

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

“Estrategia de control en cascada para un lazo de temperatura del secador de bioproductos del CIGB de Camagüey.”

Autor: Julio Cesar Filgueira Pons

Tutores: Msc. Orlando Regalón Anias

Ing. Leisis López Rodríguez

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución."

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

“Estrategia de control en cascada para un lazo de temperatura del secador de bioproductos del CIGB de Camagüey.”

Autor: Julio Cesar Filgueira Pons

E-mail: jfilgueira@uclv.cu

Tutores: Msc. Orlando Regalón Anias

E-mail: orlando.regalon@reduc.edu.cu

Ing. Leisis López Rodríguez

E-mail: leisis.lopez@reduc.edu.cu

2016

"Año 58 de la Revolución."



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

El éxito en la vida consiste en seguir siempre adelante.

Samuel Johnson

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo incondicional, afecto y comprensión,

A mi familia por respaldarme en todo momento.

A mi novia por ser parte indisoluble de mi vida.

A los que creyeron en mí.

Gracias a todos por formar parte de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Ailán, Carlos, Rogelio, Dughman, Julio Zuñala, Juanca, por apoyarme siempre.

A mis colegas de la carrera.

A los que ya no están.

A mis tutores por su ayuda incondicional

Al personal del CIGB y de la universidad de Camagüey.

A los profesores de la FIE.

A todos, Gracias

RESUMEN

En el Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey se cuenta con un secador de bioproductos. Este equipo ha sido objeto de automatización en tesis desarrolladas en años anteriores. En dichos trabajos se logró automatizar las secuencias de arranque, emergencia y parada, así como cinco lazos dinámicos. Uno de estos lazos es el de temperatura del aire de entrada y para su control se manipula la posición de una servoválvula. El desempeño actual de este lazo tiene un comportamiento oscilatorio con un rango de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ en estado estable. En este trabajo se propone modificar el esquema de regulación implementando un control en cascada con un lazo interno de posición de la servoválvula. Para conseguir mayor exactitud en el control se programa un regulador PID que entre otras posibilidades admite tiempo de muestreo mayor de diez segundos. Se valida el funcionamiento práctico del nuevo esquema de control.

Contenido

PENSAMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	vii
INTRODUCCIÓN.....	10
Objetivo General:	11
Objetivos Específicos:	11
Organización del informe:	12
Capítulo 1. Aspectos Teóricos.	13
Aspectos Teóricos	13
Descripción del lazo de temperatura de aire de entrada:	13
Justificación del trabajo:	13
Solución al problema	14
Secado por atomización	14
La automatización de los procesos de secado:	16
Estado del proceso de secado en el Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología (CIGB) de Camagüey.	17
Modos de operación:	18
Procesos de temperatura:	19
Sistemas de control:	20
Control de relación:	21
Control anticipatorio (feedforward):	22
Control cascada:	22
Estructura:	23
Ventajas del control en cascada:	24
Limitaciones de aplicación del control en cascada:	24
Diseño de Control en Cascada:	25
Sintonía de controladores	26
Comparación con control por realimentación:	27

Ejemplo de sistemas de control de cascada	30
Reguladores PID del PLC Masterk-120S	33
Significado de los parámetros de los controladores del PLC MasterK-120S	33
Ajuste de los reguladores:	34
Capítulo 2: Herramientas y Métodos.....	37
La secuencia pseudoaleatoria binaria.	37
Servoválvula:	42
Control de la servoválvula:	44
Propuesta de control de la servoválvula:	46
Subrutina del PID:	51
Capítulo 3. Análisis de los Resultados.....	55
Desempeño del lazo de temperatura en el arranque.	55
Desempeño del lazo de temperatura ante disturbios.	56
Desempeño del lazo de temperatura en estado estable.	58
Supervisión, control y adquisición de datos	59
Consideraciones generales:	60
Conclusiones y Recomendaciones	62
Bibliografía:	64
Anexo 2. Pizarra de control del secador	67
Anexo 3. Subrutina del PID programado.	67
Anexo 4. Mímico del Eros. Secador de bioproductos del CIGB	70

INTRODUCCIÓN

La automatización ha llegado a niveles nunca esperados por los hombres. Con el de cursar de los años se han perfeccionado y renovado las tecnologías para el control de procesos; dejando en las máquinas el mando de las industrias y poniendo al hombre en un segundo plano. Con el empleo de la automática en el sector industrial es notable la humanización del trabajo y la mejoría del desempeño de los procesos; dígase optimización de las líneas de producción, mayor calidad del producto final y mejor aprovechamiento de las materias primas.

Una de las técnicas más conocidas y utilizadas en la automatización industrial es el control en cascada empleada con el fin de mejorar el desempeño del control que se logra por medio del control por realimentación simple. El control en cascada es un sistema de control más elaborado, donde la idea básica es realimentar variables intermedias entre el punto donde entra la perturbación y la salida. El control en cascada se utiliza principalmente para eliminar el efecto de perturbaciones en la variable manipulada y mejorar las características dinámicas de lazos de control en procesos compuestos por subprocesos.

El Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología (CIGB) de Camagüey se encarga de la creación, desarrollo, fabricación y comercialización de varios bioproductos destinados a la esfera agropecuaria. Uno de ellos está destinado a combatir los fitonemátodos *Meloidogyne* spp, *Radopholus similis* y *Pratylenchus* spp., que causan grandes daños en la agricultura.

Dichos bioproductos se comercializan en forma de suspensión líquida y de manera sólida, cuya constitución final es en forma de polvo. La necesidad de la obtención de bioproductos en fase sólida está sustentada en dos razones. La primera es incrementar la viabilidad de los microorganismos. La otra es reducir los costos de

almacenaje y transportación, aspecto muy importante para su comercialización en el extranjero.

La necesidad de este trabajo es debido a que el secador es una planta compleja con años de explotación y a pesar de ser sometido a un proceso de automatización, los valores de algunas variables controladas; como es el caso de la temperatura de aire de entrada, aún presentan desviaciones que afectan la viabilidad de los microorganismos. Corregir el funcionamiento del lazo de temperatura de aire de entrada ayudaría a mejorar el desempeño de operación del secador y la calidad de su producto final. Este trabajo tributa a otra investigación que tiene dentro de sus metas identificar un modelo que describa de manera más fiable y exacta el desempeño del secador. Es evidente que la temperatura de entrada y la de salida del secador están estrechamente relacionadas, la contribución de este trabajo a la obtención del modelo estaría dada en mejorar el desempeño de la temperatura de entrada, de manera que esta variable se mantuviera constante en el valor deseado permitiendo esto experimentar con la temperatura de salida.

Por lo antes expuesto, se plantean los siguientes objetivos para la realización de este trabajo:

Objetivo General:

Implementar un control en el lazo de temperatura de entrada del secador de bioproductos del CIGB de Camagüey empleando la estrategia de control en cascada.

Objetivos Específicos:

- Mostrar los aspectos fundamentales del control en cascada.
- Diseñar el control de posición de la servoválvula.
- Proponer una estrategia de control en cascada de temperatura de entrada con un lazo interno de posición en la servoválvula.
- Validar mediante simulación la estrategia de control propuesta.
- Validar la implementación práctica de la estrategia de control propuesta.

- Analizar los resultados obtenidos.
- Redactar el informe.

Organización del informe:

El presente trabajo constará de tres capítulos:

En el capítulo número uno: “Revisión Bibliográfica”; se ofrece una breve descripción del funcionamiento del secador, se dará a conocer el problema a resolver y una justificación de la realización del trabajo. Además, se abordarán los principales conceptos que serán tratados en la investigación.

En el capítulo número dos: “Herramientas y Métodos”; se conocerán las herramientas empleadas para la confección del trabajo, exponiendo sus características y ventajas. Además se explicará cómo fueron llevadas a cabo cada una de las tareas técnicas.

En el capítulo número tres: “Resultados”, quedarán expuestos los resultados del trabajo; haciendo una comparación del desempeño del secador antes y después de implementar el control en cascada.

Capítulo 1. Aspectos Teóricos.

En el presente capítulo se realizará una breve descripción acerca del funcionamiento del secador de bioproductos del CIGB de Camagüey, además se expondrá la justificación para la realización del trabajo. También se darán a conocer aspectos esenciales sobre el control en cascada; definición, estructura, ventajas y limitaciones e implementación.

Aspectos Teóricos

Los elementos que serán abordados, son indispensables para comprender la importancia de este trabajo.

Descripción del lazo de temperatura de aire de entrada:

La crema que entra al secador constituye la materia prima básica del producto final. El aire que entra al secador se pone en contacto con el producto atomizado y secado del mismo. La temperatura con que entra dicho aire a la cámara de secado depende de la servoválvula Crouzet 82475 de alimentación de gas licuado de petróleo (GLP) del calentador. El valor nominal de la temperatura de entrada es de 130°C para que el producto final quede con los requisitos establecidos.

Justificación del trabajo:

En Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología (CIGB) de Camagüey se realiza el proceso de creación, desarrollo, fabricación y comercialización de varios productos destinados a la esfera agropecuaria. Estos productos son de suma importancia para combatir bacterias que ocasionan grandes daños a los cultivos, de allí que el producto final deba quedar con la mejor calidad posible.

En trabajos realizados en años anteriores secador fue sometido a un proceso de automatización, pero aún persisten desviaciones en algunas variables controladas

como la temperatura de aire de entrada que afectan la viabilidad de los microorganismos. En el caso específico de la temperatura de aire de entrada a la cámara de secado se aprecian oscilaciones sostenidas con una amplitud pico de 2.5°C, este comportamiento afecta la viabilidad de los microorganismos y el funcionamiento general del secador, por lo que el desempeño del lazo de temperatura de aire de entrada debe ser corregido y optimizado. Este trabajo traerá consigo mejoras en el funcionamiento del secador y en la calidad de su producto final. Por otro parte constituirá un paso de avance en la obtención del modelo matemático de la planta en general.

Solución al problema

La situación del problema que se presenta es cómo mejorar el desempeño del lazo de temperatura de aire de entrada a través de una estrategia de control en cascada.

Para ello se propone la implementación de una estrategia de control en cascada con la temperatura de aire de entrada como lazo primario o externo y la posición de la servoválvula como lazo secundario o interno, con dicha estrategia se mejoraría el desempeño de este lazo de temperatura. Este trabajo parte de la automatización del proceso de secado que llevaron a cabo estudiantes de la Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”, como parte de su proyecto de tesis, en el año 2013.

Secado por atomización

El secado por atomización es un proceso predominante en la industria láctea, y puede ser utilizado para producir grandes cantidades de ingredientes lácteos, a un costo relativamente bajo comparado con la liofilización (MORGAN, 2006). El secado por atomización produce polvos secos granulados a partir de una crema o suspensión pastosa, este proceso implica la atomización de la crema hacia el interior de una cámara de secado. El aire en el interior de la cámara es inyectado a alta velocidad y a una temperatura de hasta 200°C, llamada temperatura de entrada. Las pequeñas gotas que se forman durante la atomización de la crema son secadas de manera rápida al contacto directo con el aire caliente, formándose partículas o

gránulos de polvo que alcanzan la temperatura final o temperatura de salida. Este proceso es generalmente usado para polímeros, sales inorgánicas, pigmentos y algunos productos alimenticios como la leche, el suero de leche, y la harina de maíz (Orlando Regalón Anias et al., 2015) y (R. P. Patel, 2009)

A pesar de la variedad de diseños de secadores existentes, cada uno de ellos contiene equipo estandarizado, que puede ser clasificado en cuatro categorías (Guzmán, 2002):

- a. Calentamiento del aire para el secado; mediante calentadores de aire, con sus ventiladores, filtros, compuertas y ductos.
- b. Atomización de la mezcla producto/agua en el secador por aspersión; el atomizador con el sistema de alimentación de bombas, tanques y equipo de pre-tratamiento.
- c. Contacto del aire con el producto atomizado y secado del mismo; cámara de secado con el dispersador de aire y ductos de salida para el producto y el aire de la cámara.
- d. Recuperación del producto secado; sistema completo de recuperación y descarga del producto, transporte y empaque. Sistema de salida del aire con ventiladores, compuertas y ductos.

El paso del aire y de producto en el secador por aspersión es mostrado en la figura 1.1.

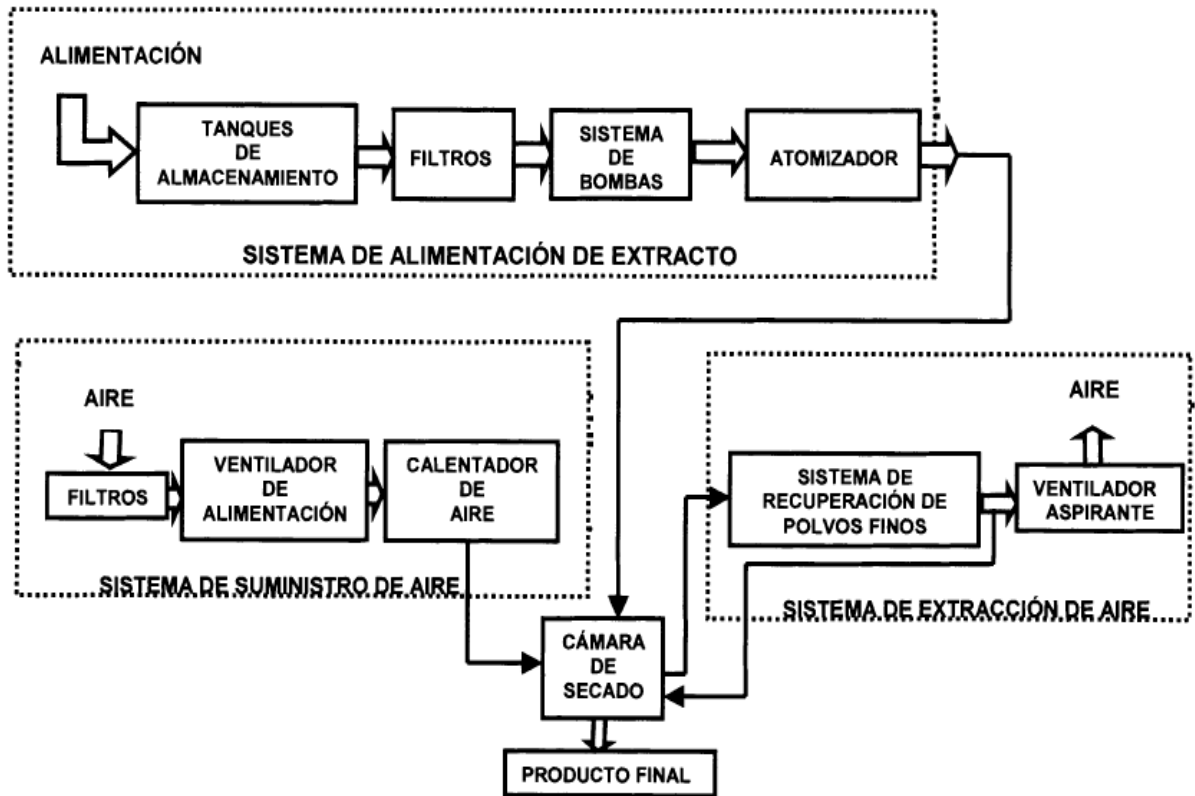


Figura 1.1 Diagrama del funcionamiento del secador.

