

Trabajo de Investigación para estudiantes de Intercambio

**Determinación de un modelo de sistema adecuado para
la automatización de un laboratorio de control de
procesos**

MEMORIA

Autor: Paula Valencia Salazar
Director: Carlos Ocampo-Martínez
Convocatòria: Junio 2022



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

Este proyecto de investigación pretende abordar la automatización de procesos desde una perspectiva distinta al de la ingeniería electrónica. Esto último se pretende implementar, a través del manejo de una metodología detallada y simple, para establecer un modelo adecuado para la automatización de una estación basada en la de un reactor de un sistema que emula un proceso industrial de embotellamiento de bebidas (en esta estación el objetivo principal es llevar el líquido a una temperatura deseada).

El proceso inicia estudiando el sistema a partir de su funcionamiento para así determinar un modelo matemático que lo represente. Este último se valida a partir de unos criterios establecidos y, posteriormente, se implementa en un modelo de *Simulink*, herramienta que será utilizada a lo largo del proyecto para emular funcionamientos reales del sistema.

Posteriormente se procede con la implementación del diseño de un controlador tipo *PID en paralelo* que permita llevar al sistema a temperaturas deseadas teniendo en cuenta los tiempos necesarios para llevar al sistema a una temperatura estable y el error que se genera entre la temperatura deseada y la resultante del ejercicio tienda a cero. Asimismo, se analizan puntos críticos en las respuestas del sistema después de ser sometido a diferentes escenarios. Esto último se lleva a cabo con ayuda de la herramienta *Autotune* disponible en el bloque de *PID* conectado al sistema en *Simulink*.

Después del análisis de las diferentes opciones de control resultantes, se establecen cinco propuestas para el sistema en estudio. La elección de la propuesta final dependerá de las restricciones consideradas para el sistema real, así como de los objetivos de control establecidos en una situación específica. Se invita a que las consideraciones establecidas en la tabla final de las propuestas de control, para cada controlador, sean evaluadas a partir de un interés en específico.

Índice

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. | MARCO TEÓRICO PARA EL ENTENDIMIENTO DEL CONTEXTO | 4 |
| 3. | ESTADO ACTUAL DE LA PROBLEMÁTICA | 13 |
| 4. | PROCEDIMIENTOS LLEVADOS A CABO | 15 |
| 5. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 52 |
| 6. | ESTUDIO ECONÓMICO | 59 |
| 7. | ESTUDIO AMBIENTAL | 60 |
| 8. | CONCLUSIONES | 61 |
| | AGRADECIMIENTOS | 63 |
| | BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 64 |

1. Introducción

El presente trabajo de investigación nace con la idea de disminuir la brecha del entendimiento del mundo de la automatización para aquellos estudiantes que estudian un campo distinto al de la ingeniería electrónica. Esto, principalmente, debido a que hoy en día la automatización es un concepto que se debería manejar y saber llevar a cabo, al menos en términos generales, por los estudiantes de ingenierías en el mundo. Cada vez el mundo está más inmerso en buscar formas de automatizar procesos por medio del diseño de herramientas de control. Por esto mismo, se debería poder ver un poco más de cerca esta gran herramienta. No necesariamente para manejarla de primera mano, sino entender la idea y el concepto tras las máquinas que hoy en día nos rodean. Actualmente la palabra misma ya puede generar, en la mayoría de personas, una sensación de lejanía. Se podría entender que el mundo de la automatización es uno, y que nosotros vivimos en un mundo paralelo, donde no nos concierne directamente. Sin embargo, así como lo fue en su momento el primer ordenador, llegará, muy probablemente, a las manos de todos, en menos tiempo de lo pensado.

Esta temática podría ser abarcada desde múltiples ángulos. En lo que concierne al presente trabajo de investigación, con palabras amigables para cualquier estudiante de ingeniería interesado o cualquier otro individuo que demuestre interés por el estudio de sistemas del mundo real, se estudiará, detalladamente, la representación de un proceso productivo de embotellamiento de bebidas, el cual se encuentra implementado en el laboratorio modular de MPS-PA de Festo®, situado en las instalaciones de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá, Colombia).

Esta instalación está conformada por cuatro estaciones, y cada una representa una parte del proceso productivo. Debido a que el propósito del proyecto es acercar al lector al mundo de la automatización mediante la explicación detallada del proceso de análisis inicial de un sistema de interés, se hará un estudio y explicación general de las cuatro estaciones. Sin embargo, este estudio se enfocará específicamente en la estación del reactor calentador y no en el proceso productivo completo.

