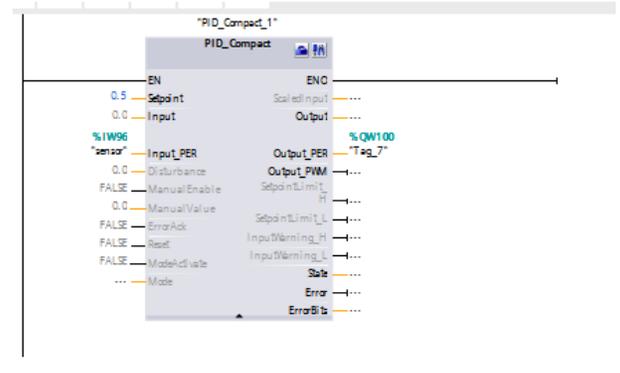
(a) Pantalla de inicio

(b) Árbol de configuraciones

Figura 2.4: Configuraciones de comunicación y pantalla de control HMI

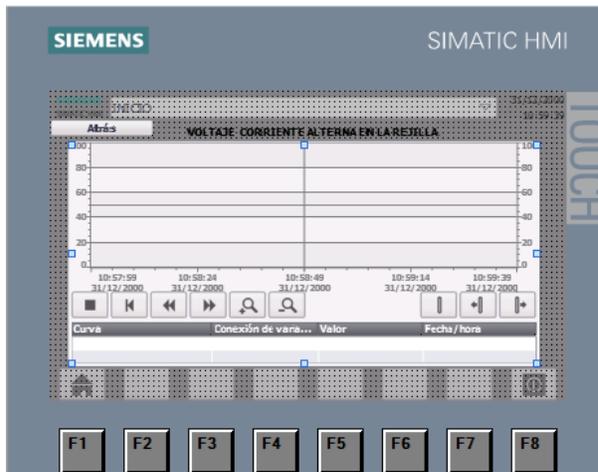


(a) Programación arranque PLC

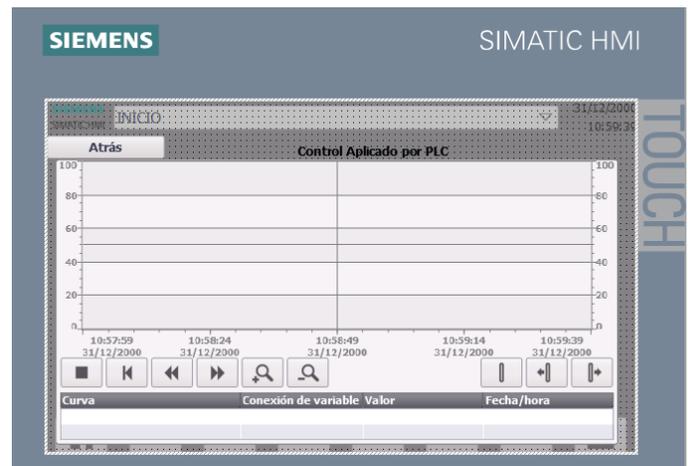


(b) HMI

Figura 2.5: Dispositivos del lazo de control y algunas de sus configuraciones



(a) Pantalla de inicio



(b) Árbol de configuraciones

Figura 2.6: Dispositivos del lazo de control y algunas de sus configuraciones

Adaptadores de señal para el sensor de temperatura PT100 a salida estándar 4-20 mA

Las variaciones de resistencia de un sensor de temperatura del tipo RTD son relativamente pequeñas: 0.01 Ohm por grado centígrado, entonces, para determinar la temperatura del proceso se requieren circuitos de precisión, tal como el puente de Wheatstone. Por otro lado, un inconveniente importante en la industria, es que generalmente el sitio de medición de la temperatura (el proceso) se encuentra considerablemente lejos de los gabinetes donde se encuentran los equipos de medición y control. Esta distancia requiere de largos cables, cuya resistencia puede afectar considerablemente la medida de temperatura, esto aunado a la sensibilidad de los circuitos de precisión ya mencionados, hacen de la medición de temperatura una tarea no trivial.

Para dar solución a este problema, existe el transmisor 420PT100 de temperatura a 4-20mA . Este transmisor contiene la electrónica de precisión necesaria para la lectura del sensor de tipo RTD. Dicho dispositivo hace una compensación automática de la resistencia de los cables del sensor RTD, obteniendo mediciones suficientemente precisas de temperatura: hasta 0.1 °C, lo cual es suficiente para el proceso bajo estudio. El transmisor de la Figura section 2.1.2 convierte las señales de corriente proporcionadas por el RTD a un rango de 4-20mA, Esta señal estándar al ser de corriente, puede enviarse por cables de gran longitud sin que la señal de temperatura se afecte por estos mismos.



Figura 2.7: Convertidor de temperatura

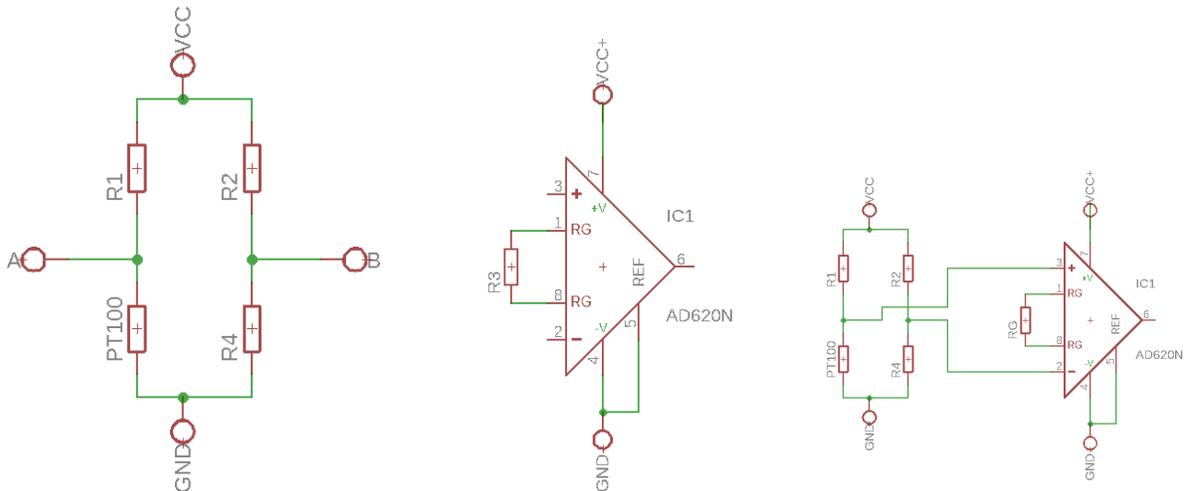
La siguiente ecuación da la expresión de la transferencia de calor del RTD

$$T = \frac{V_s - 1}{(I)(R_P)}, \quad (2.1)$$

donde.

- T= temperatura
- I=corriente para la temperatura mínima
- V_s = Voltaje convertido con respecto a la temperatura
- R_P = Resistencia Propuesta

La expresión fué utilizada para construir el mismo adaptador 420PT100, mediante amplificadores de instrumentación para las cámaras, con esto se redujo el costo de la instrumentación. Estos dos transmisores de temperatura se encuentran conformados por un puente de Wheatstone el cual varía la corriente en sus dos ramas con respecto a la lectura proporcionada por el RTD, este varía su resistencia con respecto a la temperatura. Este circuito se muestra en la Figura 2.8a. Sin embargo, esta señal es de magnitud muy pequeña, por lo cual debe ser adecuada mediante el amplificador de instrumentación mostrado en la Figura 2.8b. La conexión de ambos circuitos se muestra en la Figura 2.8c, donde la rama A es la tercera punta del sensor RTD.



(a) Conexión del puente de Wheatstone
 (b) Circuito Amplificador operacional
 (c) Circuito convertidor de señal

Figura 2.8: Circuito convertidor de temperatura a corriente

Con la elaboración del transmisor y la verificación de su correcto funcionamiento, es posible sustituir la compra del transmisor 420PT100, ya que el costo de este es mucho mayor que el circuito implementado. Es importante mencionar que las resistencias del puente de Wheatstone construido, son elegidas arbitrariamente, pero tomando en cuenta que deben ser mayores a la resistencia máxima del RTD, y una de ellas con valor igual a la resistencia mínima del mismo. Para el cálculo de la resistencia R_G (ver Figura 2.8c) del amplificador de instrumentación, se obtiene de la siguiente ecuación :

$$R_g = \frac{49400}{G - 1}.$$

Esta formula se encuentra el datasheet del amplificador AD620, donde G es :

$$G = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}},$$

y R_g es la resistencia de ganancia para el amplificador. Es pertinente aclarar que la tolerancia al error del transmisor 420PT100 es de 2 %, dicha tolerancia es prácticamente la misma que los construidos, pero a menor costo.

2.1.3. Regulador de voltaje por cruce por cero

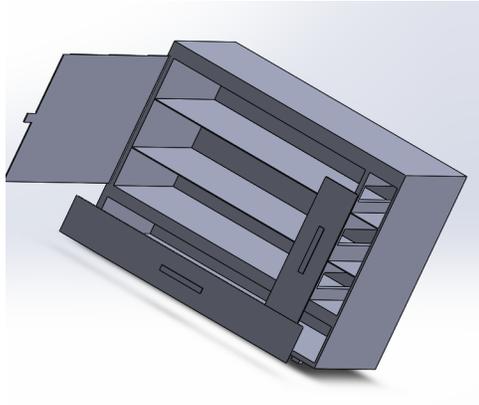
Para la variación de voltaje de corriente alterna se optó por implementar un detector de cruce por cero, el cual nos permite saber, el momento justo de cuando la señal pasa por un valor cercano al cero. Ahora, mediante un microcontrolador, un optoTRIAC y TRIAC, es posible variar el voltaje de corriente alterna con una señal modulada mediante un PWM, dicho dispositivo se muestra en la Figura section 2.1.3 .



Figura 2.9: Circuito de cruce por cero

2.1.4. Instrumentación de la planta experimental

En las figuras 2.10a, 2.10b se presentan los equipos de grado industrial para el control del proceso.



(a) Planta en vista métrica en solid-works



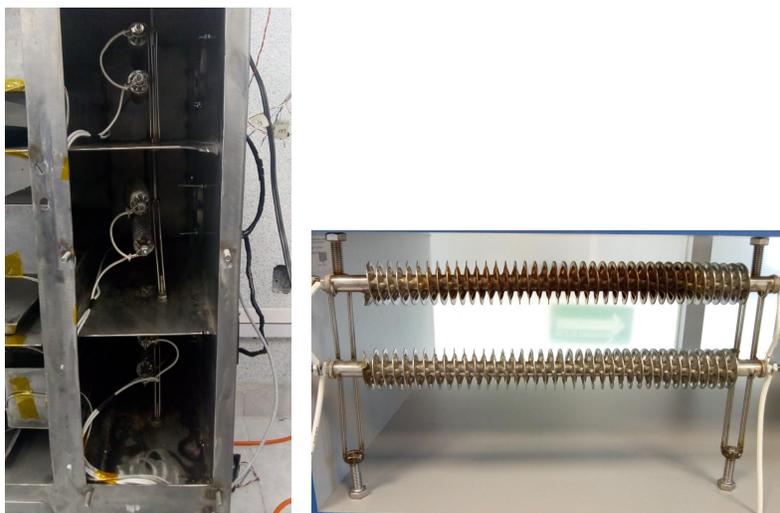
(b) Vista de la planta física

Figura 2.10: Planta Experimental empleada

A continuación se describe en forma mas específica la plataforma empleada.

- En la primer cámara se encuentra la parte de calefacción, que consta de tres niveles, cada uno de ellos constituidos por dos resistencia eléctricas de 500 watts montadas sobre soportes de acero inoxidable mostrados en la Figura section 3.4.

Las resistencias se encargarán de modificar su temperatura con respecto al voltaje aplicado en ellas, transfiriendo calor a la segunda cámara por medio del aire producido por los ventiladores, los cuales se inicializan a una velocidad fija, ver Figura section 2.1.4. Estos se encargan de transferir el calor de las resistencias eléctricas a la segunda cámara, donde se encuentra el producto a deshidratar.



(a) Resistencias colocadas sobre la planta (b) Resistencias Vista Frontal sobre los soportes de acero inoxidable

Figura 2.11: Resistencias eléctricas



Figura 2.12: Ventiladores encargados de transferir el calor de las resistencias

- En la segunda cámara se encuentran los sensores RTD, colocados en los tres niveles de deshidratación sobre soportes de plástico PLA, figura section [2.1.4](#).



Figura 2.13: Sensores RTD

Los sensores se encuentran acoplados a un transductor, el cual se encarga de medir la temperatura la y convertirla a corriente.

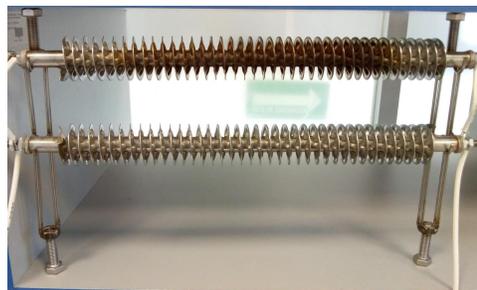
De la misma forma, esta señal es convertida a voltaje para la lectura con alguna tarjeta de adquisición de datos o un controlador de temperatura. En esta misma cámara se encuentran las bandejas para colocar el producto de deshidratación.

En cada uno de los tres niveles de la segunda cámara, hay una placa de acero inoxidable perforada, para poder permitir que el aire caliente circule por dicho producto, y a su vez, dejar caer en la segunda bandeja el líquido sobrante.

Esta cámara tiene dos aperturas una por la cual circula el aire caliente de las resistencias eléctricas y otro por donde este mismo sale, ver en la Figura section [2.2.2](#).



(a) Salida de aire



(b) Entrada de aire

Figura 2.14: Entrada y salida de aire

- Compartimiento para la electrónica constituida por una fuente de 12 V_{cd} (que alimenta a los ventiladores), una etapa de potencia y regulación de una fuente de V_{ca} , para cada uno de los niveles de las resistencias, un transductor de temperatura alimentado por una fuente de 24 V_{cd} .

De esta forma se constituye la plataforma experimental. En la siguiente sección se describe el protocolo de comunicación.

2.2. Protocolo de comunicación OPC SERVER

La parte de la implementación del OPC Server se describe en la presente sección. Como ya se mencionó, el PLC SIEMENS es el encargado de la lectura de sensores y la activación de actuadores en el lazo de control. Para ello, se emplean las instrucciones "PID compact", del software de programación, además, se configuraron sus protocolos de comunicación para el envío de datos a una computadora personal mediante el protocolo OPC Server. Para ello se programó en el PLC la lectura de un sensor de temperatura RTD PT100. Dicha lectura se asigna a una variable de acceso global en la memoria interna del PLC, con el objetivo de poder graficar dicha señal en una interfaz HMI y en el software LabVIEW instalado en la computadora personal. Adicionalmente, dicha variable global, se define como la variable del proceso (PV), para ello en el programa *OPC server configuration* (parte del software OPC server), se realiza el enlace entre dicha variable, el software LabVIEW, TIA portal, la HMI, el PLC y el Quickclient. Siendo éste último un subprograma del OPC Server, y tiene asignada la tarea de almacenar los valores numéricos de las variables. Por otro lado, mediante las marcas (direcciones físicas de memoria interna en el PLC) creadas para la lectura del sensor, se monitorea la temperatura (almacenada en las marcas) con el software LabVIEW y el protocolo OPC. Con esto es posible graficar la variable del proceso (o cualquier otra variable almacenada en las marcas) e inicializar el bloque PID programado en el PLC. Este enlace creado entre el PLC y la computadora personal, permite realizar operaciones en forma relativamente sencilla, que un PLC por sí mismo efectuaría con el uso de programación compleja. Así mismo, se programó un código en LabVIEW de tal forma que el usuario puede modificar la información contenida en las marcas del PLC, desde la computadora, lo cual hace que el enlace sea bidireccional, es decir con capacidad de lectura y escritura en ambas direcciones [24].