La automatización de los procesos de secado:

Para la solución de estos problemas en el mundo se emplea la automatización usando PLC's (Controlador Lógico Programable) que mediante un SCADA (Supervision Control and Data Adquisition) o HMI (Human Machine Interface) posibilita la lectura, procesamiento y almacenamiento de información proveniente de los sensores y a partir de estos se toman decisiones sobre los actuadores en tiempo real.

En la industria tabacalera estos sistemas son muy usados, ejemplo de ello es el proyecto SCADA para la producción de tabaco que emplea un PLC Siemens y como software el Labview (Venturini ,2002).

En Ecuador Guamán y Boas (2002) presentan la automatización del proceso de secado por aspersión en la fabricación de café instantáneo empleando un Micro PLC TM-90 y una HMI Intouch. Borrego y Fernández (2008) utilizan un PLC DL06DR1 para la automatización de un horno de secado y envejecido de arroz.

Estado del proceso de secado en el Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología (CIGB) de Camagüey.

El CIGB cuenta con un secador por aspersión, marca Anhydro, modelo Compact, fabricado en la década del 70, el que inicialmente se concibió para la obtención de productos alimenticios en polvo. En su operación es muy importante la regulación de las temperaturas de entrada y salida del aire (Orlando Regalón Anias et al., 2015).

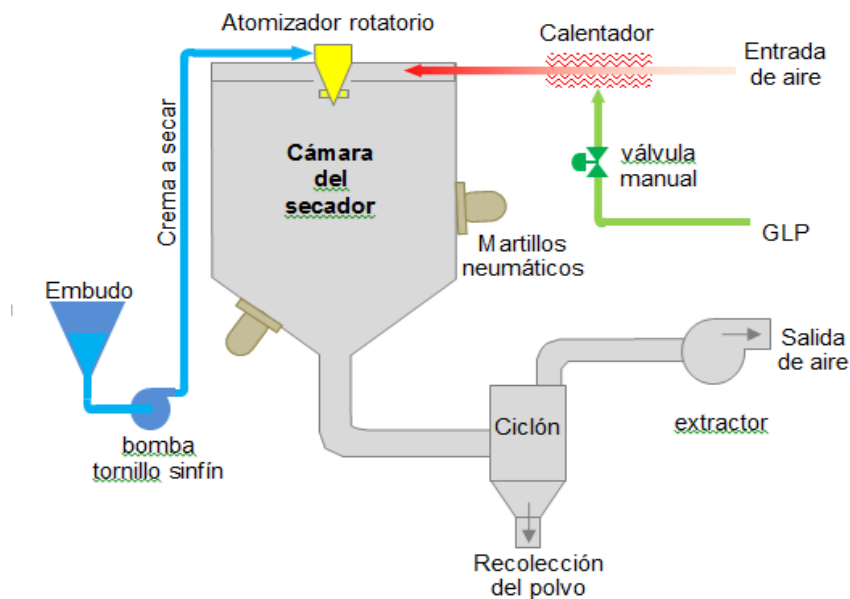


Figura 1.2. Secador del CIGB de Camagüey

Modos de operación:

El secador consta con tres modos de operación: automático, manual y limpieza (Josué García Parrado, 2013).

Modo automático

Este modo posibilita la entrada de cada uno de los lazos de control de forma automática. El operario dispone de un botón de arranque para comenzar la secuencia automática y un botón de parada para detener el proceso cuando se estime conveniente.

1. Secuencia de arranque
2. Lazo de control de temperatura de entrada
3. Después de 30 minutos con la temperatura de salida en más de 100 grados, entra el lazo de control del atomizador.
4. Cuando la velocidad del atomizador sobrepasa las 23 000 rpm se activa la bomba peristáltica con el lazo de nivel y el lazo de control del Baño María.
5. Al activarse el límite superior del embudo entra el lazo de control de la bomba de tornillo sinfín que regula la temperatura de salida.
6. Cuando se alcanzan los valores requeridos de temperatura de entrada, temperatura de salida, velocidad de atomizador y temperatura de la crema, se activan las luces de la cámara de secado y los martillos, además, la sirena emite una alarma corta de dos segundos indicando al operario que todas las condiciones están creadas para la entrada de la crema.

Modo manual

Este modo de operación solo difiere del automático, en que el operario activa cada uno de los dispositivos y lazos de control cuando este lo estime conveniente.

Modo de limpieza

El modo de limpieza es usado después de concluir el proceso. Este permite desprender de las paredes de la cámara de secado y los conductos, el polvo excedente. Solamente se activa el lazo del atomizador a una velocidad de 15000 rpm, la bomba de tonillo sinfín y la bomba peristáltica.

Procesos de temperatura:

La temperatura es una medida de la energía cinética de los átomos o moléculas que constituyen un sistema material cualquiera. Su medida se realiza a través de los cambios que experimentan algunas magnitudes físicas, cuando los cuerpos son sometidos a intercambios de energía térmica. Ejemplos, de estas magnitudes son: el volumen, la presión, resistencia eléctrica, y muchas otras que han dado lugar a diferentes formas de medir la temperatura.

En términos muy generales y aproximados, se puede decir, que la temperatura es una magnitud proporcional a la energía cinética promedio que tienen las partículas, átomos o moléculas, que constituyen un cuerpo. Si todas las partículas de un cuerpo tuviesen la misma energía de movimiento, la temperatura sería proporcional a esa energía.

En la industria los procesos de temperatura se caracterizan por presentar una dinámica lenta, y sus especificaciones varían según las condiciones del propio proceso (Ocmín, 2008). Diversas son las formas y técnicas empleadas para la medición y el control de la temperatura:

En el caso de la automatización de un invernadero de plántulas de tomate rojo se emplea el sensor DHT11, el cual cuenta con salidas digitales ya calibradas. El sensor mide temperaturas entre 0° y 50°C con una precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$ y se comunica con un micro controlador encargado de mantener en los estándares requerido (AGUDELO, 2007).

En el Congreso Nacional de Control Automático en el año 2013 en México se hace referencia al control de la temperatura de un invernadero a escala mediante programación en Arduino (es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un micro controlador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.) Para emular las condiciones del incremento de temperatura se hace uso de la técnica de suelo radiante (Se denomina al sistema de calefacción que emplea uno de los paramentos de un local como emisor de calor. El emisor puede ser cualquiera de los paramentos de los locales a calefactar (suelo, paredes o techo), pero lo más corriente es emplear el suelo.), para la cual se tiene el flujo de agua caliente a través de una tubería distribuida en la parte inferior del invernadero, mientras que para la disminución de la temperatura se aplica el sistema de ventilación por aire forzado (Sarahí Fernández Sánchez and López Velázquez, 2013).

También es muy común encontrar el control de la temperatura a través de los controladores lógicos programables (PLC) (Betancourt, 2013), [es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, el PLC está diseñado para múltiples señales de entrada y de salida, rangos de temperatura ampliados, inmunidad al ruido eléctrico y resistencia a la vibración y al impacto.]

Sistemas de control:

Existen muchos métodos y técnicas para efectuar el control, todos con aplicaciones diversas en la industria; según los requisitos de cada proceso.

Los sistemas de control más elaborados se utilizan cuando, los lazos de control convencionales no son suficientemente apropiados, debido a dificultades como procesos con grandes constantes de tiempo, perturbaciones frecuentes ingresando en diferentes puntos del proceso, variables que presentan variaciones y que pueden medirse pero no pueden ser controladas, relaciones que deben mantenerse entre variables no conectadas en forma directa. Es posible que en casos particulares se presenten otros tipos de dificultades de las mencionadas, o que ellas aparezcan

combinadas (Ogata, 2010). Los sistemas de control más elaborados de mayor utilización son:

- 1.- Control de relación
- 2.- Control anticipatorio (feedforward)
- 3.- Control en cascada

Control de relación:

También llamado cascada en lazo abierto. Busca asegurar que dos o más caudales mantengan la misma relación aun cuando los mismos cambien. Es usado en aplicaciones como mezclas con una composición definida (neutralización de efluentes ácidos, mezclas aire/gas) o con propiedades físicas especificadas. El caudal controlado (FIC-102) aumenta o disminuye para mantener la relación correcta con el “caudal libre”. El caudal libre (FT-101) no es controlado por el lazo. El caudal controlado es controlado por el lazo. El valor deseado para el controlador es igual al valor medido del caudal libre multiplicado por un valor definido en la estación de relación (FF-102). Ese valor puede ser fijo o ajustado por el operador. La figura 1.3 muestra el esquema de control de relación.

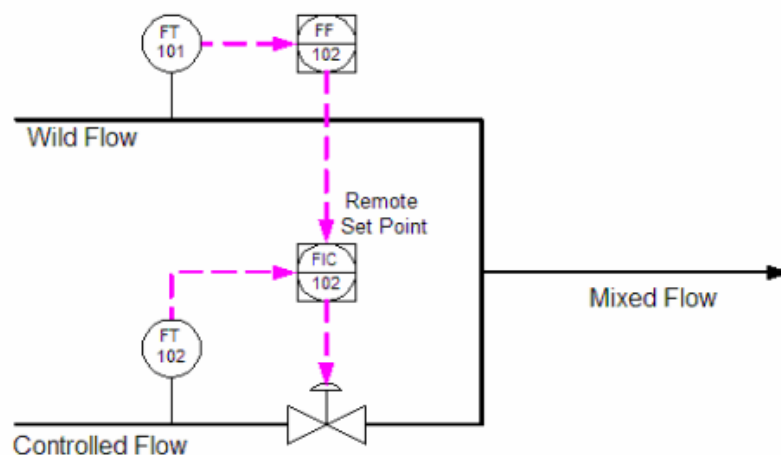


Figura 1.3. Esquema del control de relación

Control anticipatorio (feedforward):

Se usa cuando la perturbación que afecta al proceso puede medirse pero no controlarse. El objetivo es compensar la perturbación antes de que ésta llegue a afectar a la variable controlada. Para ello, apenas se produce la perturbación, debe comenzarse a actuar sobre la variable manipulada de modo que el efecto de esta actuación compense el efecto de la perturbación y la salida del sistema no sufra cambios.

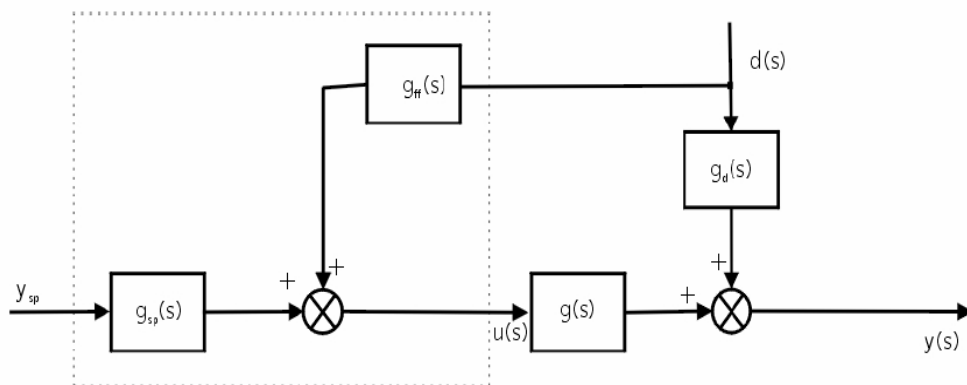


Figura 1.4. Diagrama en bloques del control anticipatorio.

Control cascada:

Es un sistema de control más elaborado, donde la idea básica es realimentar variables intermedias entre el punto donde entra la perturbación y la salida. El control en cascada se utiliza principalmente para eliminar el efecto de perturbaciones en la variable manipulada y mejorar las características dinámicas de lazo de control en procesos compuestos por subprocesos. Básicamente el esquema de control en cascada involucra un lazo de control (interno o secundario) dentro de otro (externo o primario). La estructura del esquema muestra un controlador primario en el lazo externo y un controlador secundario en el lazo interno.

El objetivo del lazo secundario es atenuar el efecto de la perturbación antes de que llegue a afectar significativamente la variable de salida. Para que el sistema sea lo más insensible posible a las perturbaciones, es necesario que el lazo secundario sea más rápido que el primario. Esto es, la suma de las constantes de tiempo del lazo secundario debe ser menor que la suma de las constantes de tiempo del lazo primario. En la figura 1.5 se muestra el esquema del control en cascada.

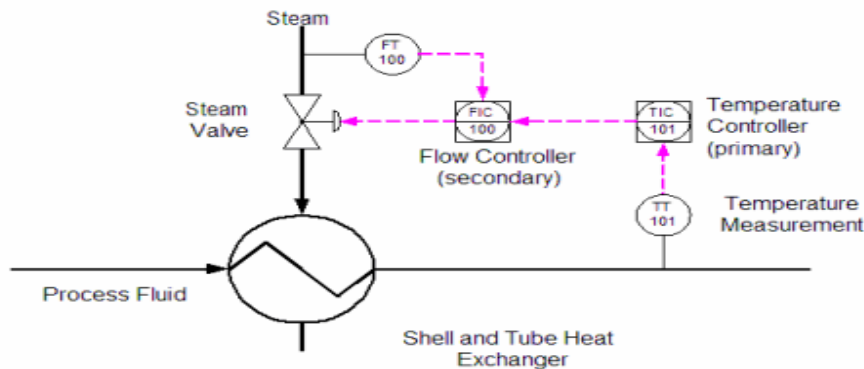


Figura 1.5. Esquema del control cascada

Debido a los requisitos y especificaciones del proceso se determinó que el control en cascada es la estrategia idónea a implementar en el secador; pues por cuestiones mecánicas la servoválvula presenta un error de ± 3 unidades del convertidor, lo que provoca que el valor real de apertura o cierre de la misma difiera con el mando dado, además la necesidad de hacer más rápido el sistema, mejorar su estabilidad en operación y aumentar su rechazo ante perturbaciones son algunas causas por las cuales no se contempla la posibilidad de implementar otro tipo de estrategia.

Estructura:

La estructura de control en cascada tiene dos lazos; un lazo externo con un controlador primario también llamado “maestro” $K_1(s)$ y un lazo interno con un controlador secundario también denominado “esclavo” $K_2(s)$, siendo la salida del primario el punto de consigna del controlador secundario. La salida del controlador secundario es la que actúa sobre el proceso, la estructura del control en cascada se puede apreciar en la figura 1.6.

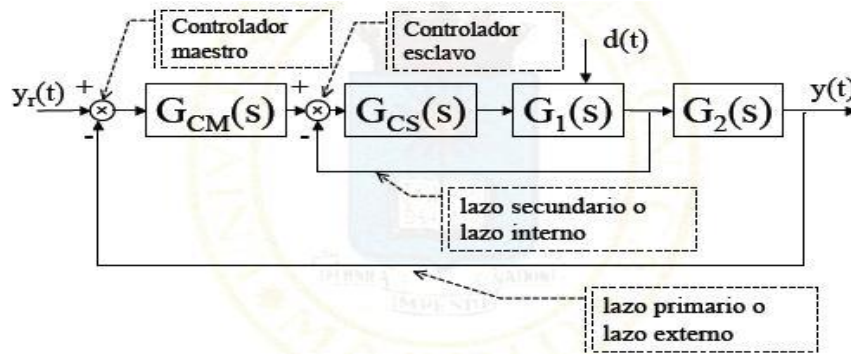


Figura 1.6. Estructura de control en cascada

Ventajas del control en cascada:

- Produce estabilidad en la operación
- Las perturbaciones en el lazo interno o secundario son corregidas por el controlador secundario, antes de que ellas puedan afectar a la variable primaria.
- Cualquier variación en la ganancia estática de la parte secundaria del proceso es compensada por su propio lazo.
- Las constantes de tiempo asociadas al proceso secundario son reducidas drásticamente por el lazo secundario.
- El controlador primario recibe ayuda del controlador secundario para lograr una gran reducción en la variación de la variable primaria.
- Es menos sensible a errores de modelado.
- Incremento de la capacidad de producción.