Como idea inicial de proyecto se busca, tras realizar la identificación de la planta, encontrar una representación matemática coherente del sistema mediante el análisis del funcionamiento del mismo. Para esto se hará uso de metodologías de análisis de sistemas y de herramientas tecnológicas, como Simulink (Matlab).

Una vez se ha comprobado el modelo del sistema definido, se buscará seguir unos pasos que

lleven a emular una opción de control de la estación del reactor mediante la aplicación de un controlador PID en paralelo, el cual permitirá también evaluar alternativas de controladores P, PI, PD, combinando los parámetros encontrados en un principio. Cabe aclarar que, si bien se trabajará de la mano de algunos profesionales colaboradores de la Pontificia Universidad Javeriana, se busca un enfoque remoto como partícipes de análisis desde la Universidad Politécnica de Cataluña, por lo cual se realizarán, a modo de comprobación, escenarios aleatorios hipotéticos que emulen resultados reales del sistema, para contar con objetivos de referencias numéricas, con las cuales se pueda implementar aproximaciones matemáticas que permitan llegar a dichos resultados establecidos mediante técnicas de control simples.

2. Marco Teórico para el Entendimiento del Contexto

2.1. Automatización hoy en día a nivel industrial y global

Actualmente, la automatización es un concepto inherente a la industria y a las organizaciones a nivel mundial. El principal elemento utilizado para definir la forma como funciona el mundo son los datos. Es esta la razón por la cual su recolección es cada vez más apetecida. Los datos se pueden ver como el nuevo lenguaje de unión mundial, y ahora hay ilimitadas formas de llevar su recolección a cabo. Lo que sí es cierto es que a medida que se encuentran soluciones más eficientes de hacerlo, estas mismas llevan al mundo por nuevos rumbos. Así que se puede ver a la automatización como uno de esos conjuntos de formas de recolección de datos con un uso posterior específico en beneficio de la eficiencia de procesos.

Como tendencias de automatización industrial en 2022, se pueden enmarcar algunas como común denominador de resultados de investigación de profesionales en el área:

La empresa de soluciones tecnológicas Electronicboard (España), por su parte, indica que lo que se ha vivido con la COVID19 ha afectado la forma de trabajo actual. El principal descubrimiento a nivel mundial: continuar trabajando sin estar físicamente presentes. Adicional a esto, se identifican algunas tendencias específicas en la industria:

Monitoreo de condición: cubrir condiciones particulares de una máquina a partir de matrices de sensores para identificar cualquier cambio en la operación de la misma. De esta manera se busca identificar fallas de manera asertiva y así tomar acciones correctivas en el momento oportuno. Asimismo, el camino del manejo de datos es cada vez más amplio y, sobre todo, cuando se logra recolección de los mismos a tiempo real. De esta manera se puede ver el potencial en distintos tipos de análisis, como el de determinar indicadores más precisos como: rendimiento, tiempos de ciclo, horas de funcionamiento, entre otros.

Modernización del mantenimiento predictivo y gemelos digitales: En la automatización industrial se ve un crecimiento en la necesidad de soluciones tecnológicas que simplifiquen el trabajo. Una gran oportunidad de crecimiento es identificada en los procesos de mantenimiento existentes. Las ventajas incluyen una reducción significativa en los costos, tiempo de inactividad de la máquina y los defectos técnicos. Lo que vuelve a esta tecnología más llamativa es el hecho de poder monitorear

actividades en tiempo real y la actuación preventiva oportuna.

Tendencias Big Data: el avance en tecnología indica directamente producción de mayor cantidad de datos, recopilados constantemente y en tiempo real. Esta es reconocida como una de las mayores tendencias del momento debido a su potencialidad. *“Big data permite a las empresas ver exactamente lo que está sucediendo en su empresa minuto a minuto. Luego pueden producir mejores modelos de planificación y pronóstico, lo que, a su vez, mejorará la productividad y las ganancias. En algunos casos, las empresas más grandes pueden agregar los datos de múltiples instalaciones de producción para obtener una imagen más completa de sus operaciones. Estos procesos se pueden mejorar aún más con la inteligencia artificial y el aprendizaje automático.”* (Electronicboard. (2022, Spring 5)