2.2.1. Sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA)

Los sistemas SCADA, permiten la gestión y control de cualquier sistema local o remoto, gracias a su interfaz gráfica y a su módulo de comunicación, que permite al usuario interactuar con el sistema, como se muestra en el siguiente diagrama Figura section 2.2.1

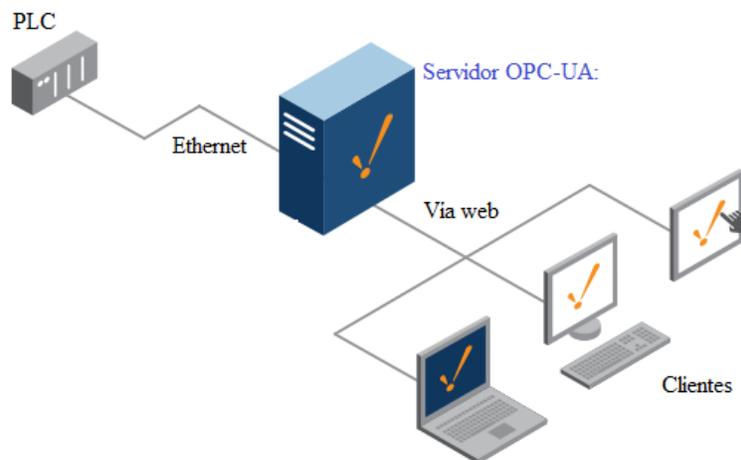


Figura 2.15: Sistema SCADA

2.2.2. Comunicación

El protocolo PROFINET es el estándar abierto de Ethernet industrial creado por la asociación PROFIBUS International, basado en la norma IEC 61784-2, el cual es uno de los estándares de comunicación mas utilizados en redes de automatización, debido a su sencillez y relativo bajo costo en el cableado.

El protocolo de comunicación PROFINET permite conectar dispositivos, sistemas y celdas (conjuntos de dispositivos aislados entre sí), lo cual mejora la velocidad de procesamiento como también la seguridad de sus comunicaciones, reduciendo costos y optimizando la producción.

El protocolo PROFINET utiliza tres tipos de servicios de comunicación:

- Estándar TCP/IP : este servicio se utiliza para funciones como parametrización y transmisión de datos de sistemas.

- Tiempo real: Las capas TCP/IP no son utilizadas para dar un rendimiento determinista a las aplicaciones de automatización, funcionando con unos tiempos de retardo en el rango 1-10ms. Este hecho representa una solución basada en software adecuada para aplicaciones típicas de E/S, incluyendo control de movimiento y requisitos de alto rendimiento.
- Tiempo real isócrono :La priorización de señal y la conmutación programada proporcionan una sincronización de alta precisión para aplicaciones como el control de movimiento. Las velocidades de ciclo en rangos de sub-milisegundos son posibles, con jitter (variabilidad temporal durante el envío de señales digitales) en el rango de sub-microsegundos.

Diagrama de comunicación profinet.

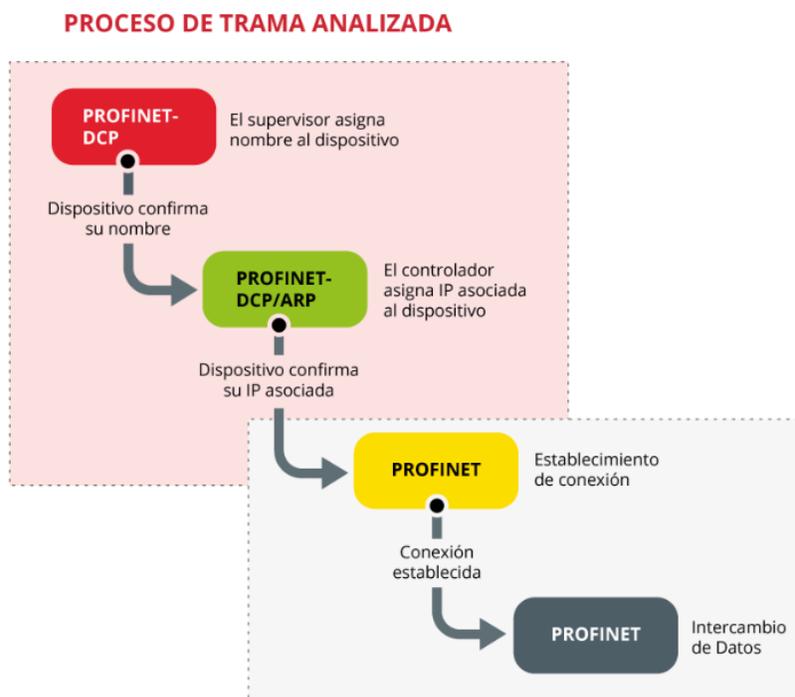


Figura 2.16: Comunicación Profinet

2.2.3. Diagrama PLC

Primero se encuentra la fuente de suministro, el cual hace que el sistema funcione, a continuación sigue la unidad de procesamiento que contiene la programación del PLC y sus configuraciones las cuales están basadas en un microcontrolador que permite utilizar aritmética y operaciones lógicas, así como la detección de errores en el mismo. Posteriormente se encuentra el bus de direcciones para la transferencia de datos entre celdas donde se guardaron los datos; seguidamente el bus de control y el bus de sistema. El bus de control tiene la tarea de procesar las señales de control de componentes internos, y el bus de sistema está encargado de conectar los módulos E/S.

El lugar donde se guardan los datos y las instrucciones es la memoria, que se divide en memoria permanente, PM, y memoria operacional, conocida como memoria de acceso aleatorio o RAM. La primera, la PM, se basa en las ROM, EPROM, EEPROM o FLASH; es donde se ejecuta el sistema de operación del PLC y puede ser reemplazada. Sin embargo, la RAM, es donde se guarda y ejecuta el programa en cuestión utilizado y es la de tipo SRAM la que se utiliza habitualmente. La condición común para las entradas de dos componentes digitales de un PLC se guarda en una parte de la RAM y se denomina tabla PII o entrada imagen de proceso. La salida controlada, o el último valor de la salida calculado por las funciones lógicas, se guardan en la parte de la RAM denominada tabla PIO, salida de la imagen del proceso. El programa utilizado también puede guardarse en una memoria externa permanente (EPROM o EEPROM) que, para ciertos PLCs, puede ser un módulo externo que se coloca en una toma del panel frontal.

Finalmente, los módulos de E/S, son aquellos módulos de señal (SM) que coordinan la entrada y salida de las señales, con aquellas internas del PLC. Estas señales pueden ser digitales (DI, DO) y analógicas (AI, AO), y provienen o van a dispositivos como sensores, interruptores, actuadores, etc.

Diagrama del procesamiento del PLC

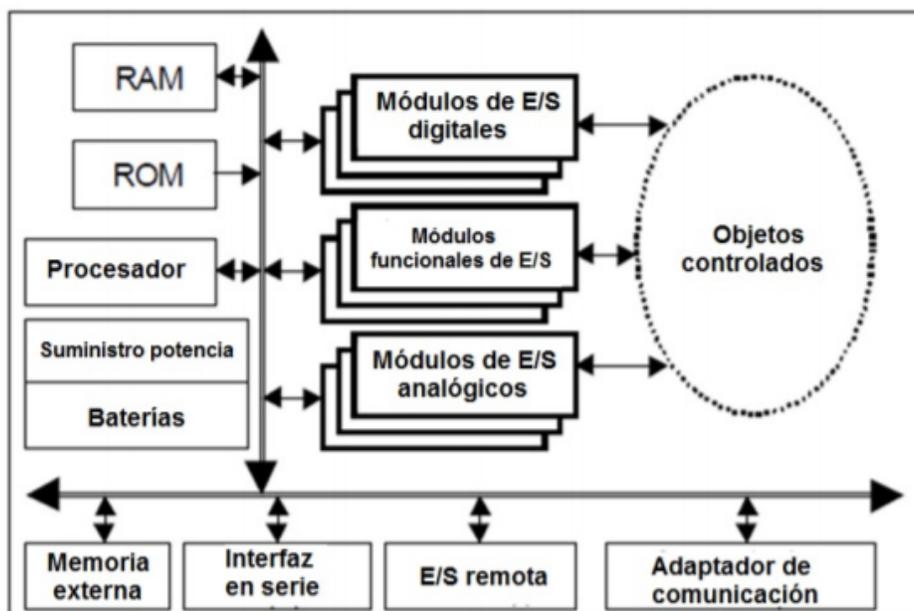


Figura 2.17: Diagrama PLC

2.2.4. Identificación del modelo (aproximado)

Para analizar un sistema de control el primer paso es obtener su modelo matemático. Algunos criterios de diseño se basan en señales de entrada de prueba particulares y se analiza la respuesta del sistema ante estas entradas.

Las señales de prueba que se usan regularmente son funciones escalón, rampa, parábola e impulso. Con estas señales de prueba, es posible realizar con facilidad análisis matemáticos y experimentales de sistemas de control [25].

Para obtener el modelo matemático del sistema de temperatura analizado en este trabajo de tesis, se aplica una función escalón al sistema físico.

El procedimiento se realiza con producto en la planta (jitomate) y considerando que las zonas de operación de la planta serán, $60^{\circ}C$ y $70^{\circ}C$. Los pasos del procedimiento son descritos a continuación.

- 1.- El ventilador se mantiene a velocidad constante aplicando $12.0 V_{cd}$, de manera que se obtenga una velocidad de viento de $2 m/s$.
- 2.- La magnitud de la señal escalón aplicada al actuador (resistencia eléctrica) dependerá de la zona de operación que se desee, en la Tabla 2.1 queda establecida la

relación.

Tabla 2.1: Magnitud de la señal escalón (2.1)

Región	Volts
60°C	68.98
70°C	81.87

- 3.- La ganancia k de establecimiento se obtendrá a partir del valor de la temperatura que se considere ya no presente variaciones, con base en el criterio de la literatura $\pm 2\%$.
- 4.- La constante de tiempo τ corresponde al 63.2% del valor de ganancia k obtenida [25].
- 5.- El valor del retardo h o L es obtenido con base en los datos de temperatura obtenidos durante el procedimiento.

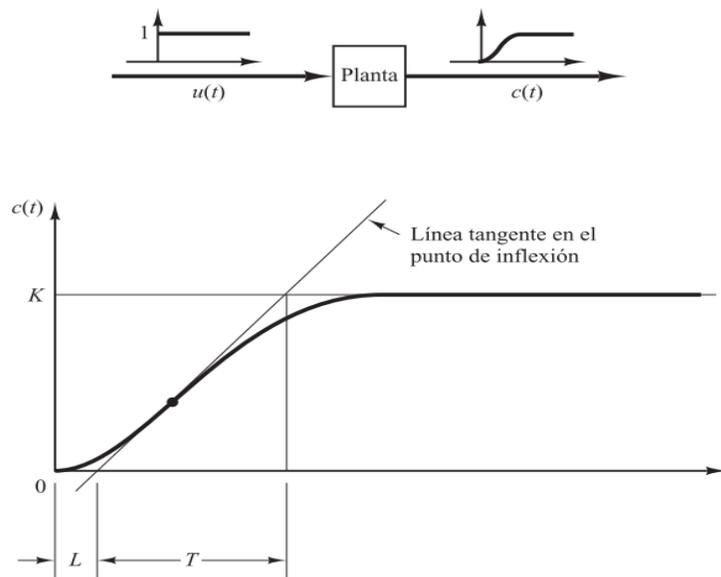


Figura 2.18: Respuesta a un escalón unitario de una planta.

Los resultados son expuestos en la sección de resultados de simulación.

Capítulo 3

Implementación y Resultados experimentales

En este capítulo se abordan la implementación del sistema SCADA y la presentación de los resultados experimentales de la tesis.

3.1. Programación OPC SERVER

Para la programación del OPC Server, es necesario primero programar cada una de las entradas y salidas del PLC que se utilizarán, en este caso, una entrada analógica y una salida analógica. Para ello es necesario normalizar la entrada y la salida a utilizar, una vez normalizadas, estos datos son codificados a un tipo de dato REAL y a la vez transferirles los atributos de marca global, así como la característica de modificación de parámetros remotos por medio de un cliente. También es necesario programar una base de datos para almacenar los datos obtenidos de la entrada y la salida para su graficación posterior. Para ello se emplean interrupciones en la obtención de los datos de medición correspondiente. Para la programación de la HMI, es necesario vincular las variables que proporcionan tanto el PLC como el OPC, ya que estos tienen el acceso a dichas marcas. La HMI tiene la cualidad de un dispositivo periférico y la opción de modificar dichas variables, siempre y cuando sean declaradas en el programa de TIA PORTAL. Entre las cualidades de la HMI se encuentra el arranque del PID, como también la graficación de las entradas y salidas del PLC en tiempo real. Una vez programadas las marcas en el PLC y la HMI, es necesario acceder a la configuración del software TIA PORTAL, donde se activa y configura la comunicación mediante un cliente, para acceder a ellas por medio de un Quickclient y el OPC server. En la parte del OPC server es necesario configurar el tipo de comunicación

y la dirección del PLC, así como el software LabVIEW, procedimiento que se describe a continuación. Como siguiente paso se programó y configuró cada una de las marcas,

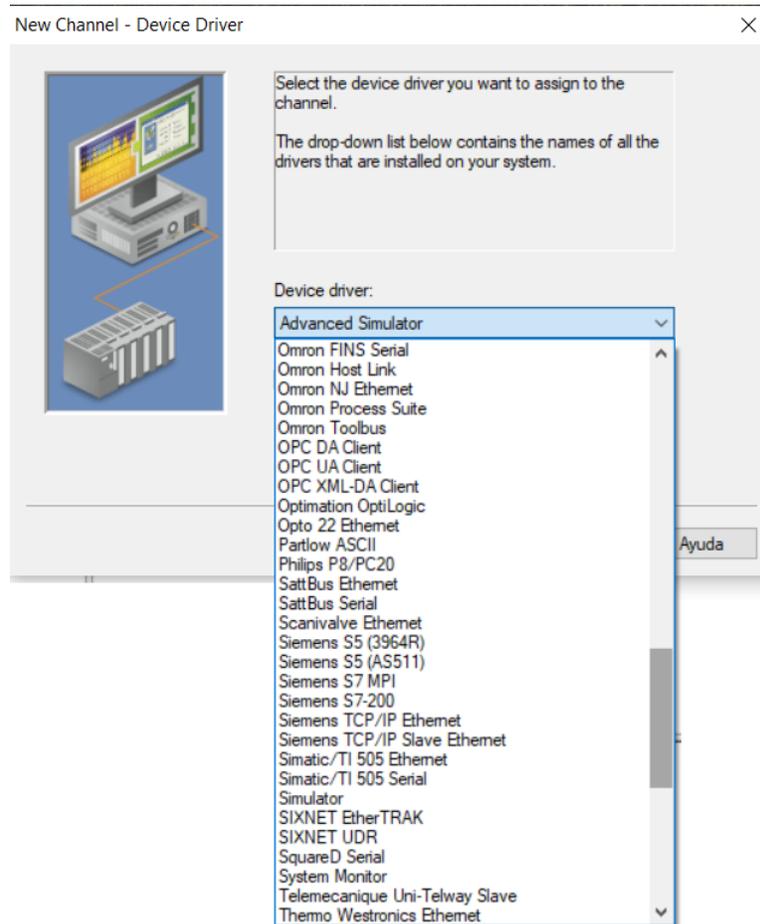


Figura 3.1: Panel Programación del dispositivo

tomando en cuenta el tipo de dato, dirección, tiempo de muestreo y el tiempo de señal de lectura, de escritura o ambos, como se muestra en la Figura section 3.1. Configuradas las marcas y sus tipos de datos mediante el software Quickclient, verificamos la existencia de comunicación entre el software OPC SERVER y las marcas de TIA PORTAL. Una vez verificada la comunicación y procesamiento de los datos obtenidos, se crea un proyecto nuevo en LabVIEW, donde se configura un cliente OPC Server, así como las marcas del OPC server. La Figura section 3.1 muestra la situación referida.

La siguiente sección describe en forma breve el algoritmo numérico de optimización.