Limitaciones de aplicación del control en cascada:

- Es aplicable solo cuando pueden obtenerse mediciones de variables adicionales de proceso.
- Requiere medir las perturbaciones en forma explícita, y además es necesario un modelo para calcular la salida del controlador.

c) En algunas aplicaciones la variable controlada no puede medirse y la realimentación no puede realizarse.

Diseño de Control en Cascada:

Los criterios para el diseño de control en cascada son; primeramente cuando el control realimentado simple no provee un desempeño satisfactorio a lazo cerrado y por otra parte cuando la medida de la variable es disponible.

La variable secundaria debe satisfacer los siguientes criterios:

1. Debe indicar la ocurrencia de una importante perturbación.
2. Debe haber una relación causal entre la variable manipulada y la segunda variable.
3. La variable secundaria debe tener una dinámica más rápida que la variable primaria. Típicamente t_p (tiempo pico) debe ser mayor que $3t_s$ (constante de tiempo del proceso secundario).

Consideraciones principales para la implementación de control en cascada:

Una cuestión importante en la implementación de control en cascada es cómo encontrar la variable secundaria controlada más ventajosa, es decir, determinar cómo el proceso puede ser mejor dividido.

La selección de la variable controlada secundaria es tan importante en un sistema de control en cascada que es muy útil formalizar algunas reglas que ayuden a la selección.

Regla 1.- Diseñar el lazo secundario de manera que contenga las perturbaciones más serias.

Regla 2.- Hacer el lazo secundario tan rápido como sea posible incluyendo solamente los menores retrasos del sistema completo de control.

Regla 3.- Seleccionar una variable secundaria cuyos valores estén definidamente y fácilmente relacionados a los valores de la variable primaria.

Regla 4.- Incluir en el lazo secundario tantas perturbaciones como sea posible, manteniéndolo al mismo tiempo, relativamente rápido.

Regla 5.- Escoger una variable secundaria de control que permita al controlador secundario operar a la ganancia más alta posible (la más baja banda proporcional). Esto es difícil de predecir.

Sintonía de controladores:

En la práctica industrial los reguladores de un sistema de control en cascada son normalmente reguladores realimentados estándares tipo P, PI, o PID.

La sintonía de los dos reguladores se efectúa, igual que en controladores en configuración simple pero en dos etapas.

Sintonía del regulador secundario:

- ☐ Obtener un modelo de la parte del proceso incluida en el secundario (modelo de conocimiento o modelo experimental).
- ☐ Sintonizar el controlador secundario por cualquiera de los métodos conocidos (normalmente se utiliza un PI ya que el secundario debe ser un bucle rápido)

Sintonía del regulador primario:

- ☐ Obtener un modelo de la variable controlada a cambios en el punto de consigna del controlador secundario (con el bucle secundario cerrado o en automático)
- ☐ Se diseña el regulador maestro sobre este sistema equivalente.
- ☐ Sintonizar el controlador primario por alguno de los métodos conocidos

Comparación con control por realimentación:

En ocasiones el esquema de control por retroalimentación simple debe ser modificado para enfrentar condiciones especiales de perturbación en el sistema y las características pobres en estabilidad y rapidez de respuesta que éstas pueden reproducir. Estableciendo una comparación es necesario, en primer lugar precisar el diagrama de bloque (figura 1.7) y los componentes del esquema por retroalimentación simple:

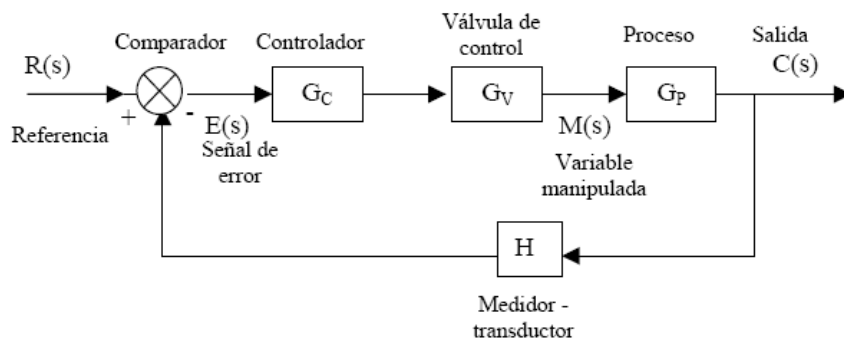


Figura 1.7. Diagrama de bloques del esquema en retroalimentación simple.

Considerando la figura 1.8 como ejemplo:

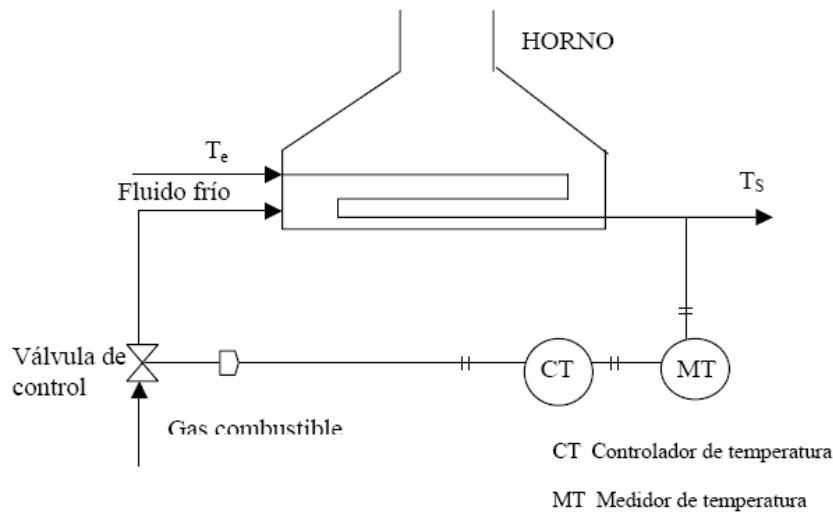


Figura 1.8. Diagrama de un horno (control de temperatura por realimentación simple)

Constituido por el horno en el cual se quema gas, para calentar una cierta corriente y elevar su temperatura desde T_e hasta T_s . Suponiendo que disminuye de pronto la presión de alimentación del gas combustible la caída de presión a través de la válvula será menor de manera que disminuirá el flujo de gas.

Con el controlador de temperatura por retroalimentación simple, no se hará ninguna corrección hasta que la temperatura final a la salida se vea finalmente disminuida. De esta forma, toda la operación del horno se ve alterada por la perturbación.

Con el sistema de control en cascada (figura 1.9), el controlador de flujo sobre la corriente de gas combustible detectará inmediatamente la disminución de gas y abrirá la válvula de control para hacer que el flujo vuelva a su valor requerido. El horno no se ve afectado entonces por la perturbación

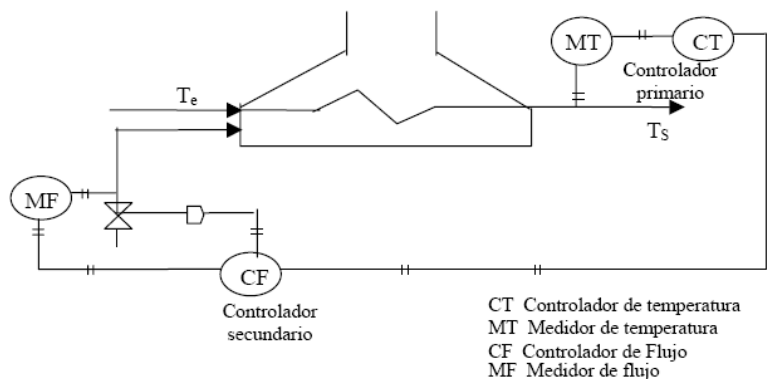


Figura 1.9. Sistema de control en cascada

El diagrama de bloques correspondiente a esta última situación se muestra en la figura siguiente. Así, el control en “cascada” tiene dos controladores por retroalimentación.

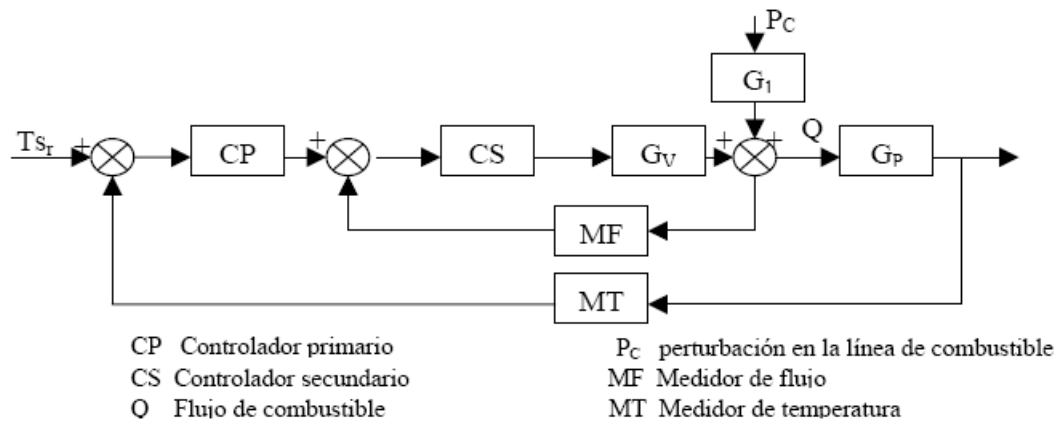


Figura 1.10. Diagrama de bloques del sistema de control en cascada

Es importante notar las siguientes diferencias entre las estructuras de control de realimentación convencional y cascada:

- El esquema de control de realimentación simple sólo emplea un controlador, mientras que en el esquema de control en cascada se emplean dos controladores., es decir necesita una mayor inversión en instrumentación
- En el esquema de control de realimentación simple el valor deseado del controlador se fija externamente (normalmente lo fija el operador del proceso). En el esquema de control en cascada el valor deseado de la variable a controlar sigue siendo fijado de manera externa. Sin embargo, el set-point del controlador esclavo es fijado por el controlador maestro. Es decir, la salida o resultado que produce el controlador maestro es simplemente el set-point al que debe operar el controlador esclavo.
- La velocidad de respuesta del sistema se mejora en el control en cascada, si el lazo secundario tiene una respuesta más rápida que la planta interna.

Diagrama de bloques y diagrama de tuberías e instrumentación:

a) Cascada Temperatura-Presión:

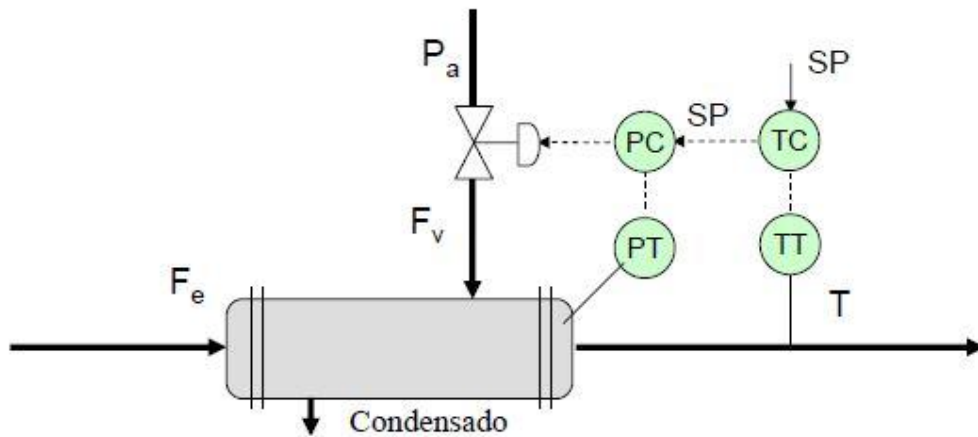


Figura 1.11. Diagrama de tuberías e instrumentación (Cascada temperatura-presión).

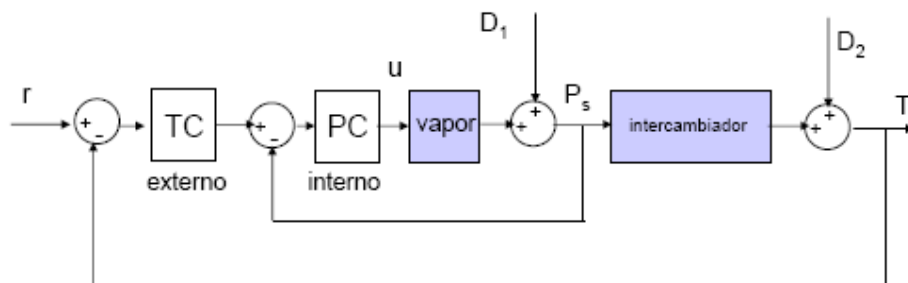
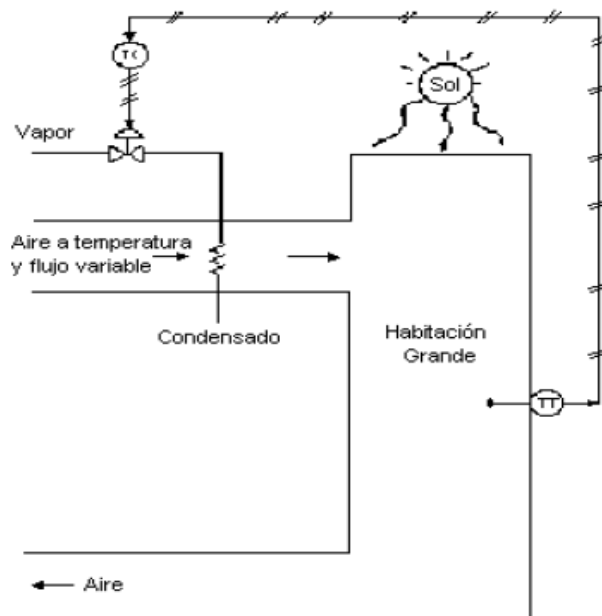


Figura 1.12. Diagrama en bloques (Cascada temperatura-presión).

El regulador externo (temperatura-TC) fija la consigna del regulador interno (presión-PC) cuyo objetivo es corregir el efecto de las perturbaciones (por ejemplo, variaciones en la caída de presión en la válvula) sobre la presión en el interior del tanque (P_s) antes de que afecten de forma significativa a la temperatura T .

Ejemplo de sistemas de control de cascada

Considérese el sistema de control de temperatura del cuarto mostrado en la figura. Por simplicidad considerar que solo se necesita calentamiento y que este es provisto por el vapor caliente de un sistema de aire circulante. En la figura 1.13, un termómetro convencional mide la temperatura del cuarto y fija el flujo de vapor dentro de un rango convencional de retroalimentación. Asumir que el sistema está sujeto a perturbaciones severas, tales como variaciones de la temperatura del aire entrante, de la velocidad de flujo y variaciones en la presión de suministro de vapor.