Sostenibilidad: Se identifican nuevos hábitos en fabricantes y consumidores. Entre estos, uno de los más relevantes es el de la consciencia de la vida total tanto del producto como del proceso. La vida útil continúa, incluso, hasta mucho después de dejar de darle uso al mismo, debido a que este únicamente acaba cuando se presenta una transformación en el producto, servicio. De esta manera, se busca minimizar los efectos negativos sobre el medio ambiente. *“Los consumidores de hoy en día son mucho más propensos a comprar productos fabricados con materiales sostenibles de fabricantes de renombre que se toman en serio sus responsabilidades medioambientales”.* (Electronicboard. (2022, Spring 5)

Por su parte HUB, plataforma digital que reúne puntos de actualidad, tendencias y experiencia de profesionales en el sector de atención y experiencia al cliente, reúne puntos en común con Electronicboard. Indica que las tendencias en nuevos métodos de automatización vinculados a procesos en las organizaciones se vienen viendo desde hace unos años y que, actualmente, la situación por la COVID-19 ha logrado, por su parte, acelerar este crecimiento a nivel mundial debido a una necesidad que fue identificada debido a la situación mundial de confinamiento: la dependencia de recursos humanos en trabajo presencial. Esta situación fue vista en las organizaciones como una oportunidad de mejora: maximizar la automatización de los procesos, a medida que sus recursos se lo permitan, y así mantener un plan de contingencia ante cualquier situación venidera, además de volver más eficiente a la organización para poder destinar recursos en otras vertientes. Un claro ejemplo de ello fue la disponibilidad de un nuevo servicio de atención al cliente priorizando medios digitales a modo de respuesta automática por demanda. Asimismo, un gran número de procesos que fueron identificados como tareas

repetitivas automatizables fue llevado a esta nueva tendencia. Las principales ventajas de elevar el grado de automatización en las organizaciones es el hecho de lograr una reducción de errores a un mínimo y aumentar la disponibilidad. Asimismo, personal requerido para desempeñar dichas tareas fue movido a posiciones donde podría agregar mayor valor a la organización.

Dejando el enfoque del servicio al cliente a un lado y, volviendo a la industria, Neil Ballinger, jefe de EMEA del proveedor de piezas de automatización EU-Automotion, define Automatización como agilidad. Explica que las tres principales tendencias que tienen probabilidad más alta de cambiar el curso de la automatización son:

Nativo de la nube: “nuevo enfoque para diseñar y gestionar cargas de trabajo integradas en la nube. Su función principal es descomprimir el software en piezas más manejables y ampliar pequeñas áreas de una infraestructura compleja cuando sea necesario, sin necesidad de una redistribución completa” (*Las tres principales tendencias de automatización en 2022*. (n.d.).)

Plataformas de código bajo: “Las plataformas de automatización de código bajo permiten a los usuarios con pocos conocimientos de codificación automatizar los procesos utilizando interfaces gráficas en lugar de la programación informática tradicional.” Además de permitir la reducción de la mano de obra manual y, en cambio, centrarse en estrategias principales que agreguen valor al crecimiento empresarial. Se indica que esta tendencia ha experimentado un aumento constante y se prevé que represente más del 65% de todas las funciones de desarrollo de aplicaciones para 2024, entre otras predicciones de indicadores de alcance.” (*Las tres principales tendencias de automatización en 2022*. (n.d.).)

Gemelos digitales: “se prevé que más del 70% de los fabricantes los implementen para finales de 2022 a fin de realizar evaluaciones de situaciones y simulaciones de procesos”. (*Las tres principales tendencias de automatización en 2022*. (n.d.).)

Viendo los puntos en común que se mencionan anteriormente, desde distintas perspectivas, se puede afirmar que el mundo de la automatización toma cada vez más potencia. Esto logra resaltar la relevancia del concepto.

2.2. Importancia de fundamentos claros de automatización

A partir de los fundamentos de automatización se puede trabajar actualmente para aumentar la productividad en cualquier tipo de procesos: objetivo transversal en cualquier organización. Es por esto que es un tema esencial hoy en día para la mayoría de las empresas al momento de buscar nuevos integrantes en las mismas, o para cualquier tarea que pueda desempeñarse en un cargo. “Los **fundamentos de automatización** continúan evolucionando día tras día. La influencia de la tecnología cada vez es más inminente, ya no solo en los procesos de producción, sino que ha llegado a abarcar otras áreas del proceso de comercialización” (Euroinnova Business School. (2021, July 27)).