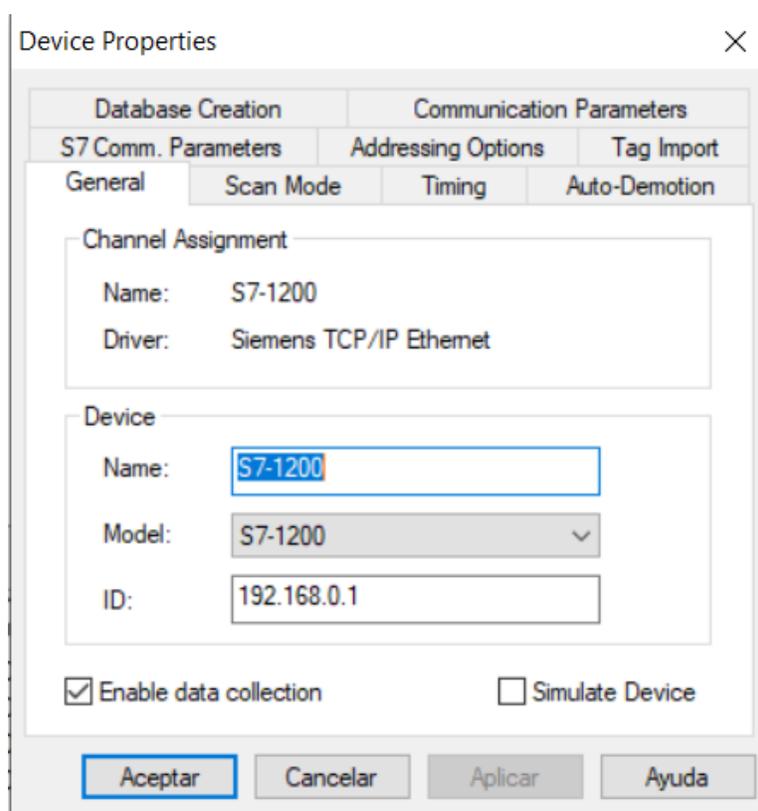


Figura 3.2: Menú del dispositivo y dirección

escaloarr...	M0.1	Boolean	100	None
escapli	MD22	Float	100	None
inicio	M0.2	Boolean	100	None
paro	M0.3	Boolean	100	None
salida	Q0.0	Boolean	100	None
start	M0.0	Boolean	100	None
stop	M1.0	Boolean	100	None
temperatura	MD14	Float	100	None

Figura 3.3: Panel Programación dispositivo

OPC Quick Client - Sin título *

File Edit View Tools Help

Item ID	Data Type	Value	Timestamp	Quality	Update Count
System_ActiveTagCount	DWord	125	01:32:05.838	Good	3
System_ClientCount	DWord	4	01:32:04.808	Good	1
System_Date	String	26/11/2019	01:32:04.808	Good	1
System_Date_Day	DWord	26	01:32:04.808	Good	1
System_Date_Month	DWord	11	01:32:04.808	Good	1
System_Date_Year2	DWord	19	01:32:04.808	Good	1
System_Date_Year4	DWord	2019	01:32:04.808	Good	1
System_DateTime	Date	2019-11-26T07:32:1...	01:32:19.845	Good	16
System_DateTimeLocal	Date	2019-11-26T01:32:1...	01:32:19.845	Good	16
System_FullProjectName	String	C:\ProgramData\Nat...	01:32:04.808	Good	1
System_IsDemo	Boolean	0	01:32:04.808	Good	1
System_OpcClientNames	String Array	[Quick Client]	01:32:04.808	Good	1
System_ProjectName	String	default.opf	01:32:04.808	Good	1
System_ProjectTitle	String	Untitled	01:32:04.808	Good	1
System_Time	String	1:32:20	01:32:19.845	Good	16
System_Time_Hour	DWord	1	01:32:04.808	Good	1
System_Time_Hour24	DWord	1	01:32:04.808	Good	1
System_Time_Minute	DWord	32	01:32:04.808	Good	1
System_Time_PM	Boolean	0	01:32:04.808	Good	1
System_Time_Second	DWord	19	01:32:19.845	Good	16
System_TotalTagCount	DWord	125	01:32:05.838	Good	3

Figura 3.4: Panel Quickclient

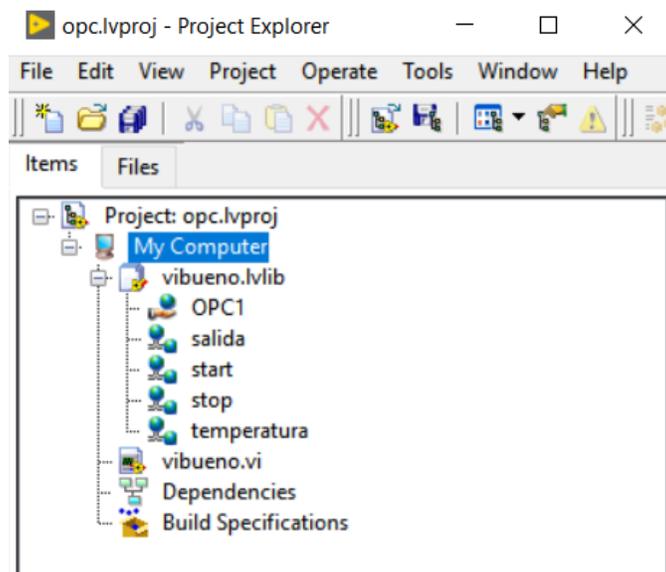


Figura 3.5: Configuración cliente en labview

3.2. Método de Hill Climbing

Este algoritmo, conocido también como *Algoritmo de Escalada Simple* o *Ascenso de colinas*, es una técnica de optimización numérica de búsqueda local de máximos o mínimos de una función objetivo. El algoritmo es iterativo, y comienza con una solución arbitraria al problema definido, luego intenta encontrar una mejor solución variando incrementalmente un único elemento de la solución. Si el cambio produce una mejor solución, otro cambio incremental se le realiza a la nueva solución, repitiendo este proceso hasta que no se puedan encontrar mejoras o se alcance un número determinado de iteraciones. Suele llamarse a esta búsqueda algoritmo *voraz* local, porque toma un estado vecino *bueno* sin pensar en la próxima acción.

El Algoritmo Hill Climbing es útil en la búsqueda de un óptimo local (una solución que no puede ser mejorada considerando una región alrededor de dicho óptimo), pero no garantiza encontrar la mejor solución posible (óptimo global) de todas las posibles soluciones (el espacio de búsqueda). Este algoritmo se utilizó en el presente trabajo para optimizar las ganancias de control PID, considerando un índice de desempeño cuadrático, que penalice la convergencia del error y la minimización de la energía empleada por el control. A continuación se describe dicha implementación.

Cualquier conjunto de ganancias K_p , K_i y K_d ingresadas al controlador PID (3.1), generan una señal de control diferente, a esto se le conoce como sintonización. Una de las formas más utilizadas del controlador PID [15] en tiempo continuo es dado por

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} \right), \quad (3.1)$$

donde K_p es la ganancia proporcional, T_i y T_d son el tiempo integral y derivativo, respectivamente, N es una constante fijada en 8 [15], el uso de un filtro primer orden para su implementación en la parte derivativa, es para prevenir amplificación de efectos del ruido [15].

El algoritmo Hill Climbing se aplicó en este trabajo de investigación con el objetivo de obtener una sintonización optimizada de las ganancias del controlador PID, las cuales son programadas en el PLC S7-1200 Siemens.

La implementación del algoritmo Hill Climbing se trabajó en tiempo discreto, a través de la transformada z . La ecuación (3.1) referente al controlador PID, en tiempo discreto, se muestra a continuación

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K_p(n_3z^3 + n_2z^2 + n_1z + n_0)}{d_3z^3 + d_2z^2 + d_1z + d_0}, \quad (3.2)$$

donde los coeficientes son

$$\begin{aligned} n_3 &= T_s^2 + T_d T_s \left(1 - e^{-\frac{N}{T_d}}\right), & n_1 &= T_s^2 \left(e^{-\frac{N}{T_d}} + \left(e^{-\frac{N}{T_d}} + 1\right) e^{-T_d T_s}\right) + T_d T_s \left(3 - 3e^{-\frac{N}{T_d}}\right), \\ n_0 &= -T_s^2 e^{-\frac{N}{T_d}} e^{-T_d T_s} - T_d T_s \left(1 - e^{-\frac{N}{T_d}}\right), \\ n_2 &= -T_s^2 \left(e^{-\frac{N}{T_d}} + 1 + e^{-T_d T_s}\right) + 2T_d T_s \left(e^{-\frac{N}{T_d}} - 1\right), \\ d_3 &= T_s^2, & d_2 &= -T_s^2 \left(e^{-\frac{N}{T_d}} + 2\right), & d_1 &= T_s^2 \left(2e^{-\frac{N}{T_d}} + 1\right), & d_0 &= -T_s^2 e^{-\frac{N}{T_d}}. \end{aligned}$$

Para el caso del modelo matemático de la planta (??), considerando un modelo aproximado de primer orden con retardo, en tiempo discreto es representado por

$$G(z) = \frac{X(z)}{U(z)} = \frac{az^{-D+1}}{z - e^{-b}}, \quad (3.3)$$

donde $X(z)$ es la salida de la planta (para este caso, es la temperatura del aire de secado del proceso), $U(z)$ es la entrada (voltaje aplicado a la rejilla eléctrica), $a = \frac{K}{T}$, $b = \frac{1}{T}$, $D = \frac{h}{T_s}$, h es el retardo y T_s es el tiempo de muestreo.

El problema de la optimización radica en encontrar las ganancias K_p^* , K_i^* y K_d^* que minimicen el siguiente índice de desempeño cuadrático, penalizando el error y la señal de control:

$$J_d = \sum_{i=0}^M (e(i)^2 Q + u(i)^2 R), \quad (3.4)$$

donde Q y R son constantes positivas, establecidas por el usuario.

Adicional a esto, se requiere garantizar la estabilidad en lazo cerrado del controlador PID optimizado y la planta. A continuación se enumeran los pasos del algoritmo numérico implementado.

- 1.- Establecer un número máximo de iteraciones del algoritmo y generar un vector inicial $\bar{K} = \begin{bmatrix} K_p & K_i & K_d \end{bmatrix}$.
- 2.- Se inicializa con ganancias estables de magnitud pequeña (para este caso de estudio el valor empleado es de 0.1), el primer vector se denota como $\bar{K}^* = \begin{bmatrix} K_p^* & K_i^* & K_d^* \end{bmatrix}$.
- 3.- Damos solución numérica al lazo cerrado del sistema (3.3) y (3.2), se calcula el índice de desempeño $J_d(\bar{K}^*)$, nombrándolo índice de desempeño óptimo.

- 4.- Mutamos los valores de \bar{K}^* conforme a una variable aleatoria uniforme δ_1 , δ_2 y δ_3 , de la forma

$$\bar{K}_\delta = \left[K_p^* + \delta_1, K_i^* + \delta_2, K_d^* + \delta_3 \right]$$

- 5.- Verificar la estabilidad en lazo cerrado del sistema (3.3)(3.2) con las ganancias de \bar{K}_δ por medio de la localización de las raíces en el círculo unitario. En el caso de ser inestable se regresa al paso 4, y si es estable se obtiene el Índice de desempeño $J_d(\bar{K}_\delta)$.
- 6.- Si $J_d(\bar{K}_\delta) < J_d(\bar{K}^*)$, entonces ahora $J_d(\bar{K}^*) = J_d(\bar{K}_\delta)$ y $\bar{K}^* = \bar{K}_\delta$. Si no, $J_d(\bar{K}^*) = J_d(\bar{K}^*)$.
- 7.- Si el número de iteraciones ha concluido, entonces se obtiene el valor de \bar{K}^* y el programa es finalizado. De lo contrario regresar al paso 4.

La programación del algoritmo Hill Climbing se realizó con el software de Matlab.

3.3. Resultados experimentales

Mediante la respuesta al escalón unitario en lazo abierto, se obtuvieron los parámetros necesarios para calcular las ganancias del controlador PID mediante la técnica de sintonización de Ziegler Nichols, mostradas en la figura section 2.2.2 .

KP	TI	TD
25.7	60	29

Figura 3.6: Ganancias PID

3.3.1. Dinámica de la planta en lazo abierto

Se realizaron dos experimentos, uno a $4 V_{cd}$ y en alterna $100.4 V_{ca}$ el cual nos dió la siguiente gráfica de la respuesta al escalón en la cual se puede observar el comportamiento de la temperatura.

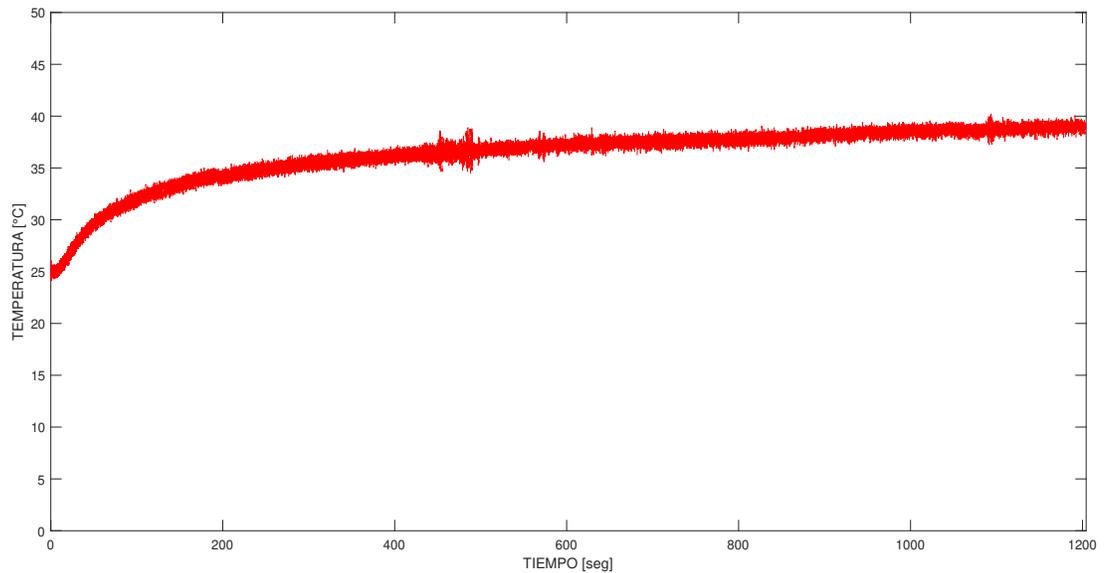


Figura 3.7: Gráfica experimento 1

El segundo experimento fue con $5 V_{cd}$ y en alterna $126.6 V_{ca}$ lo cual nos dió la siguiente gráfica en el cual se puede observar el comportamiento de la temperatura.