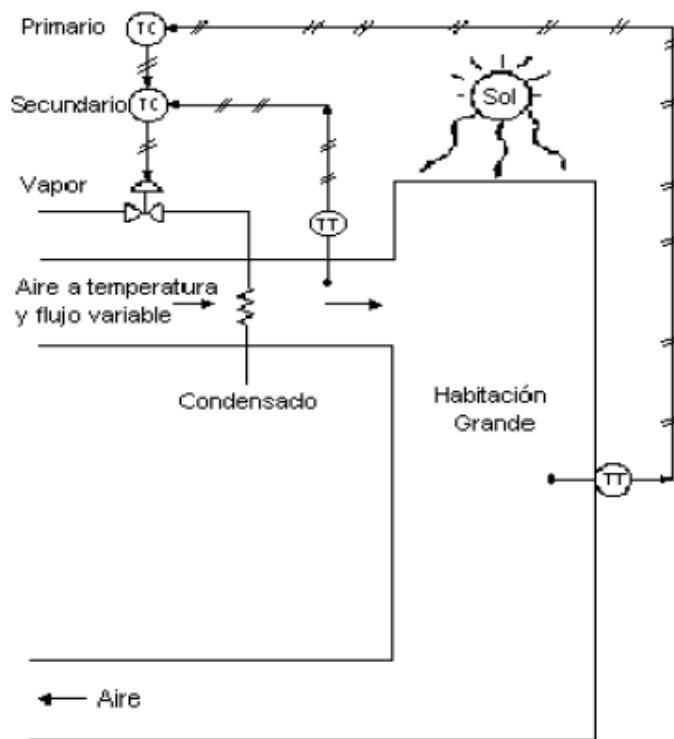


Control de Retroalimentación Simple

Figura 1.13. Sistema de control de temperatura

Una inspección reflexiva de la figura conduce a la conclusión de que el tiempo de retraso asociado con el control de temperatura en el cuarto es considerable. El largo tiempo de retraso es asociado con el tiempo que le toma al cuarto cambiar de temperatura, éste podría ser 15 o 20 minutos. También hay un retraso en la acción correctiva asociado con el cambio de temperatura del vapor, calentando el serpentín. Intuitivamente se podría pensar que éste es de 2 o 3 minutos. El tiempo de retraso asociado con la válvula de vapor y el termómetro es ignorado.

La figura 1.14 muestra un arreglo en cascada en el cual un lazo secundario de control de retroalimentación de temperatura, mide y controla la temperatura del aire entrante. Un lazo primario de control de temperatura mide y controla la temperatura del cuarto manipulando el punto de referencia o valor deseado sobre el lazo de control secundario para la temperatura del aire entrante.



Sistema de control en cascada

Fig.1.14. Sistema de control de temperatura

Con el sistema de cascada mostrado en la figura 1.14, ahora se conoce cómo este responderá a las perturbaciones o variaciones en la temperatura del aire entrante o en la velocidad de flujo de vapor. Claramente perturbaciones que afecten al serpentín serán percibidas por el lazo secundario localizado y la acción correctiva puede ser tomada inmediatamente para evitar el deterioro en la temperatura actual del cuarto.

Reguladores PID del PLC Masterk-120S

El PLC MasterK-120S cuenta con 8 reguladores PID de aritmética entera. Estos reguladores pueden ser ajustados para las condiciones de operación que necesite el proceso. En la figura 1.15 se muestra la ventana asociada a la parametrización de un controlador y en la tabla se relacionan los parámetros así como sus significados (SYSTEMS, 2005).

The screenshot shows the 'PID(Cal) Item Edit' dialog box. It is organized into several sections:

- General Settings:** Scan Time (0), Operation Mode (0), Man OP Range (0).
- Output Limit Value:** Min (0), Max (0).
- Noise Removal:** High Frequency Noise Removal Ratio (0).
- Control Parameters:** Proportional Gain (0), Derivative Time (0), Integral Time (0), D Area Range (D0 ~ D4999).
- Mode Command Set:** Checkboxes for Derivative, Integral, Proportional, and PwM.
- PwM set:** Period (0), Contact (0).
- SV Parameters:** SV Ramp (1), Delta MV (4000), BIAS Value (0), PV(Current) (0), SV(Target) (0).
- PID Algorithm:** Radio buttons for Velocity (selected) and Positioning.

Buttons for 'OK' and 'Cancel' are at the bottom right.

Figura 1.15. Ventana de parametrización de un controlador del PLC MasterK-120S

Significado de los parámetros de los controladores del PLC MasterK-120S

PARÁMETRO	SIGNIFICADO
Scan Time	Tiempo de muestreo, escalado por 10. Valores posibles: 0~100, que implica de 0.1~10 segundos
Operation Mode	Modo de operación: Automático (0) o Manual (1)

CAPÍTULO 1. ASPECTOS TEÓRICOS

Manual operate range	Es el valor de salida en caso de operación manual. Está en el rango de 0~4000
Output limit value	Designa los valores límites mínimo y máximo a la salida del regulador. Están en el rango de 0~4000
High frequency noise removal ratio	Se emplea para operación con control derivativo y significa la razón de rechazo a ruido de alta frecuencia. A mayor ruido en la medición se debe seleccionar un valor mayor. El rango es 1~10
Proportional gain	Está escalada 100 veces. Puede tomar valor de 100~10000, que representa 1~100
Derivative time and integral time	Están escalados 10 veces. Puede tomar valor de 0~20000 que significa 0~2000
Mode command set	Selecciona el modo de operación del controlador. Posibles modos: P, PI, PID con o sin salida PWM. No se permiten modos como PD e I
PWM set	Parámetros para caso de selección de modo PWM. El periodo está escalado 10 veces. Puede tomar valores de 10~100 que representan 1~10 segundos. En "Contact" se especifica la salida física que puede ser de P40 a P57
SV Ramp	Para crear una rampa cuando se dan cambios bruscos del SV. Representa el tiempo (en ciclos del PLC) para llevar el SV de un valor a otro. Rango posible: 0~4000
Delta MV	Es útil cuando se quiere limitar el máximo cambio permitido en la variable manipulada. Rango: 0~4000
Bias	Se emplea para compensa el offset en control proporcional. Rango: 0~4000, representando 2000~2000
SV(Target) and PV(Current)	SV: Set Value y PV: Process Value. Rango 0~4000
PID Algorithm	Existen dos tipos de algoritmos PID disponibles: de velocidad y de posición

Tabla 1.1 Significado de los parámetros de los controladores del PLC Master K-120S

Obsérvese cómo varios parámetros se encuentran en un rango de 0~4000. Esto se debe a que así es el rango de operación de los conversores A/D y D/A de este PLC, pues los mismos son de 12 bits.

Ajuste de los reguladores:

Para el ajuste de los controladores se pueden emplear varios métodos entre los que se encuentran los de tipo experimental y los analíticos. Los métodos de ajuste

experimentales tienen la ventaja de que no se precisa disponer de un modelo matemático de la planta y entre ellos se encuentran el popular método de Ziegler-Nichols y el método del tanteo. Este PLC tiene además la posibilidad de auto-sintonía de los reguladores PID y para ello usa el método de la respuesta a relé y el método de la curva de reacción del proceso (ante cambios tipo paso escalón). Con estos métodos no siempre se pueden especificar las características deseadas para el desempeño de los lazos de control, sino más bien estas resultan del ajuste (Josué García Parrado, 2013, g).

Los métodos de ajuste analíticos no tienen la desventaja mencionada para los métodos experimentales. A través de ellos siempre se puede tener más control sobre el cumplimiento de las especificaciones de diseño, aunque a veces de forma indirecta. Por ejemplo, con los métodos basados en la respuesta de frecuencia se especifican las características del desempeño temporal a través de definiciones en el campo de la frecuencia. Así se tiene que la oscilatoriedad está relacionada con el margen de fase, mientras que la velocidad de repuesta con el ancho de banda.

El gran problema de los métodos de diseño analíticos es que se requiere del conocimiento del modelo matemático de la planta objeto de control. Esto representa una gran dificultad sobre todo en procesos desconocidos, para los que no se han encontrado referencias bibliográficas que aborden su modelación dinámica.

En estos casos se puede realizar la identificación del modelo aproximado del sistema y proceder a ajustar los reguladores con el mismo. Por tanto se diseñarán los reguladores de forma analítica, por uno de los métodos existentes.

Consideraciones prácticas sobre la implementación de los reguladores:

Hay tres consideraciones prácticas muy importantes que fueron necesarias tomar para lograr la implementación de los lazos de control con los PID del PLC MasterK-120S. Estas fueron:

1. El PLC solo admite ganancia positiva y mayor que 1 para los controladores, por tanto, para aquellos casos en que los ajustes del controlador arrojan ganancia menor que 1, hay que poner como ganancia un múltiplo entero que de valor mayor que 1 y luego dividir la salida calculada por el regulador por ese mismo valor.
2. Como el regulador de la temperatura del aire de salida tiene ganancia negativa y el PLC solo permite valores reales, fue necesario introducir dicha ganancia con un valor positivo y posteriormente restarle al valor máximo de mando, el calculado por el PLC y así obtener el mando óptimo para la bomba de tornillo sinfín.
3. La aritmética de este controlador es de punto fijo, por lo que no es posible obtener buenos resultados de la acción integral si la relación entre el tiempo de muestreo y el tiempo de acción integral es muy pequeña. En estos casos el efecto de la acción integral queda eliminado por el error de redondeo, apareciendo error de estado estable en lazos ajustados para que operasen con cero error de estado estable. Para estos casos hay que tomar el tiempo de muestreo suficientemente grande como para evitar esta situación.

Capítulo 2: Herramientas y Métodos

En el presente capítulo se llevará a cabo un proceso de identificación para determinar un modelo más fiable del lazo de temperatura de aire de entrada aplicando secuencias pseudoaleatorias. Posteriormente se realizará un análisis de la composición mecánica de la servoválvula, así como del control existente de este elemento de acción final. Se efectuarán las modificaciones pertinentes al control de la servoválvula para garantizar el cumplimiento de los requisitos propuestos. Se analizarán las ventajas de la subrutina PID como elemento novedoso y poco convencional.

Identificación del lazo de temperatura

El modelo existente del lazo de temperatura de aire de entrada del secador se obtuvo a través de un proceso de identificación muy elemental, en vísperas de mejorar el desempeño de este lazo es preciso determinar un modelo que describa más fiablemente el comportamiento de dicha variable. Para determinar este nuevo modelo se aplica la técnica de secuencias binarias pseudoaleatorias.

La secuencia pseudoaleatoria binaria.

La secuencia pseudoaleatoria binaria (PRBS: Pseudo Random Binary Signal) es una señal periódica cuya autocorrelación se aproxima a la Delta de Dirac (ruido blanco) (Aguado, 2000).

A continuación se muestra un algoritmo para su generación:

PRBS:

$$x(t) = a_m D^m x(t) (+) a_{m-1} D^{m-1} x(t) (+) \dots (+) a_1 D x(t)$$

Siendo:

D: Retardo $Dm x(t) = x(t-m)$

(+): Operador OR

$x(t)$: Variable binaria (0 ó 1)

a_i : Coeficientes binarios

m : Orden de la secuencia

En la tabla 2.1 se muestra una variante de los valores que pueden tomar los coeficientes binarios. Cada fila de la tabla corresponde al juego de coeficientes que son distintos de cero en dependencia del orden de la SBSA.

Las PRBS tienen una serie de propiedades interesantes:

- Su promedio es aproximadamente $N/2$
- Se producen $2^m - 1$ cambios (de 0 a 1 o de 1 a 0)
- Incluyen un grupo de m y otro de $m-1$ unos o ceros consecutivos
- Incluyen 2^i grupos de $m-i-1$ ceros o unos con $i=1,2,\dots,m-2$
- A medida que la longitud de la secuencia es mayor, la función de autocorrelación se aproxima más a la Delta de Dirac.

M	$a_i = 1$
2	a_1, a_2
3	a_1, a_3
4	a_3, a_4
5	a_3, a_5
6	a_2, a_3, a_6
7	a_4, a_7
8	a_2, a_3, a_4, a_8
9	a_5, a_9
10	a_7, a_{10}
11	a_9, a_{11}

Tabla 2.1. Orden y coeficiente de la secuencia pseudoaleatoria binaria

Aunque las Señales Binarias Seudo Aleatorias (SBSA) fueron concebidas inicialmente para la identificación de la respuesta impulsiva del sistema, ellas pueden aplicarse también ventajosamente para la identificación de otros tipos de modelos. La utilización práctica de estas secuencias consiste en la asignación de 2 valores de la variable de control, por ejemplo, posiciones de una válvula, que corresponden al 0 y al 1. Estos 2 valores deben ser simétricos con respecto a la posición normal del elemento de control, de manera que el efecto neto o promedio de la perturbación introducida al final del experimento sea cero. Las desviaciones con respecto al punto de operación pueden ser muy pequeñas sin que disminuya la efectividad de la perturbación aplicada. Por ejemplo, se supone que la secuencia se va a aplicar sobre la posición de una válvula cuyo valor normal es de un 50% de apertura. Podemos entonces asignar 49% al “0” y 51% al “1”.

Como la SBSA, calculada previamente o generada en línea mediante una computadora consiste en una secuencia de unos y ceros, su aplicación práctica se concreta en una secuencia de aperturas y cierres de la válvula. El tiempo de conmutación de la señal binaria debe estimarse en cada caso, atendiendo a consideraciones prácticas y a la dinámica del proceso en cuestión. La regla práctica para escoger el período de conmutación de la señal binaria puede ser la misma que la recomendada para la elección del período de control en un regulador discreto y se expresa en la siguiente tabla 2.2.

Variable	Período de Conmutación de la SBSA
Flujo	1 segundo
Nivel, Presión	5 segundos
Temperatura	10 segundos

Tabla 2.2. Período de conmutación según el tipo de variable.

El orden de la secuencia se escoge generalmente 5 o 6 y se recomienda hacer varias réplicas de la secuencia (2 o 3 al menos). La selección de un orden mayor implicaría un experimento excesivamente largo, difícilmente realizable en la práctica.

Una excelente combinación de señales para la identificación puede consistir en la aplicación previa de un paso escalón en la variable de control y después aplicar la SBSA. La respuesta escalón permitiría estimar con mayor precisión 3 parámetros importantes: la ganancia estacionaria, el tiempo de retardo y la constante de tiempo dominante. Los 2 primeros pueden servir para en algunos casos chequear y corregir

el resultado de la identificación obtenida mediante SBSA, pues si el orden de la secuencia se selecciona bajo por consideraciones prácticas, las características estacionarias del proceso generalmente no se identifican bien.

Por otra parte, contar con una estimación a priori de la constante de tiempo, permite seleccionar más acertadamente el período de conmutación de la SBSA de acuerdo con la regla práctica de que el período de conmutación debe ser de 5 a 7 veces menor que la menor constante de tiempo del proceso.

El primer paso para realizar la identificación aplicando esta técnica es diseñar y generar la señal PRBS. Para ello es importante tener en cuenta el ancho de banda del sistema dinámico bajo estudio. Con este se define la velocidad con que cambiará la señal de excitación y la duración total del experimento. Además, debe tenerse en cuenta los niveles en que se cambiará la entrada para que el sistema opere en la zona lineal. También es muy importante tener en cuenta el período con que serán muestreadas las señales de entrada y salida durante el experimento(Ljung, 2014b).

Para este caso se diseñó una PRBS de orden 4 con una secuencia completa. Se emplearon los mismos datos para identificación y validación. Los niveles se eligieron 70 unidades del convertidor; estos caen en la parte lineal de la característica entrada-salida del conjunto. La PRBS se definió con 240 muestras por estado, que al tiempo de muestreo definido corresponde a 1 segundo de duración cada estado simple. Así los cambios más rápidos están en el orden de una constante de tiempo mientras los más lentos permiten que la respuesta se estabilice. El tiempo total del experimento quedó de 3840 segundos.