Principales objetivos de la automatización en procesos industriales y la importancia del nivel de detalle en su fundamento

Teniendo en cuenta que el principal objetivo de la automatización en procesos industriales está relacionado con la realización de acciones correctivas y de mejoras en los procesos de trabajo buscando minimizar fallas y costos, y maximizar optimización de recursos mediante la generación de comportamiento dinámicos y controlados con ayuda de tecnología, se entiende la importancia del establecimiento adecuado de los detalles necesarios para dicho fin. Cabe resaltar la importancia de la identificación correcta de las bases matemáticas para reducir el error en los resultados al máximo. A mayor precisión en el análisis de los fundamentos para cada proceso de automatización, se llegará a resultados más precisos, lo que se verá reflejado en pro del cumplimiento de los objetivos iniciales. (Automatización Industrial (2021, March 9)).

Entendiendo el contexto actual de la automatización a nivel mundial y de la importancia de la misma, se hace ahora énfasis en el alcance del presente proyecto de investigación a nivel práctico, por lo que se procede a estudiar la idea del espacio de trabajo involucrado:

2.3. Estaciones de Festo (Sistema real estudiado para la aplicación del proyecto)



Imagen 1. Representación estaciones MPS PA. Tomada de (ADIRO automatisierungstechnik GmbH - MPS® PA stations).

La estación de trabajo compacta MPS PA con tramos de regulación de nivel, caudal, presión y temperatura funciona a partir de cuatro estaciones, o tramos, los cuales pueden funcionar de forma individual, y pueden ser representadas a través de sistemas de tanques interactuantes o independientes. Estos buscan representar un proceso productivo que pueda ser manipulable con fines académicos.

El tramo de regulación de nivel y de caudal pueden configurarse como regulación en cascada con un controlador adecuado. El diseño de los detectores y actuadores permite experimentar con tipos de reguladores tanto continuos (p. ej., B, P, I, PI, PID) como discontinuos (p. ej., reguladores de dos puntos). *(Estación de trabajo compacta MPS PA con tramos de regulación de nivel, caudal, presión y temperatura)*

2.4. Estación modular del Reactor

Se elige la estación del reactor para implementar el proyecto de investigación presente, pues es donde se pudieron ver mayores oportunidades de representación cercana debido a las variables de interés en su estudio (voltaje y temperatura). Al ser un proceso de calentamiento, se deben tener en cuenta, al momento de tomar decisiones, las sustancias o elementos con los que se pretende trabajar, así como materiales involucrados en el proceso, pues de sus propiedades y características dependen las restricciones a tener en cuenta al momento de establecer modelos y, asimismo, generar resultados.

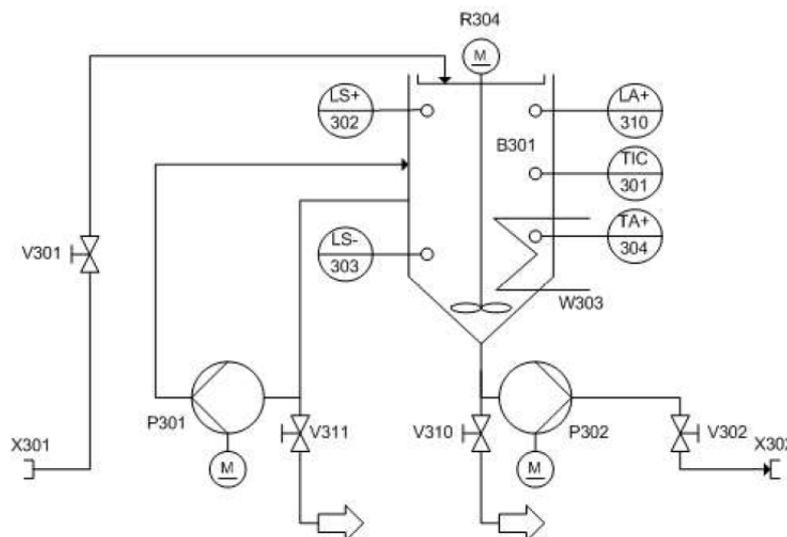


Imagen 2. Fronteras establecidas para el estudio. Diagrama P&ID Estación Reactor. Tomado de Documento con especificaciones estación Reactor

2.5. Introducción al Control y PID (Proporcional – Integral – Derivativo)

La base de cualquier tipo de control fundamenta sus bases, principalmente, en el concepto de **retroalimentación**.