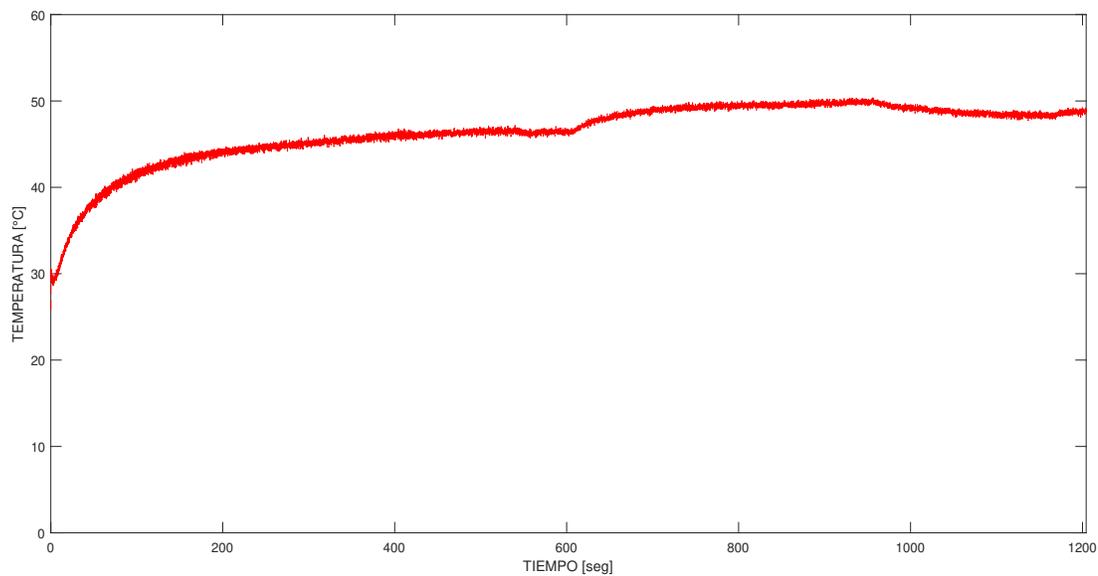


Figura 3.8: Gráfica experimento 2

La simulación ante una entrada escalón en comparación con la real mostrado en la figura section 3.3.1

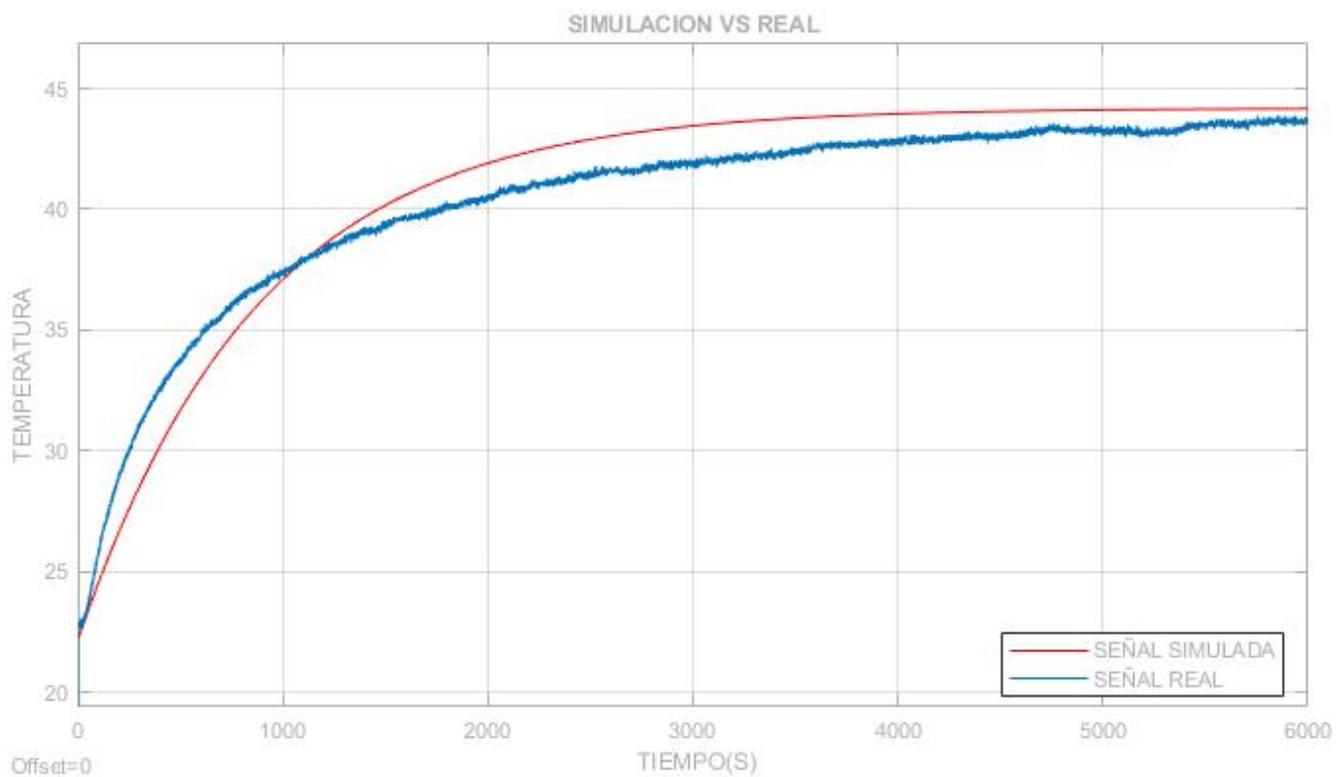


Figura 3.9: Simulación vs Real

3.4. Experimentos

Las ganancias obtenidas se implementaron sobre el controlador de temperatura industrial HoneyWell DC1040, con el cual se realizaron los siguientes experimentos donde se muestra la temperatura, el error control del PID500 y el voltaje en la rejilla, respectivamente.

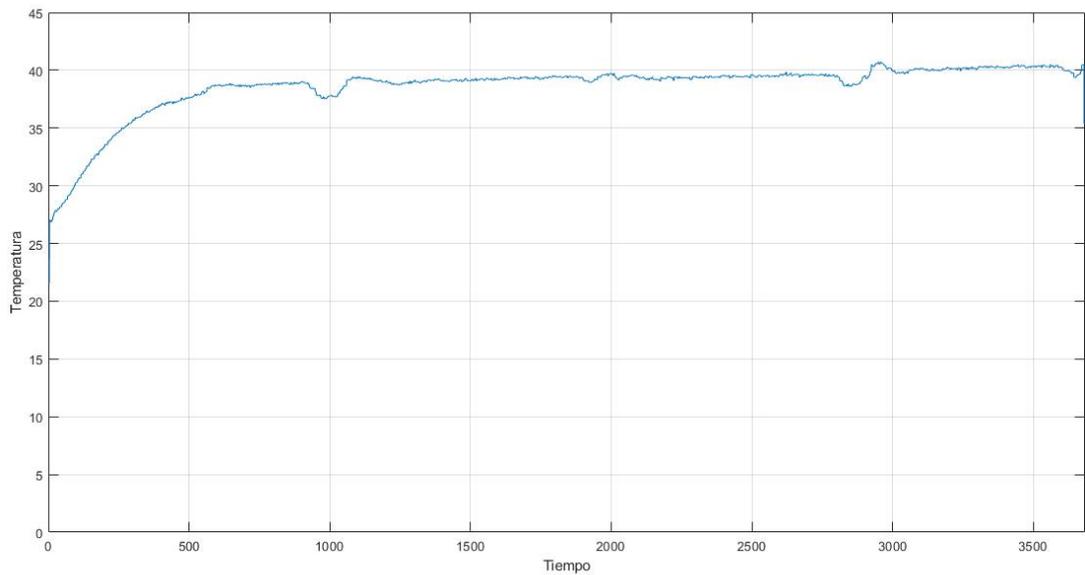


Figura 3.10: Grafica temperatura

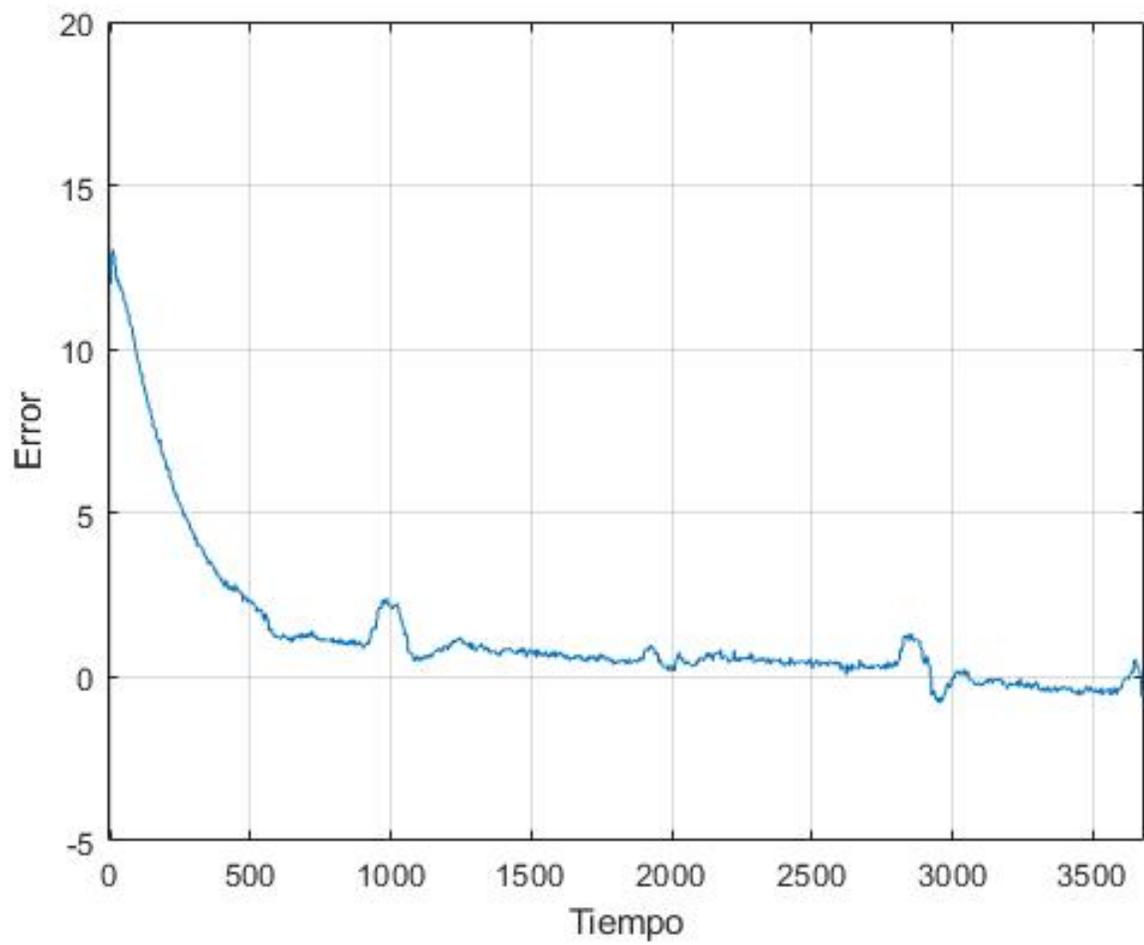


Figura 3.11: Gráfica del error

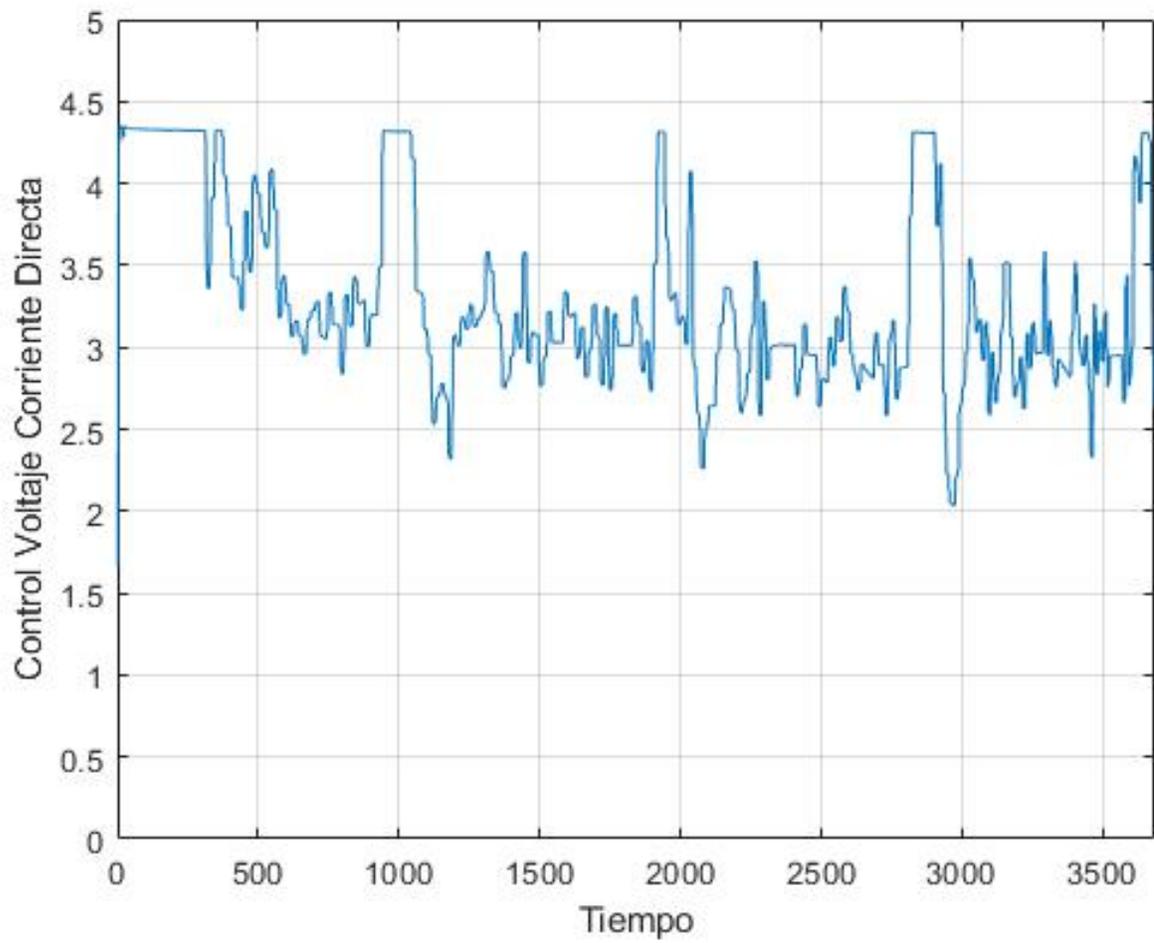


Figura 3.12: Gráfica control HoneyWell DC1040

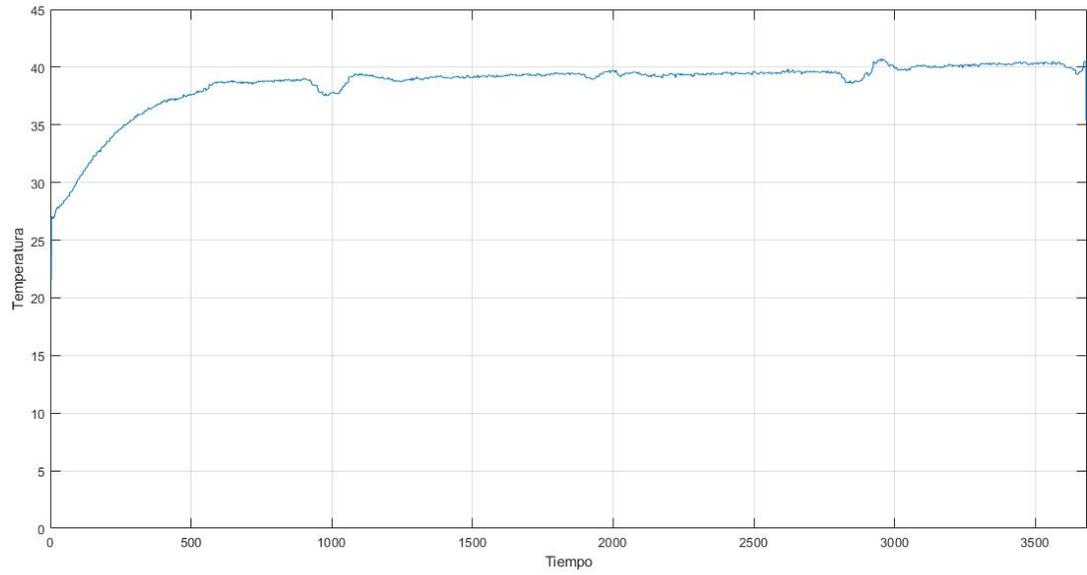


Figura 3.13: Gráfica voltaje en rejilla

Gráfica de la deshidratación del jitomate, muestra su comportamiento a lo largo del experimento.