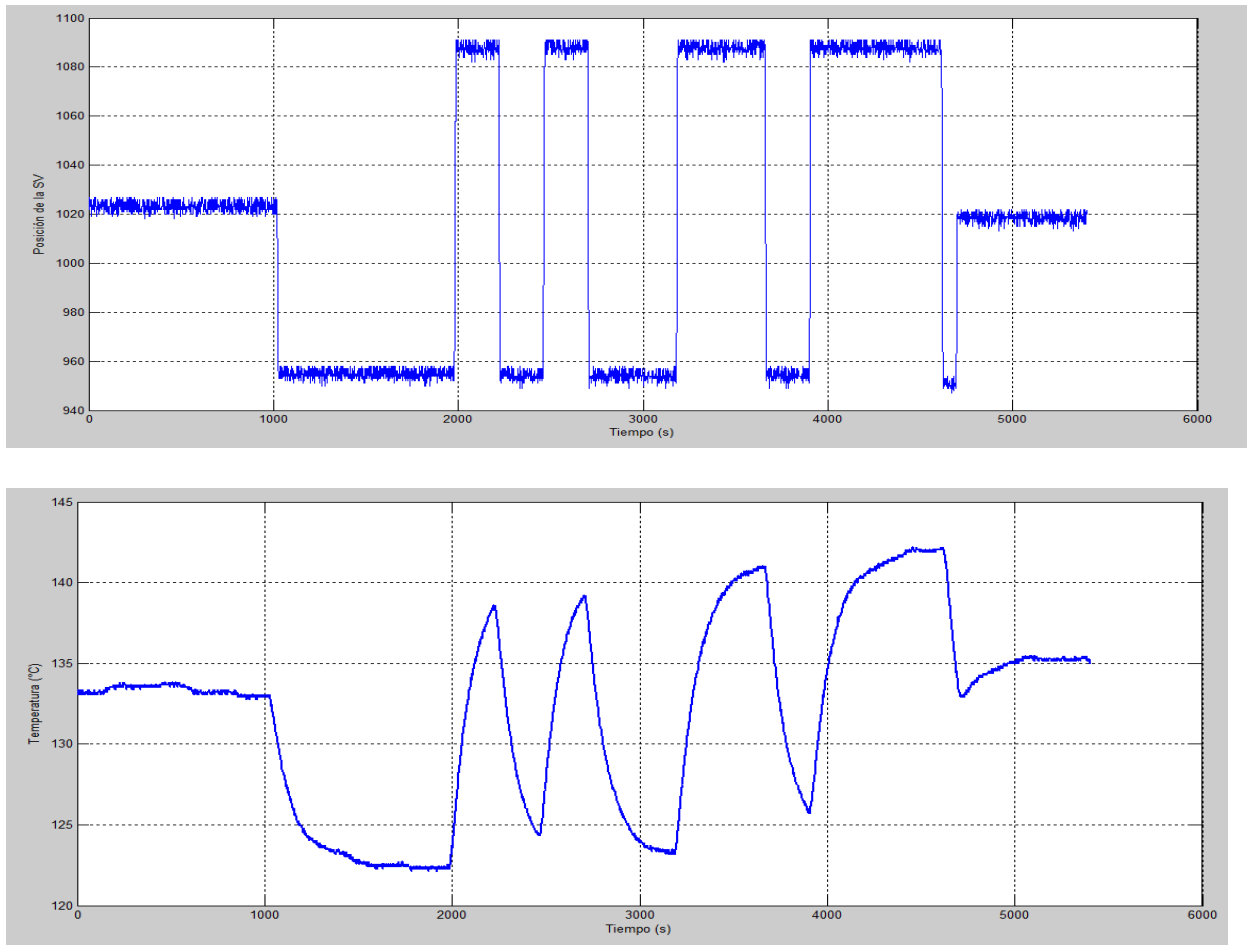


Figura 2.1. Experimento de identificación aplicando señal del tipo PRBS (Variable manipulada: Posición de la servoválvula. Variable controlada: Temperatura de entrada).

Una vez llevado a cabo el proceso de identificación se obtuvieron los siguientes resultados: $k_p=0.97815$, $t_p=123.59$, $t_d=6$.

Servoválvula:

La servoválvula de alimentación de GLP que se encuentra en operación en el secador es modelo Crouzet 82475 y fue recuperada de un fermentador en desuso. Este elemento de acción final es el encargado de suministrar combustible al calentador por donde circula el aire de entrada, por tanto; del correcto

funcionamiento y control de este elemento depende el desempeño de la temperatura de entrada. La servoválvula recibe el mando del regulador (PID) del lazo de temperatura, mas dicho mando siempre se ve afectado por el error mecánico que presenta este elemento de ± 3 unidades del conversor.

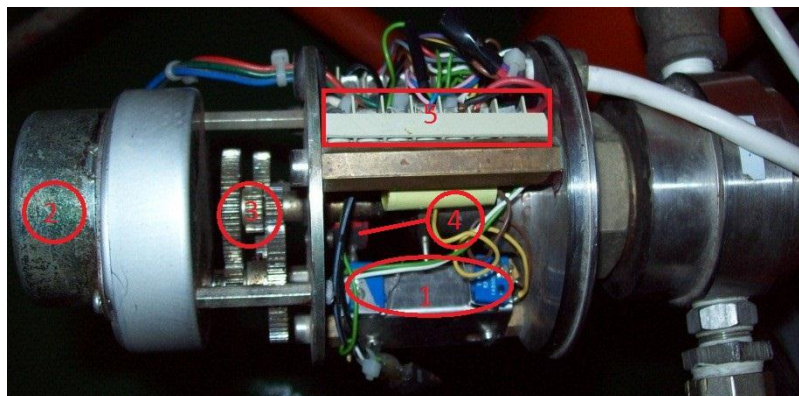


Figura 2.2 Servoválvula de alimentación de GLP.

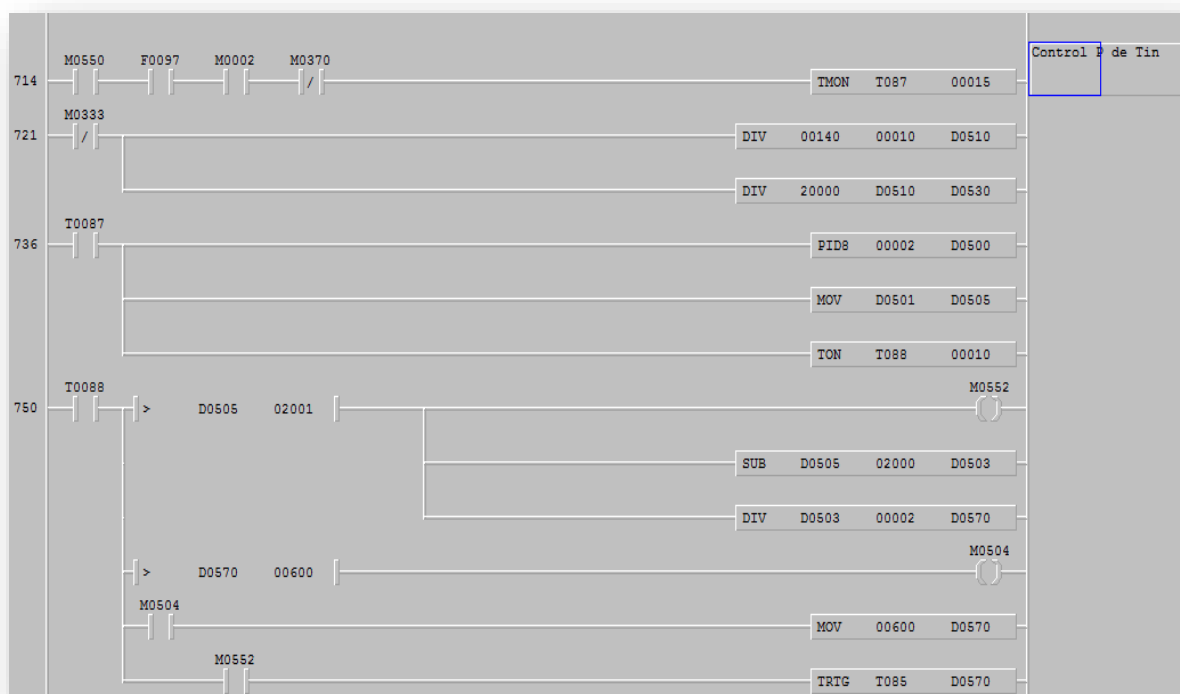
En la figura 2.2 han sido señalados los elementos principales de la servoválvula:

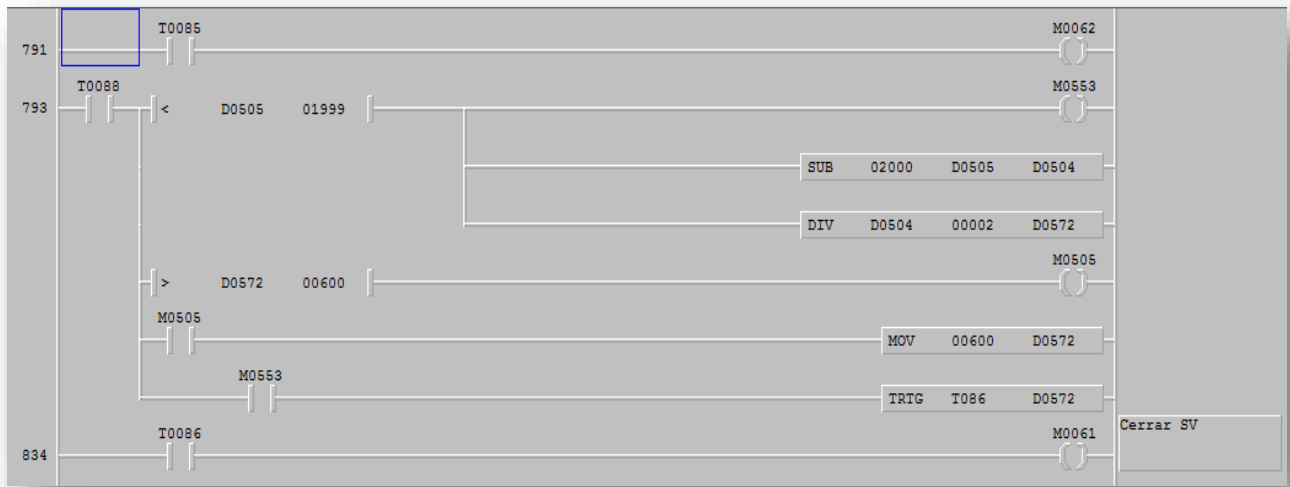
- 1) Juego de contactos que hacen función de límites físicos de la servoválvula; para cuando está totalmente abierta o totalmente cerrada.
- 2) En la parte delantera de la servoválvula se encuentra el motor; encargado de mover el vástago de la servoválvula en sentido de apertura o de cierre.
- 3) Como elemento número 3 se aprecian las ruedas dentadas o engranes. Aquí se acopla el motor con el vástago de la servoválvula y con el potenciómetro.
- 4) El potenciómetro es marca MEGATRON de valor $1k\Omega (\pm 5\%)$; es un resistor cuyo valor de resistencia es variable y está estrechamente relacionado con el nivel de apertura que presente la servoválvula.
- 5) Alimentación de la servoválvula. Presenta un contacto para abrir, otro para cerrar y uno común.

Control de la servoválvula:

El control actual de este elemento de acción final se efectúa a través del autómata programable que controla todo el proceso. Su programación se basa en lenguaje de contactos y se logra el control de la servoválvula mediante una sección de programa del PLC donde se emplean marcas, registros y funciones para conseguir el funcionamiento requerido por el proceso.

A continuación se muestra la sección de programa que permite el control de la servoválvula que se encuentra en operación en estos momentos.





Luego del arranque todo el proceso de secado pasa a modo automático, incluyendo por supuesto el control de la servoválvula. En esencia esta sección de programa lo que permite es abrir y cerrar la servoválvula según requiera el proceso. Los límites superior e inferior se corresponden a 3300 y 500 en unidades del convertor. El PLC compara la posición de la servoválvula con los respectivos límites e indica abrir o cerrar según sea el caso. Una vez que el proceso de secado se encuentra en estado estable; la apertura de la servoválvula se encuentra alrededor de las 1300 unidades del convertor; la posición deseada se compara con el valor actual de apertura, el mismo presenta una variación de ± 3 alrededor de dicho valor debido a que la servoválvula introduce un error de esta magnitud en unidades del convertor.

La principal perturbación inherente al sistema se presenta cuando se efectúa el cambio del recipiente donde se almacena el producto final; donde por varios segundos el secador pierde su hermeticidad y la temperatura decrece dentro de la cámara de secado. Una vez efectuado el cambio del recipiente; el control vuelve a llevar de nuevo el proceso a su punto de operación.

Por cuestiones mecánicas ya se conoce que la servoválvula introduce un error de ± 3 unidades del convertor por lo que el valor actual de la servoválvula estaría en constante contradicción con el valor deseado de apertura, esto conlleva a un zapateo constante del PLC que se resume en un mando del mismo a la

servoválvula, donde el motor se encuentra constantemente abriendo y cerrando para mantener el por ciento de apertura en el valor deseado. Estas condiciones de operación no son favorables para el proceso; por lo que se introduce una histéresis que amplía el rango del punto de operación de la servoválvula.

Al aumentar el rango permisible de operación de apertura de la servoválvula alrededor del punto de operación se elimina el zapateo constante del PLC y con ello mejoran las condiciones de operación de la servoválvula. Pero esto trae consigo que disminuya la sensibilidad, pues ante pequeños cambios del mando, este elemento de acción final no es capaz de responder; solamente actuará en consecuencia una vez que el valor del mando salga del rango de histéresis establecido.