Para entender el concepto, primero vemos cómo el sistema planteado funciona dando un primer recorrido por el mismo, de inicio a fin, a partir de señales de entrada y variables definidas que darán un resultado al final del ejercicio. Este sistema sería el conocido en control como un sistema en **lazo abierto** pues, funciona únicamente con las instrucciones dadas antes de ponerlo a correr, en $t=0$. Es necesario que el sistema funcione en este modo pues así se asegurará la viabilidad del mismo y así se podrá proceder a ponerlo en otro tipo de escenarios.

Volviendo al entendimiento del término de retroalimentación, esta representa un “feedback”, o información que, en vez de salir al final del sistema y quedarse con esa respuesta, vuelve al inicio del recorrido para indicarle al sistema qué tipo de respuesta se está generando y, de esta manera, el sistema puede tomar decisiones para lograr llevar esa respuesta al valor deseado (referencia). El elemento encargado de tomar las decisiones necesarias para llevar al sistema a generar las respuestas deseadas es el controlador. Este involucra entonces el elemento de “control”.

Partiendo de esta idea, existen diversos métodos de diseño que permiten que el controlador

actúe de una u otra manera. Estos elementos de diseño se ven reflejados en la toma de decisiones al momento del funcionamiento del sistema. Sin embargo, la mayoría de ellos requieren un conocimiento exhaustivo en temas avanzados de sistemas de control. Esto último, entonces, no se involucra a lo largo de este proyecto de investigación, por lo que, en este caso, se hará énfasis en herramientas que permitan el diseño de un controlador de una forma más intuitiva y aplicada. Específicamente: Controlador **PID** por medio de **Autotune**, disponible en Simulink-Matlab. Este último nos permitirá definir los parámetros necesarios para dar como resultado el diseño de un controlador que alcance los objetivos propuestos para el sistema en estudio.

2.6. Los controladores PID (Proporcional – Integral – Derivativo):

Especificaciones requeridas enfocadas con el sistema en estudio del presente proyecto:

- **Error e(t):** comparación del valor de salida del sistema con la referencia.
- **Constantes de tiempo (Tao):** Establece el tiempo en que el sistema alcanza una temperatura
- **Tiempos de subida (ts):** Tiempo que toma el sistema en llegar a la temperatura de régimen permanente por primera vez.
- **Oscilación en la respuesta:** Movimiento de la respuesta del sistema alrededor de la línea de temperatura en régimen permanente antes de coincidir con la misma.
- **Set Point:** Temperatura de referencia establecida arbitrariamente que se pretende sea alcanzada por el sistema controlado

Control Proporcional

Genera una señal de control proporcional al error. Actúa como un amplificador de ganancia. Busca darle forma a la curva de respuesta de la variable que está siendo controlada. La ecuación que lo representa y que también es utilizada por el bloque PID en Simulink es:

$$u(t) = e(t) * K_p,$$

donde

$u(t) \rightarrow$ señal de control

$K_p \rightarrow$ ganancia proporcional (parámetro)

Control Integral

Genera una señal de control integral. Se basa en la dinámica del error en el tiempo (histórico) e intenta mantener este mismo dinamismo. Se denomina como un sistema con memoria y se modifica a una velocidad proporcional a la del error. De esta manera, su implementación tiende a producir oscilaciones en las respuestas. Sin embargo, su principal objetivo es disminuir el efecto de error contrarrestando su efecto. No se suele usar por sí solo, sino que generalmente se encuentra combinado con P o D. Generalmente se representa por:

$$u(t) = K_i \int e(t) dt$$

donde

$K_i \rightarrow$ Ganancia integral (parámetro)

Control Derivativo

La salida del controlador es proporcional a la relación de cambio con respecto al tiempo de la señal de error. Busca principalmente disminuir el tiempo de error, anticipando el cambio del mismo y anticipando correcciones adecuadas y oportunas (acción predictiva). Al igual que I, D no suele utilizarse sólo, pues, en estado estacionario la respuesta sería cero al ser el resultado de una derivada que suele representarse como:

$$u(t) = K_d \frac{d(e(t))}{dt}$$

donde

$K_d \rightarrow$ Ganancia derivativa (parámetro)

Control PID

Combinando las tres acciones (P, I, D), se obtiene un control PID que se considera uno muy completo, pues logra abarcar tanto la reducción en errores en estado estacionario como las tendencias oscilatorias en lazo cerrado. De esta manera, se puede decir que un controlador PID logra, a partir de la memoria de la dinámica del sistema, predecir cambios comportamentales futuros del error, tomando acciones correctivas en el momento oportuno enviándole señales en

cada instante de tiempo al sistema. Para esto se deben escoger adecuadamente los parámetros descritos en P, I, D, para optimizar el funcionamiento de la combinatoria, eliminando error estacionario, mejorando la estabilidad y aumentando la rapidez de respuesta.