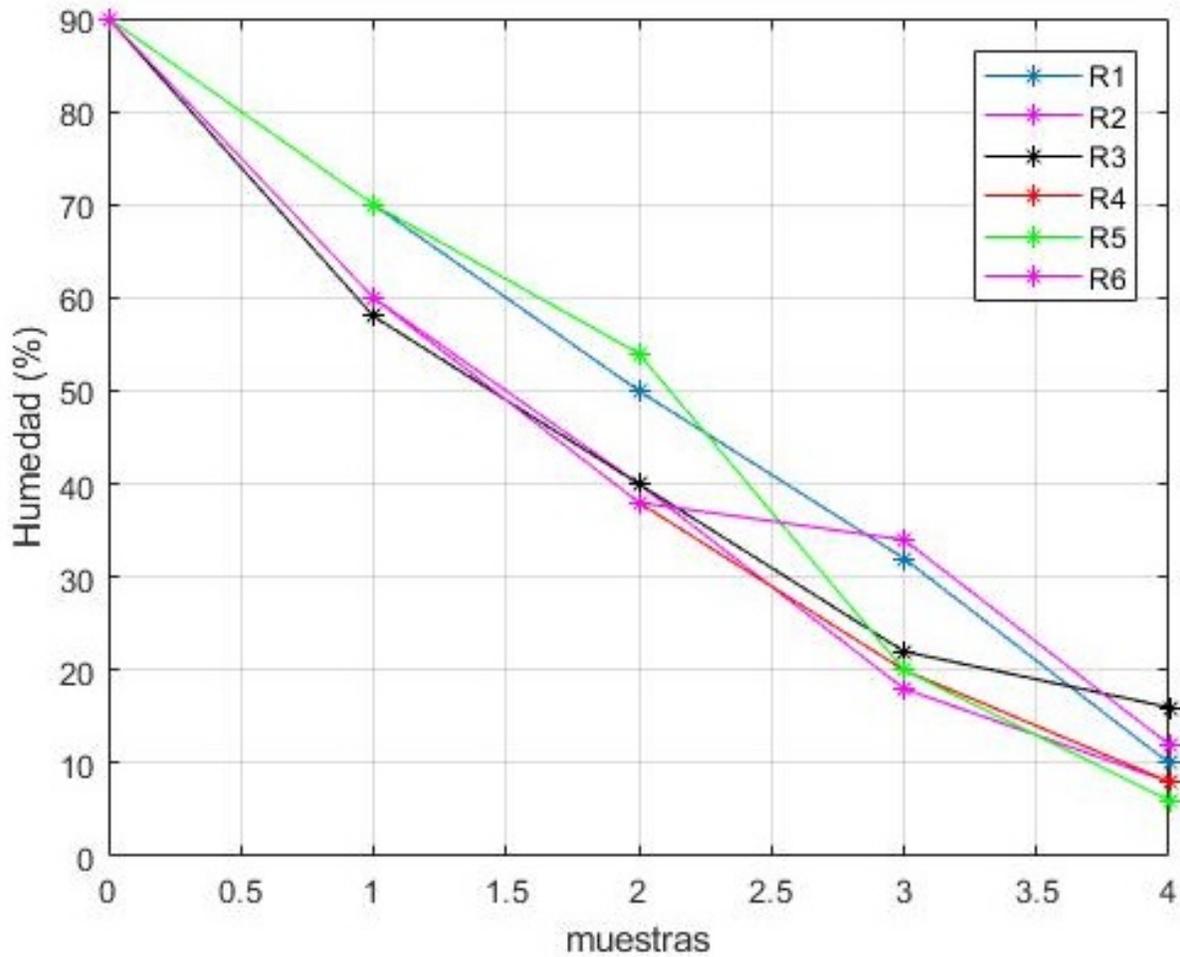


Figura 3.14: Gráfica de deshidratación del jitomate

Fotografías del producto deshidratado al termino del experimento y al inicio.

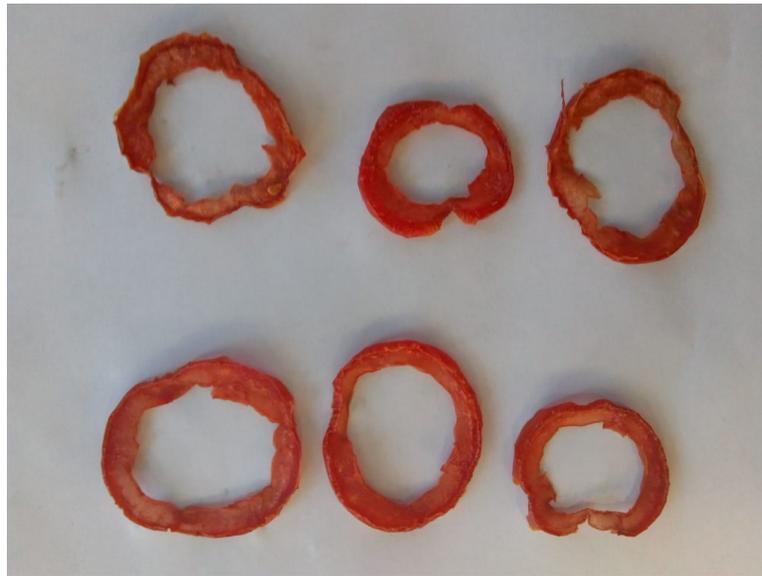


Figura 3.15: Rodajas de jitomate con humedad inicial

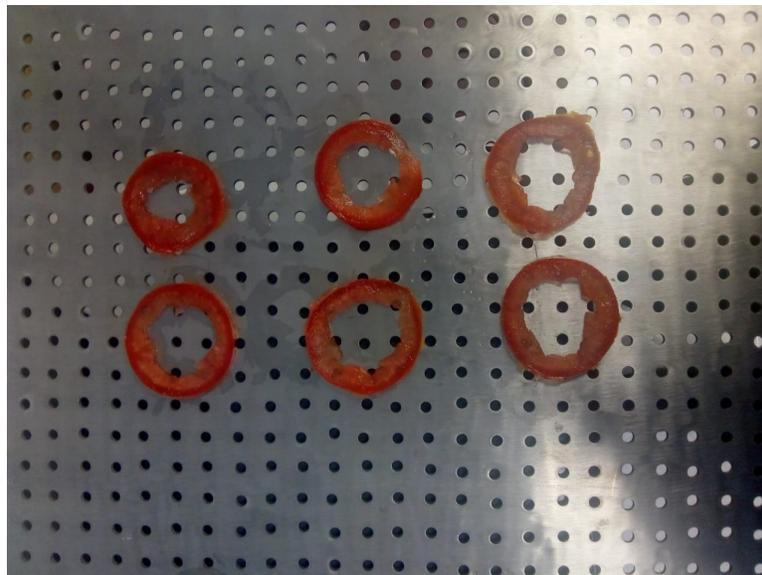


Figura 3.16: Rodajas de jitomate deshidratado

Deshidratación de jitomate con un total de 32 rodajas, a continuación se muestran el control, el error, la temperatura y las gráficas de las rodajas.

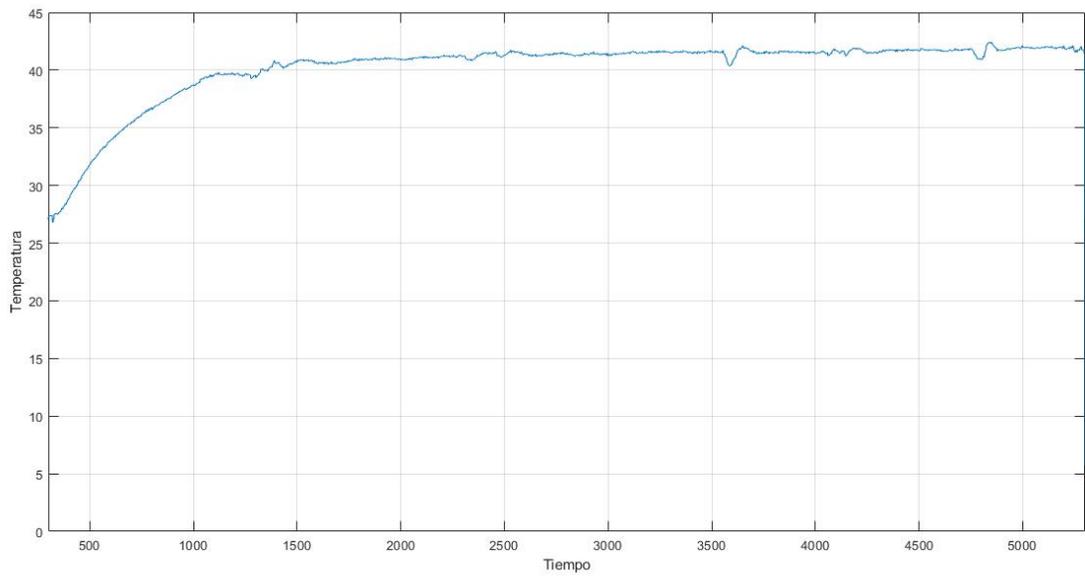


Figura 3.17: Gráfica temperatura

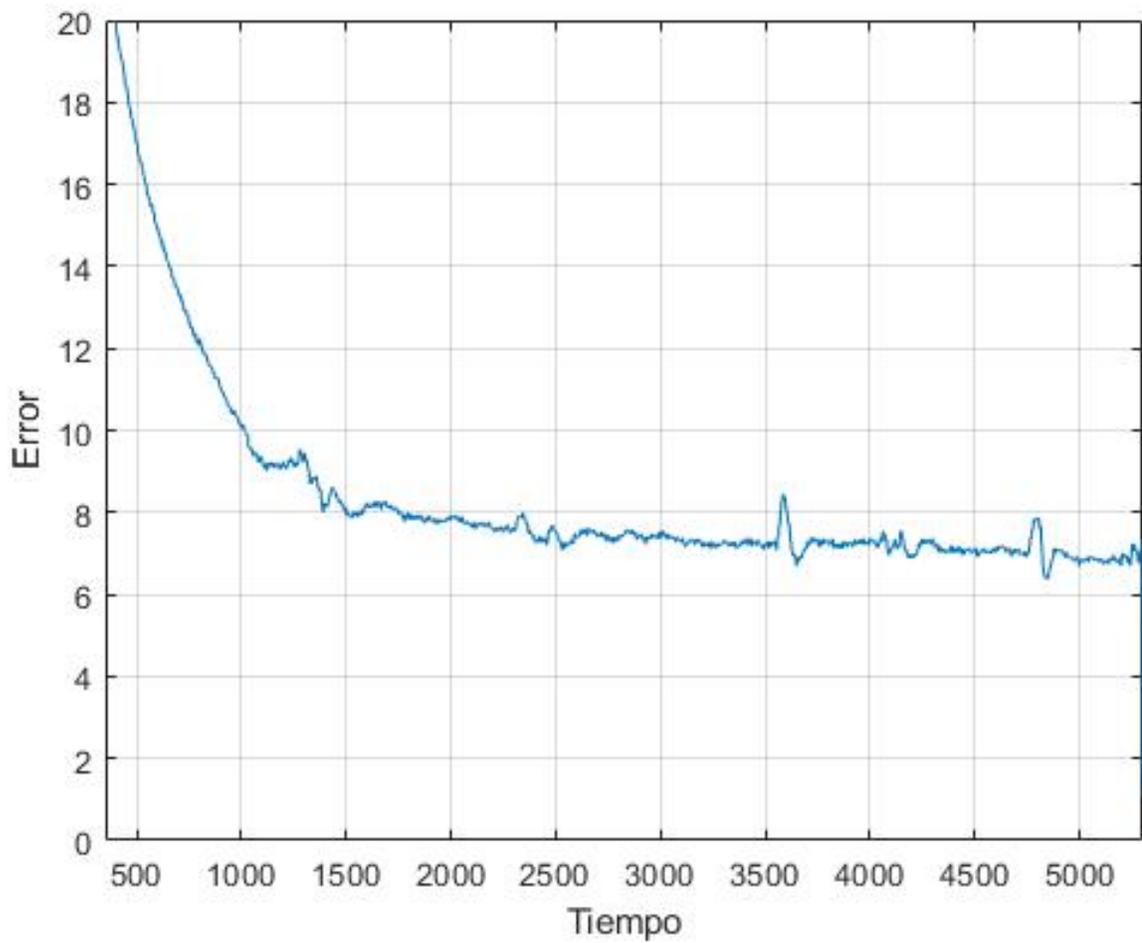


Figura 3.18: Gráfica del error

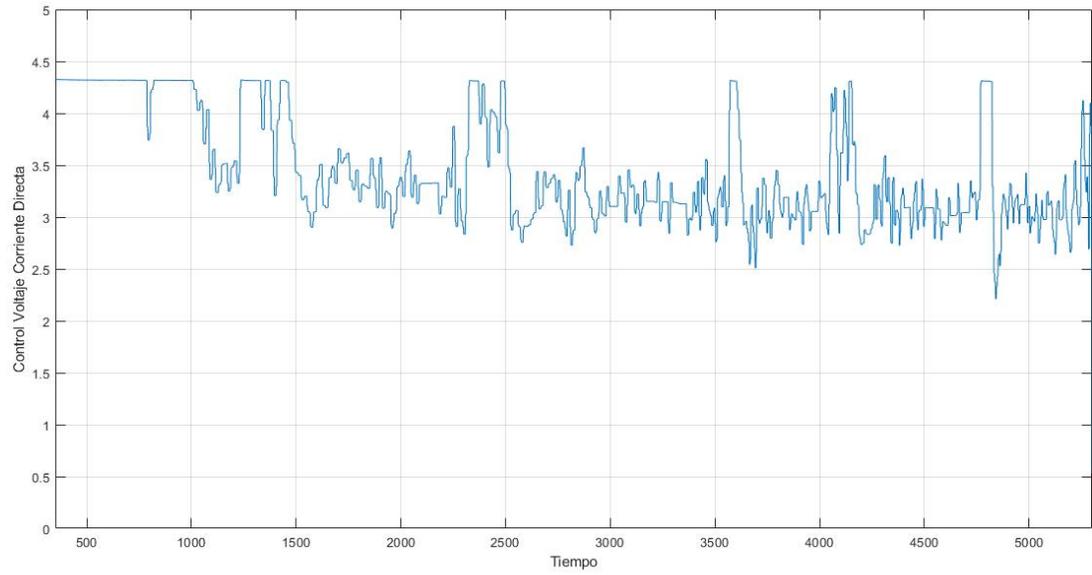


Figura 3.19: Gráfica control PID500

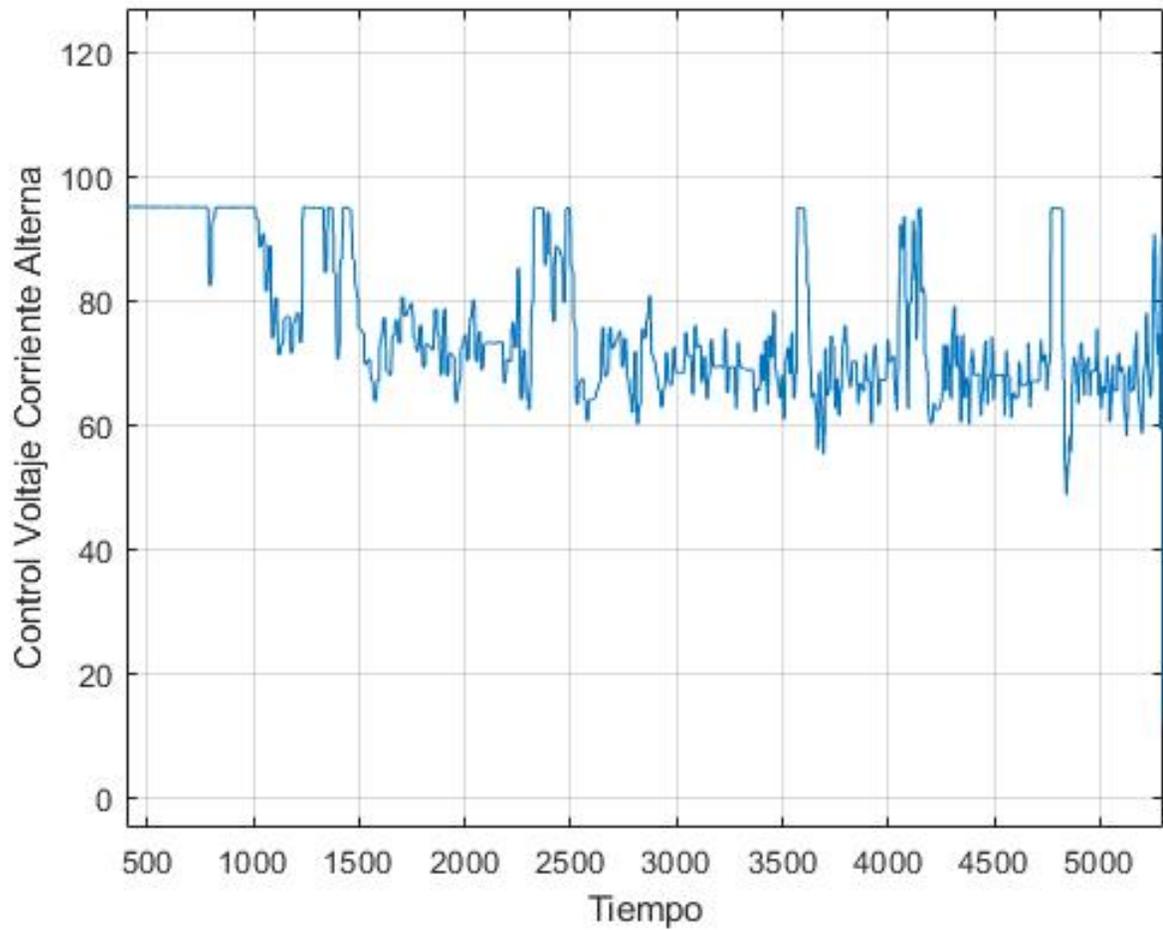


Figura 3.20: Gráfica voltaje en rejilla

Gráfica de la deshidratación del jitomate en la que muestra su comportamiento a lo largo del experimento.