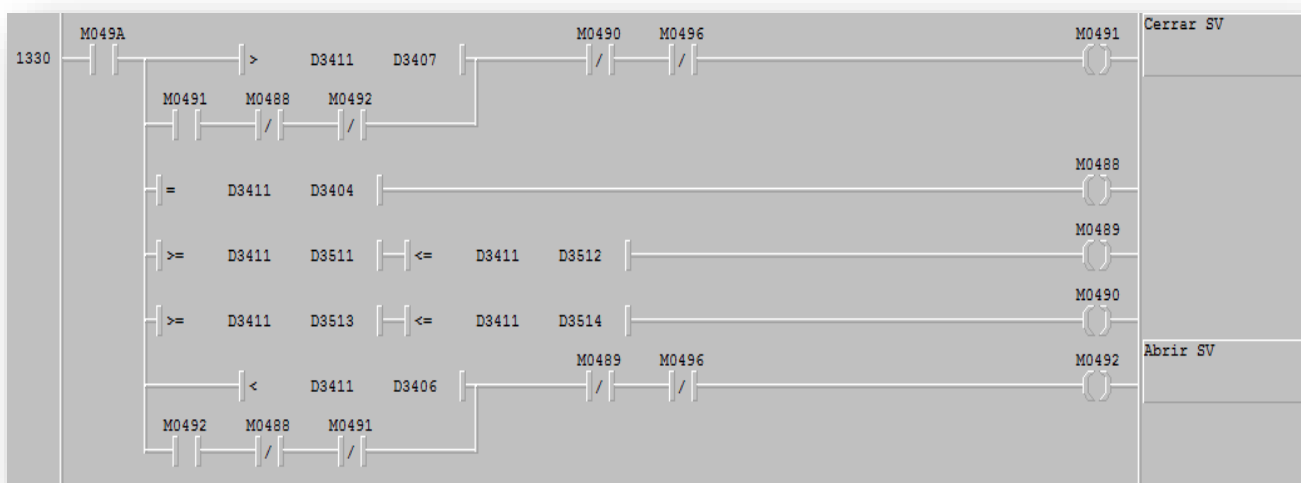
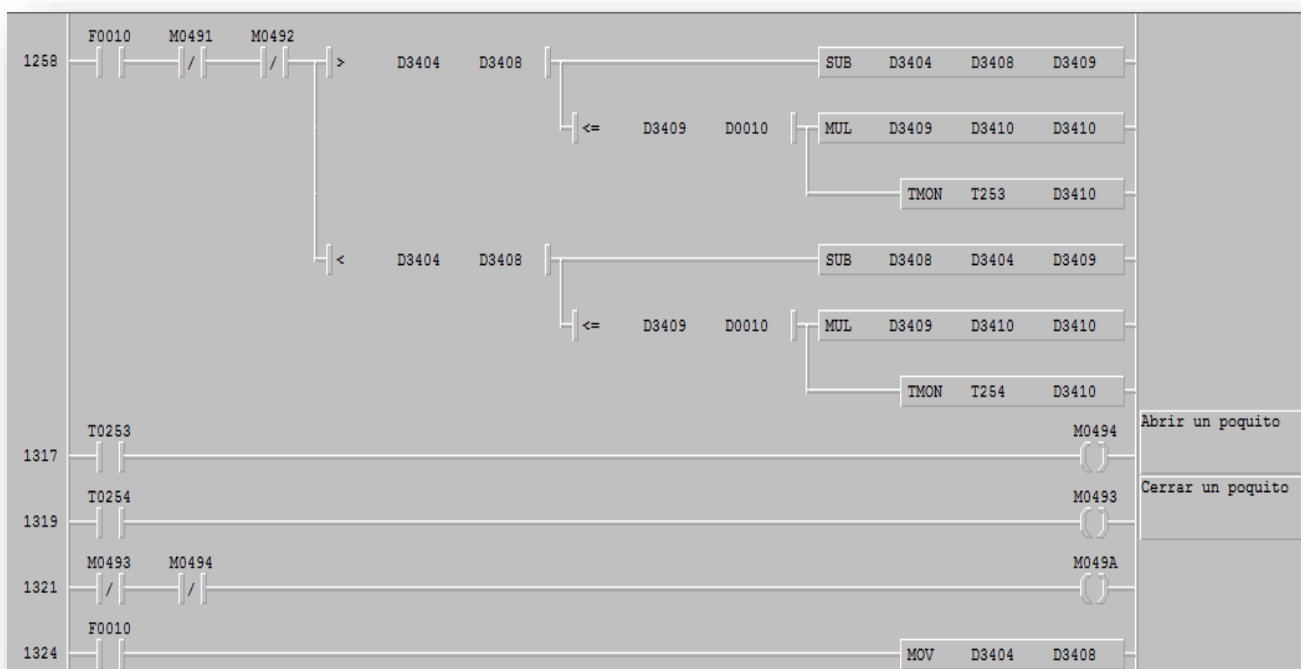
Por las características dinámicas de la servoválvula, la misma presenta una respuesta en forma de integrador. Como dicho elemento posee intrínseco el efecto integral el control actual se hace a través de un regulador proporcional (P). Si la salida del controlador es positiva, se manda a abrir la servoválvula durante un tiempo proporcional al mando calculado. En caso de ser negativa se procede de igual forma para cerrar la servoválvula.

Propuesta de control de la servoválvula:

Para aumentar la aplicabilidad y viabilidad de este proyecto se pretende mantener el programa del PLC que se encuentra en estos momentos en operación; solamente se efectuarán las modificaciones pertinentes para la optimización del mismo en busca del mejor desempeño del proceso.

A continuación se muestra la propuesta de control de la servoválvula:





La nueva propuesta de control de la servoválvula contempla los requisitos del proceso y los satisface; además de mejorar las condiciones de operación de la servoválvula; haciendo que la misma siga con mayor fiabilidad el mando proporcionado por el PLC en correspondencia con la temperatura de entrada.

Para lograr comprender la nueva propuesta de control a continuación se muestra la tabla 2.3 con los principales registros empleados y el significado de los valores que en ellos se guardan:

Registros	Contenido
D3404	Se almacena el valor deseado de posición de la servoválvula
D3411	Se almacena el valor actual de la posición de la servoválvula
D0010	Se almacena el valor de histéresis establecido
D3516	Se almacena $D0010/2$ (mitad de la histéresis)
D3406	Se almacena $D3404-D0010$
D3407	Se almacena $D3404+D0010$
D3511	Se almacena $D3404+00001$
D3512	Se almacena $D3404+D3516$
D3513	Se almacena $D3404-00001$
D3514	Se almacena $D3404-D3516$

Tabla 2.3. Registros empleados y contenido de los mismos.

Cuando corresponde abrir o cerrar la servoválvula esta cambia a razón de 21 unidades del conversor por segundo, lo que significa que para efectuar un cambio de una unidad del conversor en cualquier sentido se requieren 49 milisegundos; este valor de tiempo por unidad del conversor se almacena en el registro D3410.

La sección de programa referida al control de la servoválvula comienza inicializando los registros a emplear, luego el programa puede analizarse en dos partes fundamentales; una primera parte para efectuar el control cuando la posición de la servoválvula se encuentra dentro del rango de histéresis y la otra para cuando no se encuentra dentro del mismo. En cada ciclo el valor deseado (D3404) es comparado con el mando anterior que se almacena en el registro D3408; si estos valores coinciden quiere decir que no hay variación en el mando y el valor deseado se mantuvo, por lo que no se toma acción sobre la servoválvula.

En caso de que el valor deseado difiera del mando anterior, se comparan dichos valores para determinar qué acción de mando debe ser tomada sobre la servoválvula. Si la diferencia entre estos valores (D3409) no excede el valor de

histéresis establecido, se multiplica dicha diferencia por D3410, almacenándose dicho resultado en este último registro; valor que representa el tiempo requerido de apertura o cierre de la servoválvula para llevar el valor actual al mando deseado. Para actuar sobre la servoválvula en este caso se emplean temporizadores (TMON) los cuales activan las marcas M0493 y M0494 respectivamente por el tiempo requerido según la acción de mando.

Si la diferencia entre el valor deseado y el mando anterior, o viceversa (D3409), excede el valor de histéresis; entonces no se activarán las marcas M0493 y M0494 (“abrir o cerrar poquito”) lo que significa que se estaría activando la marca M049A, la cual da paso a la segunda parte del programa.

En esta parte del programa se compara si es mayor el valor actual de posición de la servoválvula (D3411) con el valor deseado más el valor de histéresis (D3407); si se cumple dicha sentencia se activará la marca M0491 la cual manda cerrar la servoválvula mientras se encuentre activa; es decir que este elemento de acción final estará cerrándose mientras que se cumpla que $D3411 > D3407$. Cuando se igualen el valor deseado y el valor actual se activa la marca M0488 y se deja de cerrar la servoválvula. Por otra parte si el valor actual se encontrase entre D3511 y D3512 se activaría la marca M489 que también detendría el cierre de la servoválvula pues estaría el por ciento de apertura en un rango permisible de operación comparado con el valor deseado.

Si el valor actual está muy por debajo del valor deseado entonces se cumple la sentencia $D3411 < D3406$ la cual activa la marca M0492 que manda a abrir la servoválvula; acción que se estará ejecutando mientras dicha marca se encuentre activa. Una vez que se iguale el valor deseado al actual; al igual que en el caso anterior se activa la marca M0488 que detendría el proceso de apertura. También si el valor actual se encontrase entre D3513 y D3514 respectivamente se activaría la marca M0490 que a su vez detendría la apertura de la servoválvula; pues el valor actual se encontraría en un rango factible de operación.

Resulta válido recordar que la servoválvula presenta un error de ± 3 unidades del convertor, por lo que se tuvo en cuenta cada posibilidad; para asegurar un control preciso y fiable sobre este elemento.

Subrutina del PID:

Uno de los elementos más novedosos de este trabajo es precisamente la implementación de un regulador PID programado íntegramente en lenguaje de contactos. En el capítulo anterior se analizaron las consideraciones prácticas para el ajuste de controladores en este PLC, resaltando ciertas limitaciones tales como la aritmética de punto fijo que presenta este autómeta; efectuando el redondeo de los parámetros por truncamiento, además de acotar la ganancia a valores positivos y mayores que 1. Con la implementación de esta subrutina se compensan todas estas limitaciones.

El regulador PID continuo tiene la siguiente función de transferencia:

$$PID(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

Como se conoce, a partir de un modelo continuo se pueden obtener varios modelos discretos. Esto se debe a que ningún modelo discreto es capaz de reproducir todas las características dinámicas de un modelo continuo. Por esta razón existen varias equivalencias discretas de un mismo modelo continuo, donde cada una mantiene en forma discreta, una característica del modelo continuo; por ejemplo, la respuesta impulsiva, la respuesta al paso escalón, la respuesta de frecuencia para una frecuencia dada, etc.

La equivalencia que se empleará para la implementación del regulador es la que intenta mantener la igualdad del área bajo la curva vía método de integración numérica. De este forma de hallar la equivalencia discreta existen tres variantes, en dependencia de cómo sea aproximada el área entre dos instantes de muestreo

consecutivos. Así se tiene una aproximando el área por el rectángulo hacia adelante (forward), por el rectángulo hacia atrás (backward) y por el trapecio. La que suele emplearse para la implementación discreta de reguladores PID es la backward, que es la que se empleará en este caso (Gene F. Franklin, 1998). Aquí basta con sustituir la variables en la expresión del PID continuo por $s = \frac{z-1}{Tz}$

Teniendo en cuenta lo anterior, la función de transferencia discreta del PID queda de la siguiente forma:

$$\frac{M(Z)}{E(Z)} = \frac{\alpha_0 - \alpha_1 z^{-1} + \alpha_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

La ecuación de diferencia que es necesario programa es la siguiente:

$$m(k) = \alpha_0 e(k) - \alpha_1 e(k-1) + \alpha_2 e(k-2) - m(k-1)$$

Donde:

$$\alpha_0 = Kp + Kp \frac{T_D}{T} + Kp \frac{T}{T_I}$$

$$\alpha_1 = 2Kp \frac{T_D}{T} + Kp \frac{T}{T_I}$$

$$\alpha_2 = Kp \frac{T_D}{T}$$

A continuación se muestra la tabla 2.4 donde se indican los registros empleados para almacenar los principales parámetros.

Registro	Contenido
D2000	Kc (ganancia)
D2001	Ti (Tiempo de integración)
D2002	Td (Tiempo derivativo)
D2003	T (Período de muestreo)

CAPÍTULO 2. HERRAMIENTOS Y MÉTODOS

D2004	Modo
D2005	Min (Valor mínimo de mando)
D2006	Max (Valor máximo de mando)
D2010	PV (Present value o Valor actual)
D2011	SV (Set value o Valor deseado)
D0021	Mk (Mando)
D2022	Mando maual

Tabla 2.4. Registros empleados para el almacenamiento de parámetros.

En la programación de este PID se contempla el cálculo de los coeficientes (a_0 , a_1 , a_2) al igual que el error actual y en dos instantes anteriores. A continuación se muestra la tabla 2.5 donde aparecen estos elementos y los registros donde se almacenan:

Parámetro	Fórmula	Registro
a_0	$K_c + K_c \cdot T / T_i + K_c \cdot T_d / T$	D2012
a_1	$K_c + 2 \cdot K_c \cdot T_d / T$	D2013
a_2	$K_c \cdot T_d / T$	D2014
e_k	SV-PV	D2015
e_{k-1}	Un instante anterior	D2016
e_{k-2}	Dos instantes anteriores	D2017
d_{mk}	$a_0 \cdot e_k - a_1 \cdot e_{k-1} + a_2 \cdot e_{k-2}$	D2019

Tabla 2.5. Parámetros del PID

La flexibilidad de ajuste de este PID programado permite establecer los valores requeridos para los parámetros sin que se vean afectados por las limitaciones del

PLC, lo que a su vez permite un mejor ajuste del regulador; que se resume en un mejor control y desempeño del proceso.

El lazo interno del control en cascada propuesto se implementa como ya fue explicado y el ajuste que tiene es el de la histéresis en el control de la posición de la servoválvula. El lazo externo se implementa con el PID descrito y para su ajuste se empleó a función de transferencia identificada con la SBSA. El método de ajuste empleado fue la facilidad de sintonía disponible en MATLAB (Ljung, 2014a) y lo ajustes que mejor desempeño tuvieron el las experimentaciones mediante simulación y práctica fueron:

$$K_C = 3.66$$

$$T_I = 144 \text{ segundos}$$

$$T_D = 0 \text{ segundos}$$

Con este juego de parámetros y un tiempo de muestreo de 20 segundos, se llega a un desempeño adecuado del controlador donde no se enmascara el efecto de la acción integral para errores pequeños, por el redondeo de la aritmética entera del PLC. Este tiempo de muestreo cumple con los criterios prácticos para su selección derivados del teorema del muestreo, ya que en este caso la constante de tiempo del sistema está en el orden de 140 segundos.

Capítulo 3. Análisis de los Resultados

En el presente capítulo se expondrán los resultados alcanzados en este trabajo de diploma. Luego de haber cumplido con los objetivos propuestos se procede a realizar un análisis de la implementación de la nueva estrategia de control; comparando el desempeño del proceso con el control simple y con la estrategia de control cascada. Además se hará una comparación del desempeño del lazo de temperatura de aire de entrada antes y después de aplicar la propuesta.

Desempeño del lazo de temperatura en el arranque.

Luego de aplicar la estrategia de control en cascada uno de los objetivos perseguidos era conseguir que el proceso se hiciese más rápido, una vez que se arranca el secador, se requiere que la temperatura de salida alcance lo antes posible los 100°C . En la figura 3.1 se muestra el proceso de arranque antes y después de aplicada la estrategia de control propuesta.

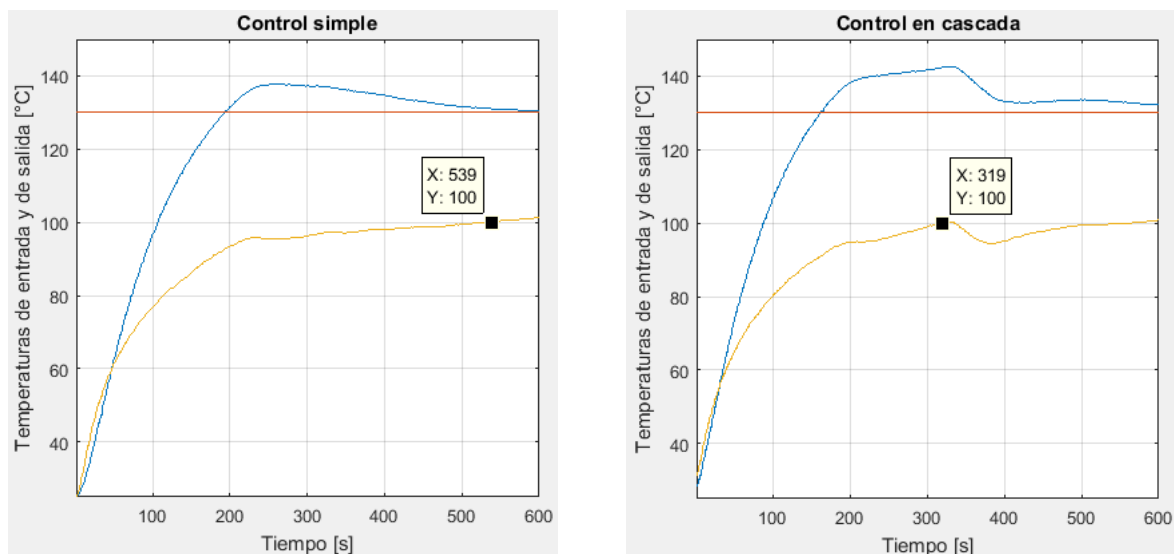


Figura 3.1. Análisis del arranque.

En las gráficas se observan dos curvas y una línea roja; la curva de color azul corresponde a la temperatura de entrada, la otra curva se corresponde con la temperatura de salida y la línea se corresponde con el valor deseado de temperatura de entrada (130°C). Obsérvese como con el control simple la temperatura de salida logra llegar a los 100°C a los 539 segundos (aproximadamente 9 min) después de arrancar, mientras que con el control en cascada la temperatura de salida alcanza los 100°C en 319 segundos (aproximadamente 5 min). Pudiera decirse que la diferencia nos es considerable, pero todo depende del punto de vista en que se mire, si le restamos esos 4 minutos de operación al secador por cada vez que se seca y analizamos en un año el acumulado de esta cifra; el tiempo que ha dejado de estar en operación el secador gracias a esos 4 minutos se vuelve considerable; se estaría aportando a la preservación de la vida útil del equipo y del medio ambiente.

Desempeño del lazo de temperatura ante disturbios.

Uno de los elementos para evaluar la nueva estrategia de control es precisamente la capacidad de rechazo ante disturbios. En la figura 3.2 se muestra el desempeño del lazo de temperatura de aire de entrada cuando es sometido a disturbios.

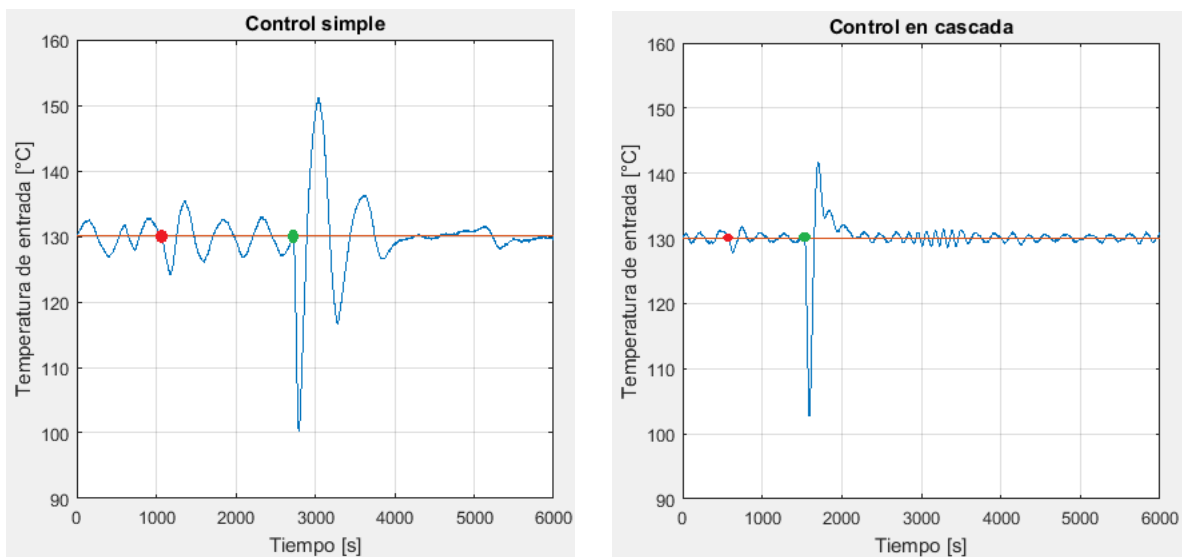


Figura 3.2. Respuesta ante disturbios.

El sistema fue sometido a dos disturbios, señalizados en las gráficas con dos puntos en el momento de aplicado cada disturbio. El punto rojo representa que el sistema fue sometido a la apertura de la puerta del panel de control del secador por aproximadamente 60 segundos, mientras que el verde; representa que a partir de ese instante se suprimió la alimentación de gas licuado que alimenta la llama del calentador por aproximadamente 45 segundos.

Al analizar la respuesta ante el primer disturbio, se puede apreciar como el sistema con el control simple experimenta una variación de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ luego de ser abierta la puerta del panel de control, y tarda aproximadamente 30 minutos en recuperarse y volver a su punto de operación. Con el control en cascada el sistema experimentó una variación de $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ luego de aplicado el primer disturbio y tardó 15 minutos en volver a su estado estable. Como se puede apreciar con la estrategia de control en cascada el sistema aumenta su rechazo ante los disturbios, pues comparando ambas respuestas existe una diferencia de 3.5°C entre una y otra, además de que el sistema operando con el control en cascada solo requiere la mitad del tiempo que necesita con el control simple para volver a su punto de operación.

Cuando analizamos ambas respuestas ante el segundo disturbio se observa que los resultados se comportan muy similares a los obtenidos ante la apertura de la puerta del panel de control en cuanto al desempeño de ambas estrategias de control. Con el control simple el sistema experimenta una variación de aproximadamente $\pm 25^{\circ}\text{C}$, mientras que con el control en cascada varía aproximadamente $\pm 18^{\circ}\text{C}$, una diferencia notable de 7°C . Si se analiza el tiempo que demora el sistema en recuperarse en cada caso; se aprecia que con el control simple el sistema tarda alrededor de 50 minutos mientras que con el control en cascada solo necesita 20 minutos para volver a su punto de operación.

Como se pudo apreciar con la implementación del control en cascada, el sistema logra atenuar en mayor medida las perturbaciones que pudiesen afectar el desempeño del proceso, además produce una mayor estabilidad en la operación del sistema e influye en la eficiencia del mismo al ahorrar energía y en su eficacia al influir positivamente en el incremento de la viabilidad de los microorganismos.

Desempeño del lazo de temperatura en estado estable.

Se ha analizado el desempeño del lazo de temperatura en el arranque del secador y ante perturbaciones, a continuación se muestra cómo se comporta el sistema en estado estable.

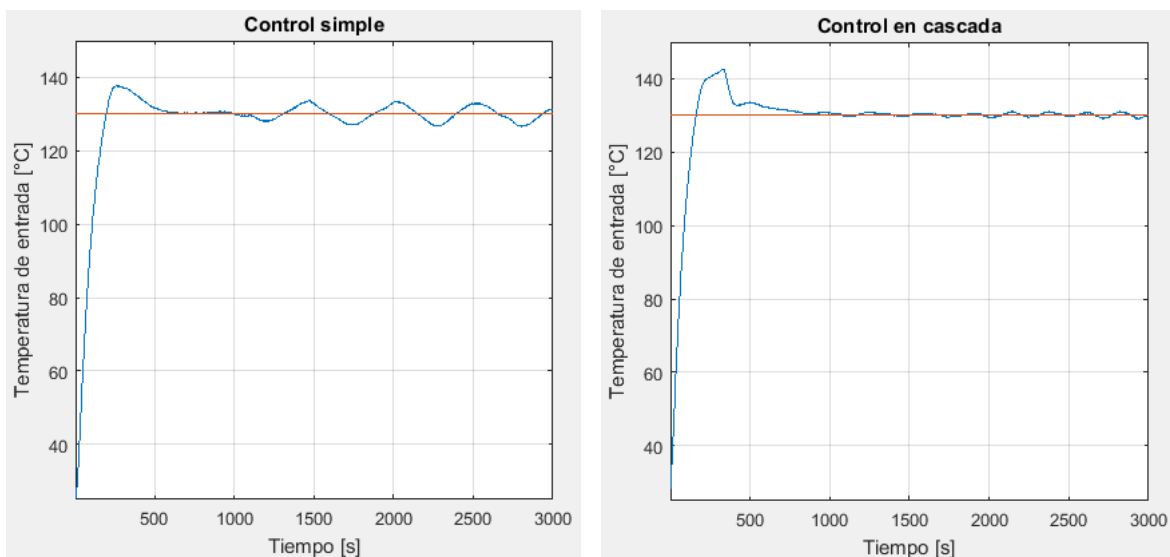


Figura 3.3. Desempeño del lazo en estado estable.

Una vez que se arranca el secador por requisitos del propio proceso, el sistema tiene aproximadamente 30 minutos para estabilizarse, con el control simple alcanza su punto de operación a los 20 minutos, mientras que con la implementación del control en cascada lo consigue en 15 minutos; lo que ratifica que con la implementación de la propuesta de control el sistema se hace más rápido.

Con el control simple la temperatura de aire de entrada se mantiene oscilando alrededor del valor deseado (130°C) con una desviación de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$, mientras que con el control en cascada este valor de desviación se mantiene en 0.6°C , reduciéndose en 1.9°C , lo que representa que disminuyó el valor de la desviación en un 76%.

A continuación se analiza cómo se comporta el error a través del tiempo mediante las siguientes gráficas:

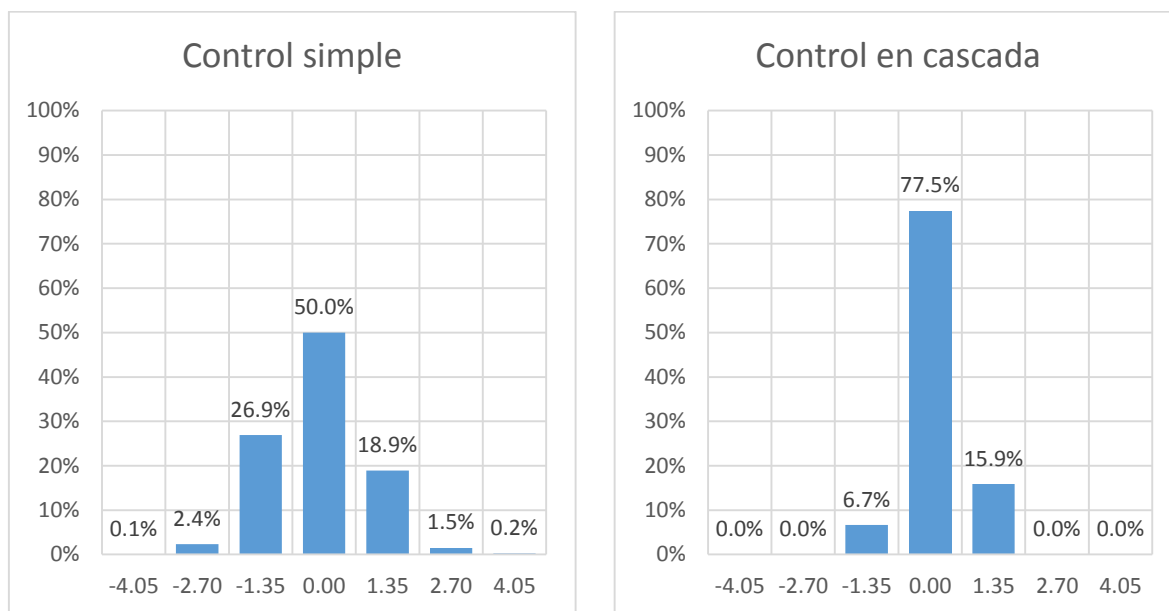


Figura 3.4. Error en el tiempo.

Como se puede apreciar el sistema con el control simple se mantiene el 50% del tiempo con una desviación de $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ alrededor del valor deseado, el 45.8% del tiempo con una desviación de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y el resto del tiempo (4.2%) con desviaciones mucho mayores alrededor del set point, mientras que con el control en cascada se mantiene un 77.5% del tiempo con desviaciones de $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ alrededor del valor deseado y el resto del tiempo (22.3%) con un error de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Es claramente visible que el proceso operando con la estrategia de control en cascada mejora en gran medida su desempeño.

Supervisión, control y adquisición de datos

EROS es un Sistema de Supervisión y Control de Procesos Industriales concebido en Cuba por el Grupo Eros Serconi, Nicaro ISMM, Moa. Este software facilita a operadores, ingenieros, supervisores y directivos operar y dirigir cualquier proceso con eficiencia y productividad. Tiene en cuenta todas las características de las variables medidas y realiza un potente tratamiento estadístico y determinístico de

las mismas con sólo configurarlo. Su ambiente de trabajo es amistoso y la presentación agradable. EL mímico fundamental para la supervisión del secador se muestra en el anexo 4. EROS se configura de forma muy fácil (en línea) lo que permite que un usuario no especializado con orientaciones sencillas pueda configurarlo sin tener que depender de especialistas para ello. Esta herramienta posee la experiencia acumulada de más de 18 años en más de 400 instalaciones en alrededor de 180 posiciones entre plantas industriales y emplazamientos de Grupos Electrógenos(Serconi, 2015).

Consideraciones generales:

1. Este software está soportado en ambiente Windows NT/2000/XP/Vista/W7 lo cual permite utilizar todas las posibilidades de esta plataforma.
2. Facilita el mando a distancia y el control desde la aplicación, que son herramientas que potencian el automatismo del proceso tecnológico.
3. Cumple con la plataforma multiusuario, el EROS es un Sistema distribuido en el cual sus diferentes componentes se interconectan a través de la Intranet Empresarial. Los componentes que cooperan entre si son: Estaciones de medición, Estaciones de Visualización, Servidores de Reportes, Páginas Webs y otras aplicaciones que se desarrollen usando Eros Net y ActiveX. Estos componentes pueden estar en ordenadores separados vinculados a través de una Red Ethernet o en un mismo ordenador.
4. Posibilidad de comunicarse con cualquier dispositivo de medición mediante manejadores (´drivers´) de comunicación u OPC cliente, además posee un OPC servidor para brindar sus datos a otros OPC clientes. Posee manejadores que permiten la comunicación con sistemas de radio (trunking) y tecnología celular.
5. Se vincula con un Sistema de Reportes que capta los datos de las estaciones de medición y controla la emisión de reportes periódicos o progresivos. Este sistema permite configurar y emitir reportes periódicos de las variables del EROS. Utiliza toda la potencia de edición de Tablas y gráficos que posee el

Microsoft Excel y lo combina con la posibilidad de insertar en celdas seleccionadas los valores que se necesiten de las variables del EROS. En los reportes pueden aparecer tanto, valores puntuales como cálculos estadísticos en un determinado período, tales como valores medios en el intervalo de una hora, turno o día, desviación típica, valores máximos etc. Este sistema no se encuentra incluido dentro del EROS, si no que posee una licencia propia.

El CIGB, durante el proceso de automatización del secador implementó este software para la supervisión, control y adquisición de datos. En el caso específico de este trabajo, fue de mucha utilidad para el análisis y supervisión de parámetros como la temperatura de entrada, posición de la servoválvula, mandos y valores deseados. En la figura 3.5 se muestra una corrida del secador donde precisamente se supervisan los parámetros antes mencionados.