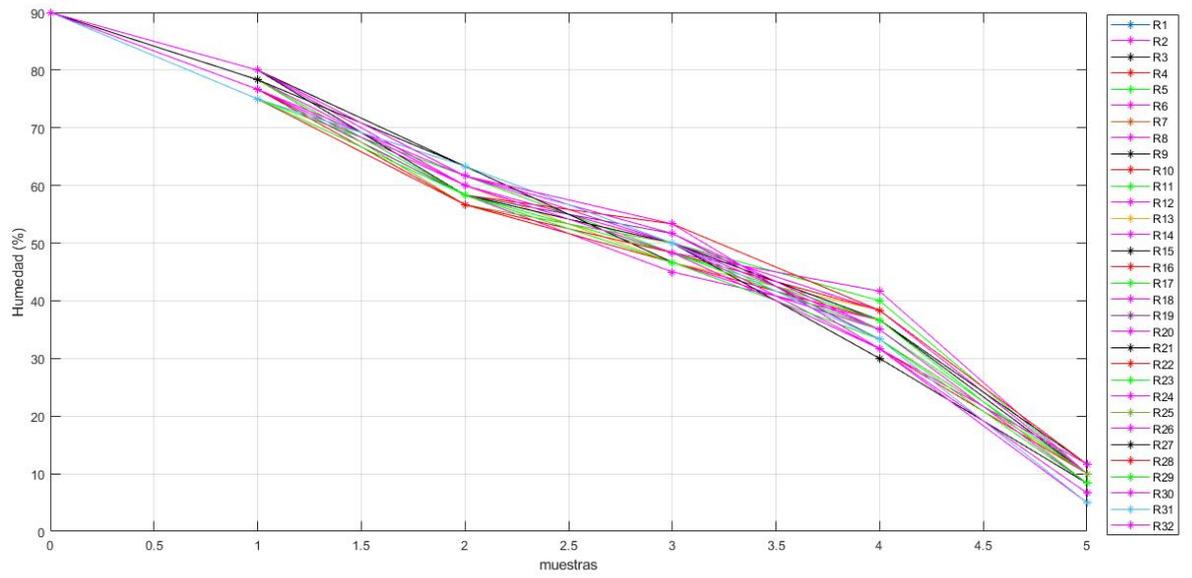


Figura 3.21: Gráfica de deshidratación del jitomate

Fotografías del producto al termino del experimento y al inicio.

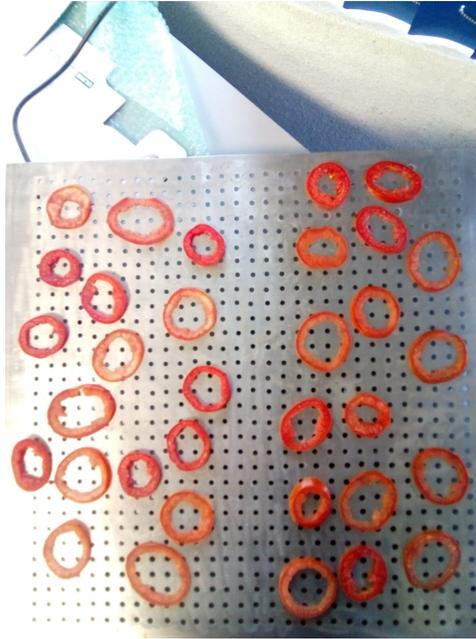


Figura 3.22: Rodajas de jitomate con humedad inicial

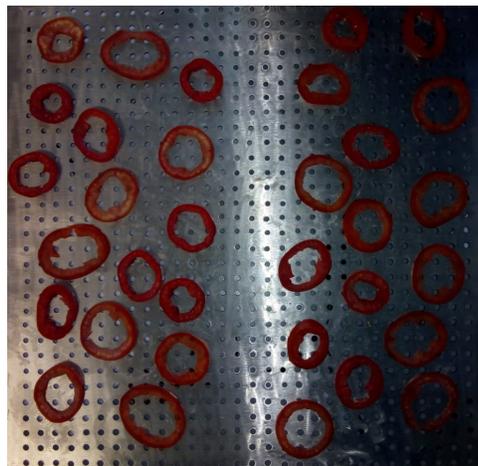


Figura 3.23: Rodajas de jitomate deshidratado

Capítulo 4

Conclusiones y trabajo futuro

Los resultados y conclusiones del presente trabajo de tesis son establecidos a continuación. Se instrumentó y controló un prototipo de deshidratadora atmosférica de jitomate. Para ello, se identificó un modelo matemático simplificado de la planta y se optimizaron las ganancias de un control PID mediante el algoritmo de optimización Hill-Climbing, en cada paso, la verificación de la estabilidad del lazo fue realizada. La sintonización obtenida fue usada en un PLC SIEMENS S7-1200.

Un análisis comparativo con un PID industrial Honeywell DC1040 fue realizado para evidenciar los beneficios del algoritmo de optimización contra un algoritmo de sintonización sin penalización de energía.

Se implementó un sistema SCADA entre un PLC, una HMI y una computadora personal con software LabVIEW. Al considerar hardware (computadora) con el sistema operativo Windows, se optó por usar el protocolo de comunicación OPC Server UA. Dicho sistema se desarrolló para la programación y prueba de leyes de control avanzadas que requieran instrucciones de programación compleja, las cuales son susceptibles de ser programadas en forma relativamente mas sencilla en el software LabVIEW que en el software STEP 7.

Un reto importante es programar leyes de control avanzado en el software LabVIEW, y verificar que el retardo en la comunicación y ejecución no es importante. Otro aspecto interesante sería explorar la posibilidad de implementar leyes de control avanzadas en el PLC, el principal reto es el uso de memoria dinámica en el mismo.

Bibliografía

- [1] Santos-Sánchez, N. F., Valdéz-Blanco, R., Gómez-Gómez, M. S., Pérez-Herrera, A. and Salas-Coronado, R. *Effect of rotating tray drying on antioxidant components, color and rehydration ratio of tomato saladette slices. LWT-Food Science and Technology*, 46(1):298–304, 2011.
- [2] Gómez-Gómez, M. S. *Deshidratado de tomate saladette en un secador de charolas giratorias*. Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2009.
- [3] Garrido-Aranda, E. S. *Control óptimo lineal para una deshidratadora y monitorización en línea del color del producto*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2014.
- [4] Santos-Sánchez, N. F., Salas-Coronado, R., Santos-Sánchez, O. J., Romero, H. and Garrido-Aranda, E. S. *On th effects of the temperature control at the performance of a dehydration process: energy optimization and nutrients retention . The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(1):1–15, 2016.
- [5] Esplugas-Vidal, S. *Fundamentos de transmisión de calor*. I Ediciones de la Universitat de Barcelona, 2005.
- [6] Haley, T. A., Mulvaney, S. J. *Advances process control techniques for the food industry. Trends Food Sci Technol*. Springer-Verlag, 1995.
- [7] Palmor, Z. J. *Time-delay compensation-Smith predictor and its modifications. Control Handbook 1*. Springer-Verlag, 1996.
- [8] Alekal, Y., Brunovsky, P., Chyung, D. H., Lee, E.B. *The quadratic problem for systems with time delays. IEEE Transaction on Automatic Control*, 16(6):673–687, 1971.

-
- [9] Bor sen, C., Yu-Min, C., Ching-Hsiang, L. *A genetic approach to H_2/H_∞ optimal PID control. IEEE Control System*, 15(5):51–60, 1995.
- [10] Santos-Sánchez, O. J., Sánchez-Díaz, G. *Suboptimal control based on hill climbing method for time delay systems. IET Control Theory and Applications*, 5(1):1441–1450, 2007.
- [11] Åström, K.J, Hägglund, T. *Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control. Journal of Process Control*, 14:635–650, 2004.
- [12] Visioli, A. *Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes. IEE Control Theory and Application*, 148(2):293–307, 2001.
- [13] Astrom, K. J. *Control PID avanzado*. Pearson-Education S.A, 2009.
- [14] O’Dwyer, A. *A summary of PI and PID controller tuning rules for processes with time delay. IFAC Work Shop on Digital Control*, 4(7):175–180, 2001.
- [15] Visioli, A. *Practical PID control*. Springer-Verlag London Limited, 2006.
- [16] Vineet, S., Pankaj, R., Om, P. *Design and evaluation of classic PID, gain and phase margin based controller and intelligent controller design for a ceramic infrared heater. ARPN Journal of Science and Technology*, 3(3):248–256, 2012.
- [17] Assawinchaichote, W., Sungthong, A. *Particle swarm optimization based optimal PID parameters for air heater temperature control system. Procedia Computer Science*, 86:108–111, 2016.
- [18] Li, Y., Ang, K.H., Chong, G.C.Y. *Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art, journal = IEEE Control Systems Magazine*. 26(1):42–54, 2006.
- [19] Nicolás Cervantes-Escorcía, Omar-Jacobo Santos-Sánchez, Liliam Rodríguez-Guerrero, Hugo Romero-Trejo, and Alberto González-Facundo. *Optimal pi and pid temperature controls for a dehydration process. Arabian Journal for Science and Engineering*, pages 1–16, 2018.
- [20] Dufour, P. *Control engineering in drying technology: Review and trends. Drying technologies*, 1(7):889–904, 2006.

-
- [21] Rodríguez-Guerrero, L., Santos-Sánchez, O. J. *Object oriented optimal control for a batch dryer process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(1), 2012.
- [22] Santos-Sánchez, O. J., Rodríguez-Guerrero, L., López-Ortega, O. *Experimental results of a control time delay system using optimal control. Optimal Control Applications and Methods*, 33(1):100–113, 2012.
- [23] Manual de Controlador Lógico Programable S7-1200, Siemens, 06 2015.
- [24] S.P. Canales. *Comunicaciones industriales. Fácil, sencillo y práctico*. Marcombo, 2023.
- [25] Kasuhiko, O. *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación, S.A, 2010.

Apéndice A

Configuraciones

A.1. Código de Arduino para conversión de voltaje a pwm

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>

#define DETECT 2
#define GATE 9
#define PULSE 5
int i=0;

void setup(){

  pinMode(DETECT, INPUT);
  digitalWrite(DETECT, HIGH);
  pinMode(GATE, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);

  OCR1A = 100;
  TIMSK1 = 0x03;
  TCCR1A = 0x00;
  TCCR1B = 0x00;

  attachInterrupt(0, zeroCrossingInterrupt, RISING);
```

A.2. Código de Arduino para conversión de voltaje a pwm

```
void zeroCrossingInterrupt(){
  TCCR1B=0x04;
  TCNT1 = 0;
}

ISR(TIMER1_COMPA_vect){
  digitalWrite(GATE,HIGH);
  TCNT1 = 65536-PULSE;
}

ISR(TIMER1_OVF_vect){
  digitalWrite(GATE,LOW);
  TCCR1B = 0x00;
}

void loop(){

  i=analogRead(A0);
  //i=((i+110)/2);
  i=(-i)/2+511;
  if (i<=78)
  {
    i=78;
  }
  else if (i>55 && i<=484)
  {
    i=i;
```

A.3. Código de Arduino para conversión de voltaje a pwm

```
void loop(){

  i=analogRead(A0);
  //i=((i+110)/2);
  i=((-i)/2)+511;
  if (i<=78)
  {
    i=78;
  }
  else if (i>55 && i<=484)
  {
    i=i;
  }
  else
  {
    i=484;
  }
  Serial.println(i);
  OCR1A = i;

}
```

A.4. Código de LabView respuesta escalón

Código de adquisición de datos, graficación de temperatura y salida de control.

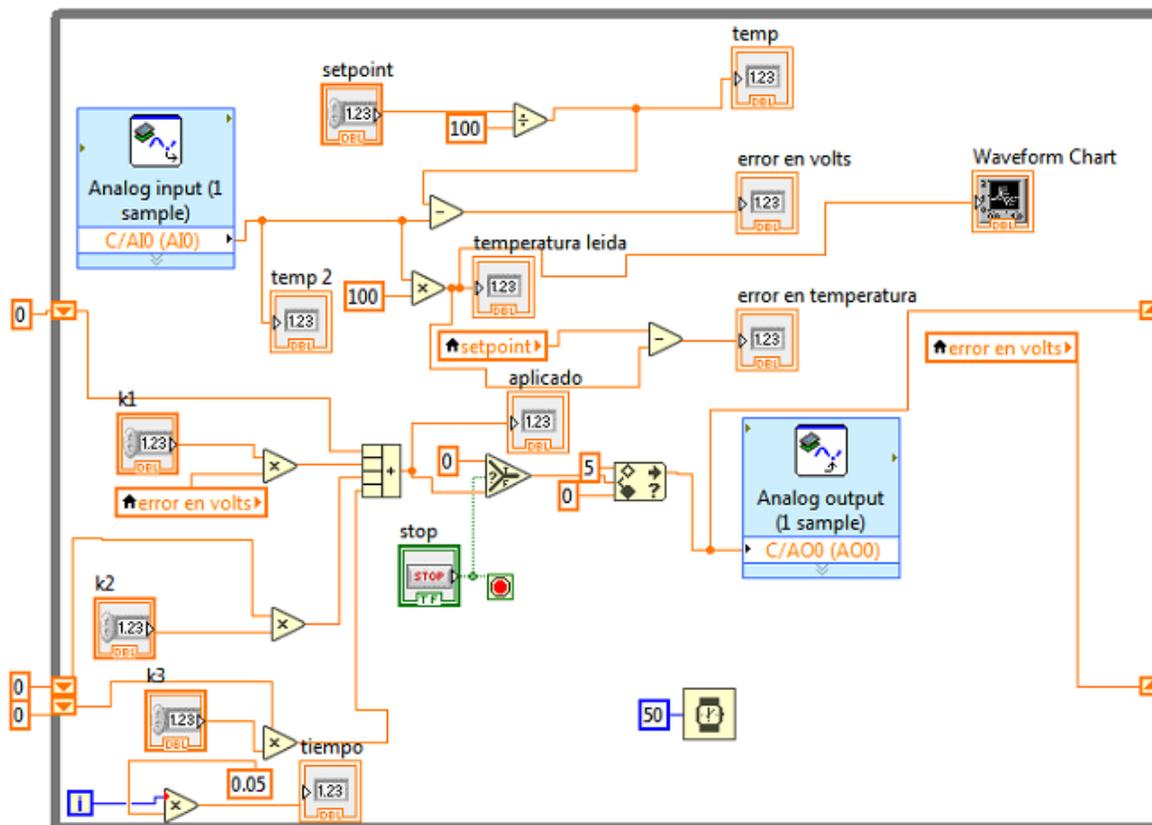


Figura A.1: Programación respuesta escalón

A.5. Código de LabView respuesta PID digital

Código de adquisición de datos, graficación de temperatura y salida de control con programación de PID digital.

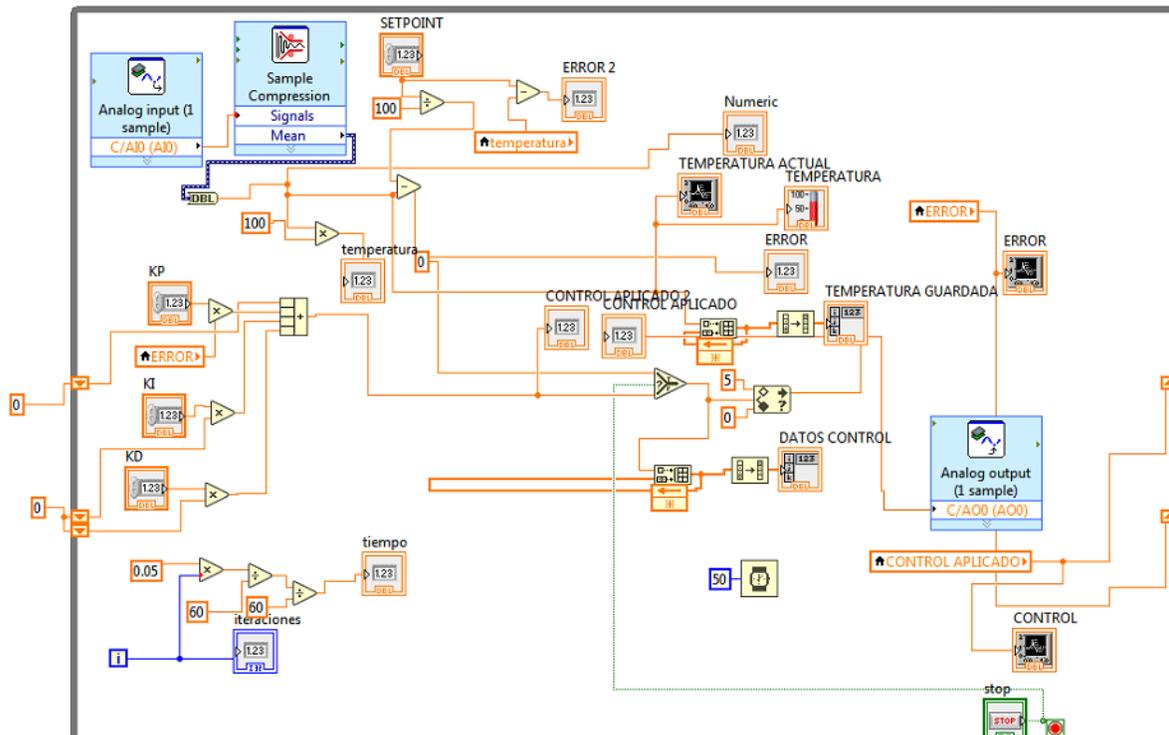


Figura A.2: PID digital

A.6. Documentación TRL

Niveles de maduración tecnológica	Elementos clave	Parámetros esperados al final de la etapa.	Conteste sí o no	Material probatorio para cada pregunta (artículos, tesis, libros, especificar otros) con el siguiente protocolo: TRL1.1, TRL1.2, TRL2.1, TRL2.2, TRL2.3, etc.	
Desarrollo de la invención	1	Investigación básica. Principios básicos observados y reportados. Artículos científicos publicados sobre los principios de la nueva tecnología	¿Finalizó con la investigación básica de su idea?	Si	TRL1.1, TRL1.2, TRL1.3, estos son artículos de congreso y revista, donde se sintetizaron los primeros controladores óptimos y robustos para aplicar a la deshidratadora.
	¿Identificó principios de investigación básica que pudieran trasladarse en principios nuevos que puedan ser utilizados en nuevas tecnologías?	Si	TRL 1.4. En este artículo se reportaron los primeros resultados experimentales en una primera versión de la deshidratadora atmosférica aplicando optimalidad inversa para sistemas no lineales con retardos y el enfoque de funcionales completas, también se estudiaron los posibles ahorros energéticos generados por usar control avanzado y se comparó con el uso de controladores industriales. TRL 1.5, en esta tesis de licenciatura, se estudiaron los materiales a usar en la primera versión de deshidratadora, así como los métodos de sintonización de controladores industriales PID para la regulación del viento de deshidratado, hasta ese momento se habían usado modelos simplificados lineales y no lineales.		
	2	Investigación de Laboratorio. Concepto tecnológico y/o aplicación tecnológica formulada.	¿Realizó un análisis de los artículos científicos, modelos o teorías científicas que respaldan la aplicación de la idea en algún área tecnológica?	Sí	TRL 2.1, en este artículo se realizó un estado del arte, en cual se determina la conveniencia de usar control óptimo para ahorro energético, pero que en deshidratadoras no había sido reportado el uso de control óptimo, ni la monitorización en línea del color del producto, con componentes de bajo costo. Además, en este artículo se reporta por primera vez en la literatura especializada el análisis de nutrientes cuando se usan diferentes esquemas de control óptimo e industrial.
	Investigación aplicada. Publicaciones o referencias que subrayan las aplicaciones de la nueva tecnología. Inicio de la invención.	Realizó estudios de búsqueda y análisis de patentes a nivel nacional e internacional, y los resultados indicaron que no existe un desarrollo igual a su idea? (benck mark tecnológico)	Si	TRL2.2, las patentes halladas no aplican control óptimo a deshidratadoras de alimentos.	
	¿Ha explorado principios básicos de manufacturabilidad?	Si	El prototipo ya fue construido en acero inoxidable de grado alimenticio.		
	¿Ha explorado posibles usuarios de la invención?	Si	Algunos miembros de la SOCIEDAD COOPERATIVA DE PRODUCCIÓN PESQUERA ESTERO MOZAPAN y Río CHIQUITO, AFLUENTES Y ANEXOS, SOCIEDAD DE R.L., Veracruz, han mostrado interés en deshidratar chile y alimento natural para mojarra tilapia, TRL 2.3		
	¿Cuenta con un grupo de investigación que pueda facilitar la evaluación inicial de factibilidad de la tecnología?	Si	Soy líder del Cuerpo académico electrónica y control, y se han involucrado a prácticamente todos los miembros del CA en las publicaciones asociadas al prototipo.		
	¿Tiene contemplado un plan de licenciamiento de tecnología a terceros?	Si	Como una donación de alimento deshidratado para mojarra, ver TRL 2.3		

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Journal of the Franklin Institute xxx (xxxx) xxx

www.elsevier.com/locate/jfranklin

Delays compensation for an atmospheric sliced tomatoes dehydration process via state predictors

Omar-Jacobo Santos-Sánchez^a, Sabine Mondié^b,
Liliam Rodríguez-Guerrero^{a,*}, José-Carlos Carmona-Rosas^c

^a*Autonomous University of Hidalgo State, Mexico*

^b*Department of Automatic Control, CINVESTAV-IPN, Mexico*

^c*Autonomous University of Hidalgo State, Mexico (Master of Science student).*

Received 21 March 2018; received in revised form 17 May 2019; accepted 25 September 2019

Available online xxx

Abstract

In this paper the experimental application of static and dynamic predictors based control of the temperature of a sliced tomatoes dehydration process is presented. The control schemes concerning the case corresponding to the process under consideration, where the state delay is greater than the input delay, are developed. The number of subdivisions in the approximation of the distributed delays of the dynamic predictors by finite sums is chosen to insure loop system stability. The two schemes are experimentally tested, and a comparison of their performance is presented.

© 2019 The Franklin Institute. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

As input delay systems are present in many industrial processes due to phenomena associated with the transport of information, mater or energy, their control have received great attention in the past. Classical techniques have been developed to “compensate” input delays, such as the Smith predictor for stable scalar linear systems, and the predictor based controllers of [1,2], that allow the assignment of a finite spectrum. The instability problem linked to the approximation of the integral terms associated to the predictors revealed in [3,4] have

* Corresponding author.

E-mail address: liliam_rodriguez@uaeh.edu.mx (L. Rodríguez-Guerrero).

<https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.09.036>

0016-0032/© 2019 The Franklin Institute. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Inverse optimality for a class of nonlinear time delay systems: a constructive approach

Lilium Rodríguez-Guerrero, Omar Santos and Sabine Mondié

Abstract—In this contribution, the inverse optimality problem based Control Lyapunov Function (CLF), known for avoiding the solution of the Hamilton Jacobi Bellman (HJB) equation and the determination of the Bellman’s functional, is extended to a class of nonlinear time delay systems. This feature is recovered by combining the CLF framework and Lyapunov-Krasovskii functionals of complete type. The feasibility of the method, which is constructive, is illustrated by considering two processes with transport delays. The simulation results give evidence of the good performance of the proposed controller.

I. INTRODUCTION

Efforts aiming at the solution of the inverse optimality problem for nonlinear time delay systems have been sustained in recent years. In [9], the problem of inverse optimal feedback compensation for linear time invariant systems with delayed input is addressed: a Lyapunov-Krasovskii functional of prescribed form allows the stability proof of the closed loop, the presentation of exponential bounds of the solutions, and the robust stability analysis. For nonlinear time delay systems a solution to the inverse optimality problem is obtained in [17] from apriori chosen Control Lyapunov-Krasovskii Functionals (CLKF), resulting in sufficient conditions for the construction of the optimal control and robustness analysis. Based on the Lyapunov-Krasovskii functional and the Lyapunov-Razumikhin functions, the stabilization problem for nonlinear time delay systems is investigated in [11]. The Lyapunov-Razumikhin approach has been employed in [4], [5] and [6] in conjunction with the CLKF. There, the Sontang’s universal formula [18], [2] allows the construction of the nonlinear controller by proposing first a CLKF.

Having this idea in mind, we propose a constructive method based on Lyapunov-Krasovskii functional, often named of complete type [7], whose advantage is that the derivative has a specific quadratic form, thus allowing the synthesis of the optimal controller, without solving the Bellman equation.

In the past, the synthesis of controllers using complete type functionals have been investigated in [16] where a suboptimal controller for stable systems with pointwise and distributed delay was designed. In [15] a guaranteed cost

control strategy for time delay systems with structured disturbances was proposed. Recently, the case of nonlinear systems with a linear part and unstructured nonlinear disturbances satisfying certain properties was studied in [14], however the complete type functional is not shown to be a CLKF.

The contribution is organized as follows. In section 2, we recall the fundamental concepts of the Lyapunov-Krasovskii complete type functional approach, the definition of CLKF and inverse optimality approach for delay free nonlinear systems. Next, we describe the problem and the class of nonlinear time delay systems under consideration. In section IV-A we find the sufficient conditions which guarantee that the complete type functional is a CLKF. The nonlinear optimal control law is designed in section IV-B. The proposed control scheme is illustrated in section V with two processes and its performance is compared with a PID controller. Some concluding comments end the paper.

Notation: The function $x_t = x(t + \theta)$, $\theta \in [-h, 0]$, is the restriction of the solution. $\mathcal{PC}([-h, 0], \mathbb{R}^n)$ is the space of \mathbb{R}^n -valued continuously functions on $[-h, 0]$ and it is supplied with the standard uniform norm [13]:

$$\|\varphi\|_h = \sup_{\theta \in [-h, 0]} \|\varphi(\theta)\|.$$

II. PRELIMINARIES

A. Complete type functionals

Our proposal is heavily based on the recent results on linear delay systems presented in the monograph [8], in particular those concerning linear state delay systems of the form

$$\dot{x}(t) = A_0x(t) + A_1x(t-h), \quad (1)$$

$$x(t) = \varphi(\theta), \quad \theta \in [-h, 0],$$

where $x(t) \in \mathbb{R}^n$, with initial condition $x_t(\theta) = \varphi(\theta)$, $\theta \in [-h, 0]$, $\varphi \in \mathcal{PC}([-h, 0], \mathbb{R}^n)$, $h > 0$ is the known time delay, and $A_0, A_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$.

A key concept introduced in [7] is the analogue of the Lyapunov matrix for delay systems which is shown to be crucial in the definition of the functional having a prescribed derivative:

Theorem 1: [8] Given three symmetric matrices W_j , $j = 0, 1, 2$, let us define the functional

$$w(\varphi) = \varphi^T(0)W_0\varphi(0) + \varphi^T(-h)W_1\varphi(-h) + \int_{-h}^0 \varphi^T(\theta)W_2\varphi(\theta)d\theta. \quad (2)$$

Partially supported by Conacyt Project 180725.

Lilium Rodríguez-Guerrero is a PhD. student of Departamento de Control Automático, CINVESTAV-IPN. Sabine Mondié is with Departamento de Control Automático, CINVESTAV-IPN, Av. IPN 2508 San Pedro Zacatenco, México, DF 07360. lrodriguez, smondie@ctrl.cinvestav.mx. Omar Santos is with CITIS-ICBI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo km. 4.5, C. U., Pachuca, Hidalgo C. P. 42084, México. osantos@uaeh.edu.mx

Guaranteed cost control using Lyapunov redesign for uncertain linear time delay systems [★]

Liliam Rodríguez-Guerrero ^{*} Sabine Mondié ^{*} Omar Santos-Sánchez ^{**}

^{*} *Departamento de Control Automático, CINVESTAV-IPN. Av. IPN 2508 San Pedro Zacatenco, México, DF 07360, e-mail: lrodriguez, smondie@ctrl.cinvestav.mx*

^{**} *CITIS, AACyE, ICBI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo km. 4.5, C. U., Pachuca, Hidalgo C. P. 42084, México, e-mail: omarj@uaeh.edu.mx*

Abstract: In this contribution, we combine the complete type functional approach with the guaranteed cost control strategy to design an optimal controller that stabilizes the system in closed loop and ensures an upper bound of the cost function. Then with the Lyapunov redesign technique, an additional control component is synthesized to robustify the design to a class of uncertainties that satisfy the matching condition.

Keywords: Lyapunov redesign, linear time delay systems, Lyapunov-Krasovkii functionals of complete type, guaranteed cost control

1. INTRODUCTION

The Lyapunov redesign technique for delay free nonlinear systems has been introduced in Leitmann [1979], Barmish et al. [1983], Corless [1993], where a known Lyapunov function for the nominal system is used for designing an additional control component to robustify the design, for a class of uncertainties. These uncertain terms enter through the same channels as the control variables, a restrictive condition on the uncertainties known as matching condition or min-max design. This technique is also in the text books by Khalil [1996], Spong and Vidyasagar [1989].

For the case of time delay systems, a feedback controller is designed in Thowsen [1983], for a class of nonlinear, time-varying delay system with uncertain terms, which satisfies certain matching conditions. In that work the ultimate boundedness of the solutions is obtained by using Razumikhin-type stability arguments. Some years later, these results were applied to a simplified one-reach model of a river system with time delay [Lee and Leitmann 1988], which was subjected to uncertain but bounded input as well as parameter disturbances.

Finding a Lyapunov function for nonlinear systems is often difficult and even more for those including delays, hence we restrict this work to linear time delay systems with uncertain terms satisfying the matching condition. We use the complete type functional approach proposed in Kharitonov and Zhabko [2003], where the explicit form of a Lyapunov-Krasovskii functional of complete type is presented. Moreover, its existence is guaranteed when the nominal system is stable, and the time derivative along the solutions of the stable nominal linear system has a prescribed form. Using this class of functionals provides us with a constructive method because we can obtain explicit formulas of the controllers. We take a complete type functional $V(x_t)$ as a Lyapunov-Krasovskii functional for the nominal system, then we design a controller of the form

$v = v_1(x_t) + v_2(x_t)$ for the uncertain time delay system. The first control term is synthesized by using the guaranteed cost control strategy for time delay systems introduced in Esfahani et al. [1998], but we work in the framework of the complete type functional as in Santos and Mondié [2007], where an optimal controller is presented and an upper bound for the cost function is ensured. For the second controller, according to the ideas in Khalil [1996], we apply the Lyapunov redesign technique to cancel the effect of the uncertainty.

The contribution is organized as follows. In Section 2, we briefly remind the Lyapunov redesign technique for delay free nonlinear systems and the fundamental ideas of the Lyapunov-Krasovskii complete type functional approach. In Section 3, we formulate the problem and we describe the class of uncertain time delay systems under consideration. The guaranteed cost control strategy is presented in Section 4, where an optimal controller is applied that enables us to have a guaranteed upper bound of the cost function. Next, the Lyapunov redesign technique provides a controller that compensates the effect of the uncertainty. Simulation results are presented in Section 5. Finally, the conclusions are discussed in Section 6.

Notation: The function $x_t = x(t + \theta)$, $\theta \in [-h, 0]$, is the restriction of the solution. $\mathcal{PC}([-h, 0], \mathbb{R}^n)$ is the space of piecewise \mathbb{R}^n -valued continuous functions on $[-h, 0]$ and it is supplied with the standard uniform norm [Rudin 1973]

$$\|\varphi\|_h = \sup_{\theta \in [-h, 0]} \|\varphi(\theta)\|.$$

2. PRELIMINARIES

In this section, we recall the Lyapunov redesign technique for delay free nonlinear systems presented in Khalil [1996] and the complete type functionals approach.

2.1 Lyapunov redesign technique for nonlinear systems

Consider the system

[★] Partially supported by Conacyt Projects 239371 and 180725



A constructive approach for an optimal control applied to a class of nonlinear time delay systems



Liliam Rodríguez-Guerrero^a, Omar Santos-Sánchez^{b,*}, Sabine Mondié^{c,1}

^a Departamento de Control Automático, CINVESTAV-IPN, Mexico

^b CITIS, AACyE, ICBI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo km. 4.5, C. U., Pachuca, Hidalgo C. P. 42084, Mexico

^c Departamento de Control Automático, CINVESTAV-IPN, Av. IPN 2508 San Pedro Zacatenco, México, DF 07360, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 November 2014

Received in revised form 18 August 2015

Accepted 19 January 2016

Keywords:

Inverse optimality

Optimal nonlinear control

Time-delay systems

Industrial PID controller

ABSTRACT