Figura 3.5. Pantalla del EROS supervisando la temperatura de entrada.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Con la realización de este trabajo se arriban a las siguientes conclusiones:

1. La estrategia de control en cascada implementada en el lazo de temperatura de entrada del secador de bioproductos del CIGB de Camagüey cumple con los requisitos deseados, mejora el desempeño del lazo de temperatura; proporcionándole un mejor rechazo ante perturbaciones y mejorando su estabilidad en la operación. Según los tecnólogos del proceso esto implica un incremento en la viabilidad de los microorganismos.
2. El nuevo control de la servoválvula complementa el control en cascada, mejorando las condiciones en las que opera el sistema.
3. La subrutina PID programada brinda mejoras en el ajuste y redondeo de los parámetros y entre otras posibilidades permite la flexibilidad en la definición del tiempo de muestreo con que se desea que trabaje el lazo de control.
4. El EROS es una herramienta concebida en nuestro país que brinda la posibilidad de realizar sistemas de supervisión, control y adquisición de datos de forma cómoda y fiable.

Recomendaciones

Luego de finalizado el trabajo se exponen las siguientes recomendaciones:

1. Continuar el desarrollo de este trabajo con el fin de mejorar el desempeño de este lazo hasta lograr que no exista oscilación ninguna. Para ello se debe ajustar mecánicamente la servoválvula existente o encontrar alternativas de compensación por software.
2. Valorar la posibilidad de incluir el software EROS en plan de estudio de la carrera de automática.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3. Intensificar y profundizar en el estudio de los autómatas programables en la carrera.

Bibliografía:

1. AGUADO, A. 2000. *Temas de identificación y control adaptable*.
2. AGUDELO, W. H. 2007. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA AUTOMATICO DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA UN HORNO INDUSTRIAL
3. BETANCOURT, I. M. F. 2013. Control de temperatura para una mufla utilizando el PLC Moller *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 13, 8-14.
4. G, D. A. E. R. R. Identificación de Sistemas. FIE-UCLV.
5. GENE F. FRANKIN, J. D. P., MICHAEL L. WORKMAN 1998. *Digital Control of Dynamic Systems*.
6. GUZMÁN, M., & IVANOVA, J. . 2002. *Diseño del sistema de control y monitoreo del proceso de secado por aspersión en la fábrica de café instantáneo.*, Escuela Superior Politécnica del Litoral.
7. JOSUÉ GARCÍA PARRADO, D. E. B. 2013. *Automatización del proceso de secado de HeberNem-S*. UNIVERSIDAD DE CAMAGÜEY "IGNACIO AGRAMONTE LOYNAZ".
8. LJUNG, L. 2014a. *Control System Toolbox™ Getting Started Guide*.
9. LJUNG, L. 2014b. *System Identification Toolbox™ User's Guide*.
10. MORGAN, C. A. 2006. Preservation of micro-organisms by drying; A review. *Microbiological Methods*, 66, No 2, 183-193.
11. OCMÍN, Y. 2008. Control de Temperatura.
12. OGATA, K. 2010. *INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA*, Madrid, PEARSON EDUCACIÓN.
13. ORLANDO REGALÓN ANIAS, J. G. P., DANNY ECHEVARRÍA BÁEZ, FRANCISCO HERRERA FERNÁNDEZ, , YUNIER PANEQUE DÍAZ, S. B. C., JESÚS ZAMORA SÁNCHEZ, VLADIMIR RODRÍGUEZ DIEZ, & RODRÍGUEZ, L. L. 2015. Automatización integral del proceso de secado de bioproductos *RIELAC*, XXXVI 1-14.

14. R. P. PATEL, M. P. P. A. A. M. S. 2009. Spray drying technology: an overview
15. *Indian Journal of Science and Technology* 2.
16. SARAHÍ FERNÁNDEZ SÁNCHEZ, E. F. O. H., ERVIN JESÚS ALVAREZ SÁNCHEZ, ANDRÉS & LÓPEZ VELÁZQUEZ, R. A. F. 2013. Control de Temperatura de un Invernadero a Escala mediante
17. Programación en Arduino *In: FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA, C. X., UNIVERSIDAD VERACRUZANAXALAPA, VERACRUZ 91000, MÉXICO (ed.)*.
18. SERCONI, G. E. 2015. *Manual del Usuario (SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL DE PROCESOS EROS)*.
19. SYSTEMS, L. I. 2005. *LG Programmable Logic Controller MASTER-K. Instructions & Programming*.

ANEXOS:

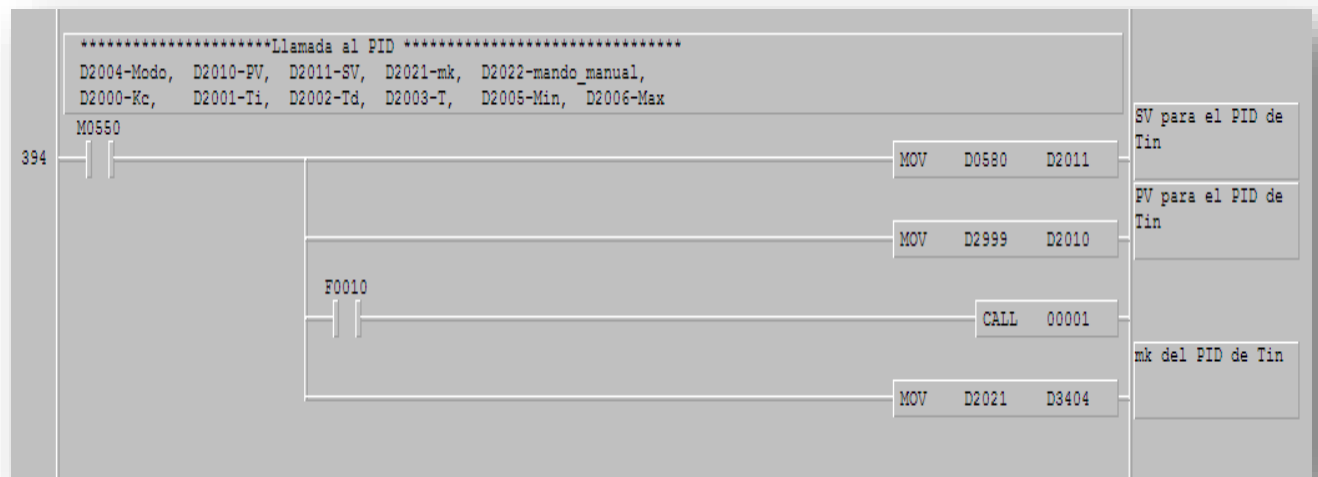
Anexo 1. Secador del CIGB de Camagüey



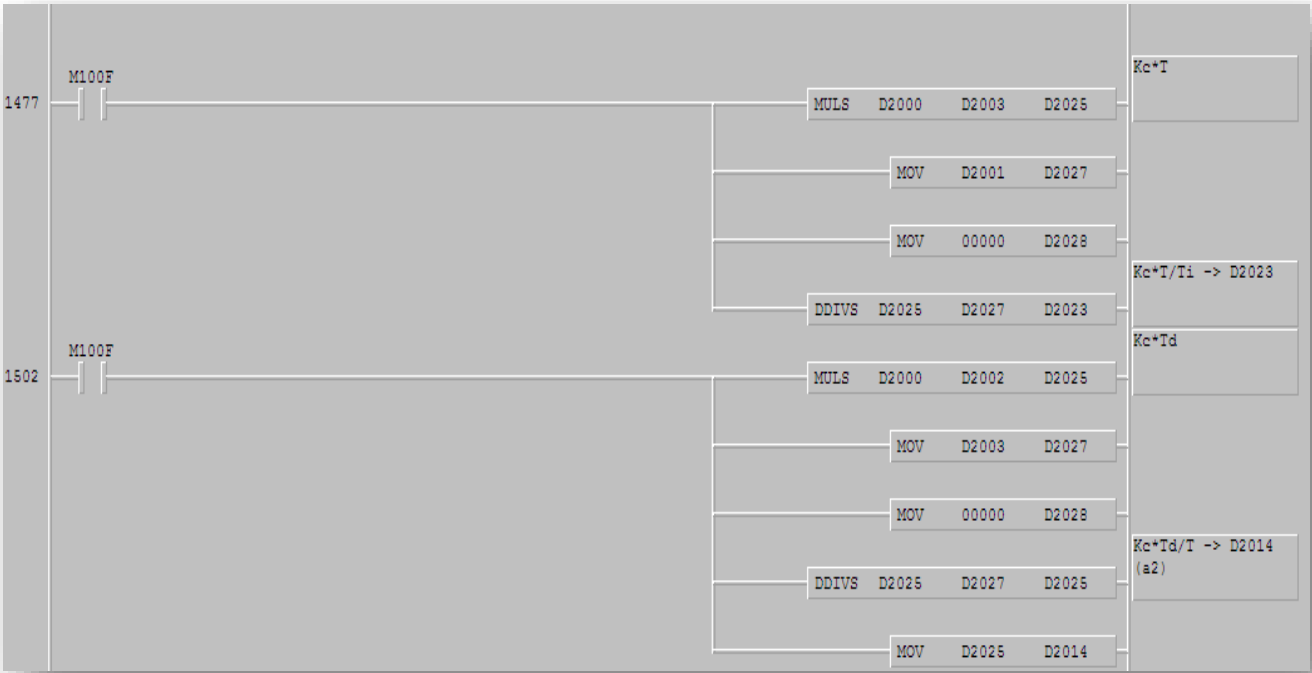
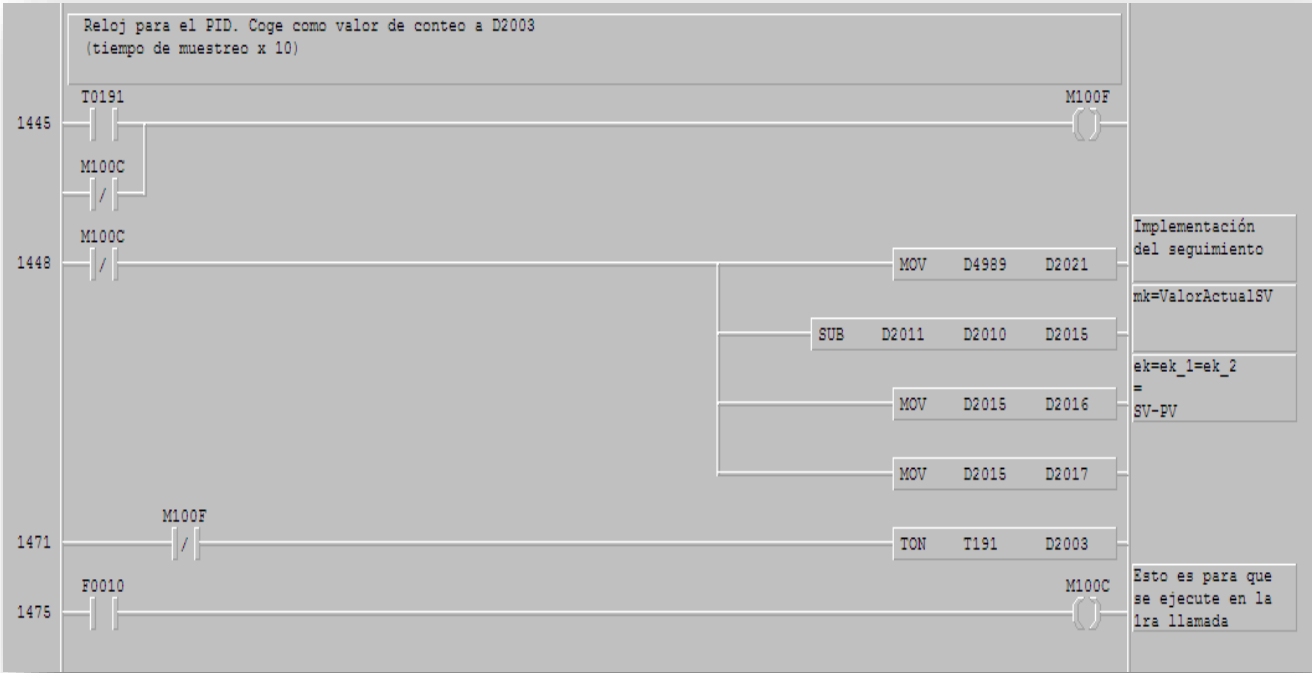
Anexo 2. Pizarra de control del secador



Anexo 3. Subrutina del PID programado.



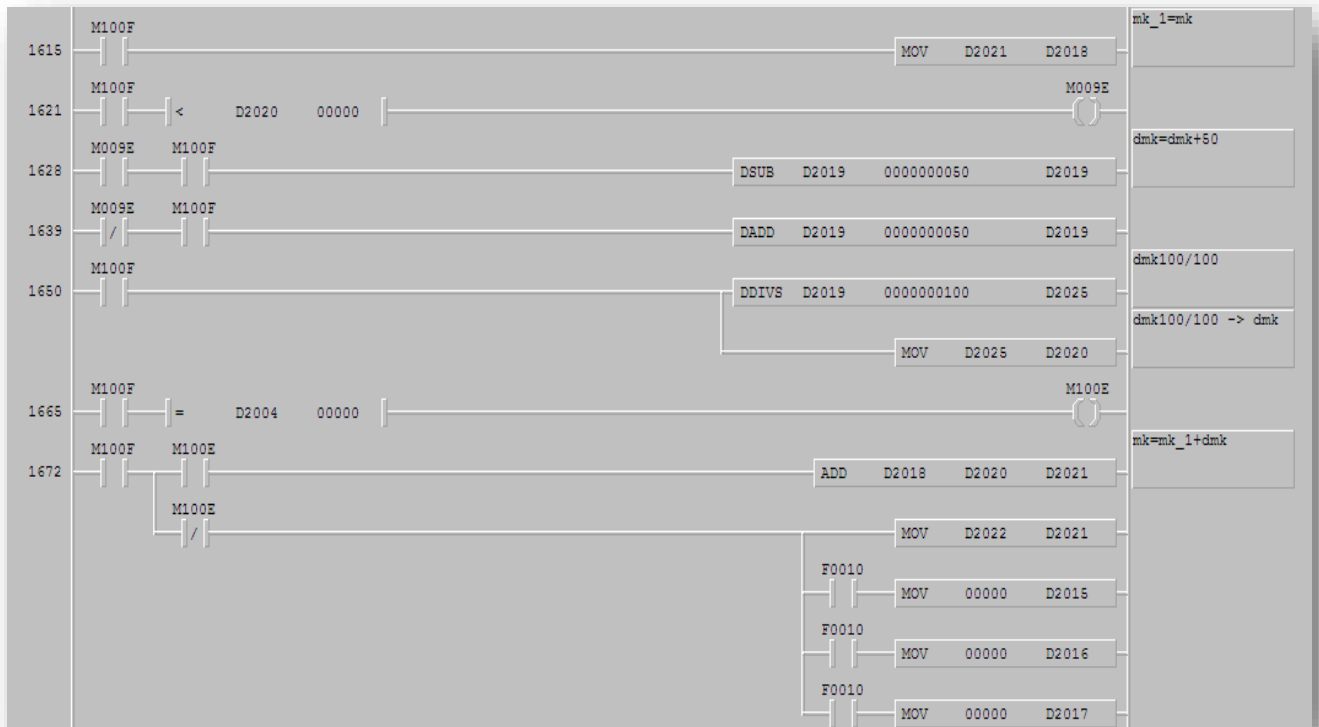
ANEXOS



ANEXOS



ANEXOS



Anexo 4. Mímico del Eros. Secador de bioproductos del CIGB