In this contribution, we obtain a nonlinear controller for a class of nonlinear time delay systems, by using the inverse optimality approach. We avoid the solution of the Hamilton Jacobi Bellman type equation and the determination of the Bellman's functional by extending the inverse optimality approach for delay free nonlinear systems to time delay nonlinear systems. This is achieved by combining the Control Lyapunov Function framework and Lyapunov-Krasovskii functionals of complete type. Explicit formulas for an optimal control are obtained. The efficiency of the proposed method is illustrated via experimental results applied to a dehydration process whose model includes a delayed state linear part and a delayed nonlinear part. To give evidence of the good performance of the proposed control law, experimental comparison against an industrial Proportional Integral Derivative controller and optimal linear controller. Additionally experimental robustness tests are presented.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

In the inverse optimality approach [1] for delay free nonlinear systems, the existence of a Control Lyapunov Function (CLF) [2] is instrumental in obtaining the optimal control. If the CLF is known, an assumption which is not always fulfilled, it can be used as a Bellman function to obtain explicit formulas of the nonlinear controller, thus avoiding the solution of the Hamilton Jacobi Bellman equation (HJB).

For time delay systems, the inverse optimality problem has been studied in a number of contributions. In [3], a feedback compensation for linear time invariant systems with delayed input is presented by using a Lyapunov-Krasovskii functional of prescribed form. In [4], the assumption of the existence of a Control Lyapunov-Krasovskii Functional (CLKF) is made and a solution to the inverse optimality problem is found, leading in some cases to the construction of stabilizing control laws of explicit form. Lyapunov-Krasovskii functionals and Lyapunov-Razumikhin functions are also used in the stabilization problem of nonlinear time delay systems, see [5–7].

More recently, complete type functionals [8], whose form is known whenever the nominal linear time delay system is stable, have been successfully used for synthesizing controllers. In [9], a suboptimal controller for stable linear systems with pointwise and distributed delays is designed. A guaranteed cost control strategy is proposed for the cases of linear time delay systems with structured disturbances in [10], and of a class of nonlinear systems in [11].

In view of the above ideas, it seems natural to use complete type functionals in the inverse optimality approach. We consider here nonlinear time delay systems that consist of a linear part which is exponentially stable and nonlinear disturbances satisfying a Lipschitz condition. The first step is to find the sufficient condition under which the complete type functional is a CLKF and the second is to extend the delay free inverse optimality approach. As a consequence, we find the optimal controller that minimizes a performance index in the sense of inverse optimality, without solving a Bellman type equation.

The obtained controller is experimentally tested on an open loop stable dehydration prototype. The nonlinearities in the model are represented by a polynomial equation that depends on the process variables [12]. It is compared with an industrial Proportional Integral Derivative (PID) controller, in terms of power consumption. Notice that in the industry of developed countries, drying is an energy intensive

* Corresponding author. Tel.: +52 771 7172000x6734; fax: +52 77172000x2169.

E-mail addresses: lrodriguez@ctrl.cinvestav.mx (L. Rodríguez-Guerrero), omarj@uaeh.edu.mx (O. Santos-Sánchez), smondie@ctrl.cinvestav.mx (S. Mondié).

¹ Tel.: +52 5557474020.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIA BÁSICAS E INGENIERÍA



INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA
Y TELECOMUNICACIONES

CONTROL PID DE UNA DESHIDRATADORA ATMOSFÉRICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIADO EN
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

JORGE MANUEL ORTEGA MARTÍNEZ

ASESOR:

DR. OMAR JACOBO SANTOS SÁNCHEZ

MINERAL DE LA REFORMA HGO., MÉXICO JUNIO 2014.

On the effects of the temperature control at the performance of a dehydration process: energy optimization and nutrients retention

Norma-Francenia Santos-Sánchez¹ · Raúl Salas-Coronado¹ · Omar-Jacobo Santos-Sánchez^{2,4} · Hugo Romero² · Erick Garrido-Aranda³

Received: 23 October 2015 / Accepted: 1 February 2016 / Published online: 10 February 2016
© Springer-Verlag London 2016

Abstract In this article, we study the effects of the temperature control on a dehydration tomato slices process when two control strategies are considered: PID controller and optimal linear control when inherent input time delay is considered. The first controller is tuned by D-partitions method and a numerical procedure in order to minimize a quadratic performance index, the second one considers a state predictor to compensate the effects of the input delayed. The energy savings and the intrinsic characteristics in the tomato slices (vitamin C, total phenols, and lycopene levels) are quantified in order to conclude advantages of the two controllers under study.

Keywords Dehydration process · Energy savings · Nutrients retention · Optimal control · Industrial PID

1 Introduction

The dehydration of the fruits and vegetables is a process consuming a high quantity of energy, in fact, around 10–25 % of energy consumption into industry is linked with dehydration processes [5]. As it is exposed in Dufour [5] and Haley [8], optimal control strategies could be the best option in order to drive the temperature of the drying chamber. This issue has been dealt in Ryniecki [18], where an optimization procedure for a dehydration process was applied on an atmospheric dryer, it has produced a significant reduction of the energy consumption rate and consequently the production cost was reduced around 34 %. The Proportional Integral Derivative (PID) controller is considered in this work, because as it was exposed in Astrom [2], 90 % of the industrial control loops are regulated by these controllers and 20 % of these controllers are tuned and used with the default factory gains, without applying any kind of optimization technique, then the obtained results are very conservatives and with great opportunity to be improved, including those applied in dehydration processes.

Another important issue in dehydration process is that the quality of product can be affected by temperature changes and velocity deviations of the hot air flow [11]. Then, two important topics could be addressed in the dehydration processes: the operation cost related with energy consumption and the quality of the product (retention nutrients and color).

In that sense, some works had been reported about the optimization of the energetic efficiency and retention of nutrients in dried fruits and vegetables, see, for example, Jin [9] and Olmos [15], where an optimization approach is

✉ Omar-Jacobo Santos-Sánchez
omarj@uaeh.edu.mx

Norma-Francenia Santos-Sánchez
nsantos@mixteco.utm.mx

Raúl Salas-Coronado
rsalas@mixteco.utm.mx

Hugo Romero
rhugo@uaeh.edu.mx

Erick Garrido-Aranda
erick.garrido@mytec.com.mx

¹ Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, Mexico

² CITIS-ICBI-Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Hidalgo, Mexico

³ MYTEC, Querétaro, Mexico

⁴ Ciudad del Conocimiento, Carretera a Tulancingo km. 4.5, CITIS-ICBI-UAEH, C.P. 04280, Mineral de la Reforma, Hidalgo, Mexico

Lista de patentes nacionales e internacionales relacionadas con el prototipo de deshidratadora construida.

Drying apparatus and methods and accessories for use therewith, US20100115785A1 United States.

Dry food pasteurization apparatus and method, US8707861B2 United States

Continuous drying system, US6079118A United States

Control apparatus, humidity calculation method, and control method, JP2015164844A Japan.

Device and method for preparation of food ingredients due to hot air and fluid medium supplied thereto, RU2698745C1 Russia.

Thermal measurement and process control, US9366580B2 United States.

Method to control a freeze drying process, ES2387071T3 Spain.

Drying process and apparatus, KR20070047239A South Korea,

Drying apparatus and methods, US20120168093A1, United States

The optimal control in the power plant with Air-cooled Condenser, CN104570743B China,

Optimized control system for cooling systems, US8406929B2, United States

Todas estas patentes, tienen en común que no aplican control óptimo para deshidratar alimentos, para retener nutrientes.

A quien corresponda

Por medio de la presente se hace constar que el **C. Jorge Martínez Bautista**, presidente de la **SOCIEDAD COOPERATIVA DE PRODUCCIÓN PESQUERA ESTERO MOZAPAN Y RÍO CHIQUITO, AFLUENTES Y ANEXOS, SOCIEDAD DE R.L.**, autoriza que el socio, Jorge Reyes Damián, realice pruebas con el alimento natural producido en la investigación estrictamente académica **Producción a pequeña escala de alimento natural para mojarra tilapia**. A dicho alimento natural se le realizarán todas las pruebas basadas en las normas oficiales mexicanas NMX-Y-013-1998-SCFI y NOM-242-SSA1-2009, para cumplir la seguridad requerida. En esta investigación se involucran los siguientes profesores investigadores:

Dr. Omar Jacobo Santos Sánchez (Responsable del proyecto), Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

M. en A. Rosa Irene Rojas Rauda, Instituto Tecnológico de Pachuca, TecNM

Dr. Carlos Cuvas Castillo, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Dr. Jesús Patricio Ordaz Oliver, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Dr. Hugo Romero Trejo, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Dr. Liliam Rodríguez Guerrero, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Dr. Pablo López Pérez, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Dr. Félix Agustín Castro Espinoza, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Dr. Manuel Alejandro Jiménez Lizárraga, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Dra. Sabine Mondié Cuzange, Departamento de Control Automático, CINVESTAV, IPN.

Cabe señalar que la firma de este documento no obliga a ninguna de las partes a la compra o venta de dicho alimento, y que es solo para fines de investigación y pruebas de campo. El producto será una donación de los participantes del proyecto al socio mencionado arriba, por lo que no le implicará ningún costo. Esta investigación se enmarca en el Problema Nacional Estratégico, delineado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Soberanía Alimentaria.

Sin más por el momento, me despido de usted, agradeciendo de antemano la atención a la presente.



C. Jorge Martínez Bautista

Presidente de la Cooperati

Firma y sello

Jorge Reyes Damián

Socio de la cooperativa

Dr. Omar Jacobo Santos Sánchez

Responsable de la investigación



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE HIDALGO



INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y SISTEMAS

PROYECTO CONACYT CIENCIA BÁSICA, 239371

REPORTE TÉCNICO DE LA CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN DEL
PROTOTIPO DE DESHIDRATADORA

R E P O R T E
TECNICO UAEH

·
DR. OMAR JACOBO SANTOS SÁNCHEZ

:
REPORTE
TÉCNICO

PACHUCA HGO., MÉXICO 14 DE JUNIO DE 2020

A.7. Herramientas computacionales

A.7.1. Matlab

Matlab figura fig. A.3 es el nombre abreviado de “MATriz LABoratory”. Es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices, y por tanto se puede trabajar también con números escalares (tanto reales como complejos), con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas. Matlab es un lenguaje de alto rendimiento para cálculos técnicos, es al mismo tiempo un entorno y un lenguaje de programación. Uno de sus puntos fuertes es que permite construir nuestras propias herramientas reutilizables. Podemos crear fácilmente nuestras propias funciones y programas especiales (conocidos como M-archivos) en código Matlab, los podemos agrupar en Toolbox (también llamadas librerías): colección especializada de M-archivos para trabajar en clases particulares de problemas. Matlab, aparte del cálculo matricial y álgebra lineal, también puede manejar polinomios, funciones, ecuaciones diferenciales ordinarias, gráficos. Una de las librerías que se emplea de Matlab es la de Simulink que es una aplicación que permite construir y simular modelos de sistemas físicos y sistemas de control mediante diagramas de bloques. El comportamiento de dichos sistemas se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab y señales predefinidas de todo tipo. Simulink dispone de una serie de utilidades que facilitan la visualización, análisis y guardado de los resultados de simulación.



Figura A.3: Software Matlab.

A.7.2. LabView

LabVIEW figura fig. A.4 (acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico pensado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido.



Figura A.4: Software LabView.

A.7.3. TIA Portal

TIA portal figura A.5 es un sistema de ingeniería que permite configurar de forma intuitiva y eficiente todos los procesos de planificación y producción. Conviene por su funcionalidad probada y por ofrecer un entorno de ingeniería unificado para todas las tareas de control, visualización y accionamiento.



Figura A.5: Software TIA Portal.



Mineral de la Reforma Hgo., a 07 de agosto del 2020

Número de control: ICBI-AACyE/699/2020

Asunto: Constancia

M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MÉDECIGO
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

La que suscribe, Dra. Liliam Rodríguez Guerrero, coordinadora de la Maestría en Ciencias en Automatización y Control, hace constar que el Ing. José Carlos Carmona Rosas cursó el programa educativo antes mencionado y del cual desarrollo el tema de tesis denominado "Instrumentación y diseño de un sistema de monitoreo y control de un proceso de temperatura", mismo que presentó los avances en el siguiente artículo:

Santos-Sánchez, O. J., Mondié, S., Rodríguez-Guerrero, L., & **Carmona-Rosas, J. C.** (2019). Delays compensation for an atmospheric sliced tomatoes dehydration process via state predictors. *Journal of the Franklin Institute*, 356(18), 11473-11491.

La evidencia a la que se refiere dicha presentación, se encuentra anexa a esta constancia.

Sin más por el momento quedo a sus apreciables órdenes.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dra. Liliam Rodríguez Guerrero
Coordinadora de la Maestría en
Ciencias en Automatización y Control



Dr. Hugo Romero Trejo
Jefe del Área Académica de
Computación y Electrónica
Vo. Bo.

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval
Director del ICBI
Vo. Bo.

LRG/APL

Ciudad del Conocimiento
Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia
Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P. 42184
Teléfono: +52 (771) 71 720 00 ext. 2250, 2251
Fax 2109
aacye_icbi@uaeh.edu.mx



www.uaeh.edu.mx



Tesis José Carlos Carmona Rosas

17%
Textos sospechosos



14% Similitudes
0% similitudes entre comillas
0% entre las fuentes mencionadas
5% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: Tesis José Carlos Carmona Rosas.pdf
ID del documento: 5bcd4d5aed6a6b73e63d16256a62dbed9e87ffa
Tamaño del documento original: 8,48 MB

Depositante: Manuel Pineda
Fecha de depósito: 9/2/2024
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 9/2/2024

Número de palabras: 18.390
Número de caracteres: 107.741

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	ru.dgb.unam.mx https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000705125/3/0705125.pdf 98 fuentes similares	5%		Palabras idénticas: 5% (2089 palabras)
2	ru.dgb.unam.mx https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000712636/3/0712636.pdf 98 fuentes similares	5%		Palabras idénticas: 5% (2015 palabras)
3	www.uaeh.edu.mx https://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/Robot cartesiano seguimiento... 98 fuentes similares	4%		Palabras idénticas: 4% (1948 palabras)
4	repositorio.espe.edu.ec https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5345/1/T-ESPE-033277.pdf 98 fuentes similares	4%		Palabras idénticas: 4% (1884 palabras)
5	repositorio.unican.es https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/10902/24252/1/Tesis BDP.pdf 98 fuentes similares	4%		Palabras idénticas: 4% (1899 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	portal.amelica.org http://portal.amelica.org/amei/journal/595/5953117012/5953117012.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (29 palabras)
2	upcommons.upc.edu https://upcommons.upc.edu/bitstream/2117/76390/2/FL_2295.PDF	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (25 palabras)
3	Documento de otro usuario #a34a1d El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (22 palabras)
4	us.profinet.com Profinet – PI Norte América https://us.profinet.com/tecnologia/profinet-es/	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (18 palabras)
5	doi.org https://doi.org/10.5120/18746-9999	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (20 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

- <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.09.036>
- <http://dx.doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.01.003>