Bloque PID en Simulink

Por medio del bloque PID Controller en Simulink se pueden establecer los parámetros para generar control a través de PID en el sistema. En este también se pueden activar o desactivar los que se consideren necesarios para la combinación deseada de PID en cada caso.

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Imagen 3. Fórmula utilizada por PID Controller. Tomada de la interfaz del controlador PID en Simulink

PID Autotune

Si bien el método de control PID se considera uno muy completo, así mismo se considera su complejidad. Por esta razón, el *PID autotune*, disponible dentro del bloque PID en Simulink, permite, de una manera más intuitiva, establecer los parámetros del controlador. Este funcionamiento se dará a conocer en la metodología de diseño llevada a cabo para el establecimiento de los parámetros del controlador en el sistema de interés.

3. Estado actual de la problemática

En la Pontificia Universidad Javeriana se cuenta con herramientas de estudio de ingeniería en distintos campos. Específicamente con interés de este proyecto: laboratorios que permiten interactuar con el mundo de la automatización. También se busca que los estudiantes de ingeniería industrial cuenten con conocimientos del funcionamiento de la industria, en temáticas específicas de la ciencia, manejo de procesos, entre otros. Sin embargo, puede que el camino que conecta estos conocimientos y herramientas con el mundo real sea difuso. Por esta razón, mediante este proyecto, se busca aumentar la visibilidad de conexión entre lo teórico y lo real, tomando como ejemplo un montaje físico en uno de los laboratorios y, mediante el estudio teórico de la dinámica del mismo, se pueda evidenciar el campo de acción real que se puede llegar a tener. Se pretende también que, posteriormente, los estudiantes puedan diseñar sus propios caminos hacia el control de cualquier sistema que se presente, tomando como base los procesos del laboratorio modular de MPS-PA de Festo®.

En las instalaciones de la universidad se cuenta actualmente con un sistema que permite al estudiante o usuario del mismo establecer objetivos de producción (nivel de llenado, temperatura, entre otros) y el sistema, de manera automática, mediante un controlador ya establecido por el fabricante (MES) llevará a que el proceso cumpla con los resultados esperados en un tiempo determinado. De esta manera, los estudiantes pueden acercarse conceptualmente al funcionamiento de la industria, mas no al proceso de control que lleva el sistema detrás del mismo. Por esto, se pretende determinar una de las infinitas formas de llegar a un nuevo método de control a partir de la propia naturaleza del sistema “su funcionamiento”.

Por ello, es indispensable determinar un modelo que vaya lo más cercano posible a la realidad, teniendo en cuenta que este también debería poder ser fácilmente manipulable, con variables y parámetros claros y poco complejos de identificar en la práctica para así permitir el objetivo final: el control del sistema a partir del modelo. Es decir, una vez se caracteriza la planta, se debe establecer un compromiso entre simplicidad y precisión, pues estas son excluyentes entre sí en los extremos. Esto último indica que, si un modelo es muy simple, será muy poco preciso con respecto a la realidad, pues en este se ignorarían alta cantidad de dinámicas inherentes al sistema que afectarían con certeza al funcionamiento real.

4. Procedimientos llevados a cabo

El procedimiento a llevar a cabo parte en entender al sistema de manera holística, abarcándolo de afuera hacia adentro. Para ello, se hace referencia al objetivo de las estaciones que representan al proceso productivo: llenado de envases con unas características específicas. A partir de este se entra a estudiar cada una de las estaciones y, por ende, se identifica qué variables maneja cada una de ellas.

Como se mencionaba anteriormente, se elige la estación del reactor, pues es donde se pudieron ver mayores oportunidades de representación cercana teniendo en cuenta el posterior desarrollo del modelo y análisis en un nivel básico de entendimiento de automatización y control. Esta estación pretende, de manera general, controlar la temperatura del fluido entrante, llevándola a un punto deseado y, así, pasarla a la siguiente estación, para la cual deberá cumplir una funcionalidad con esa temperatura dada.

EL primer paso en el análisis del sistema es entender las fronteras de interés del mismo para determinar qué variables, parámetros y suposiciones se pueden tener en cuenta, a partir de los límites establecidos, que permitirán determinar el alcance del modelo a nivel del proceso.

Identificación de las fronteras del sistema

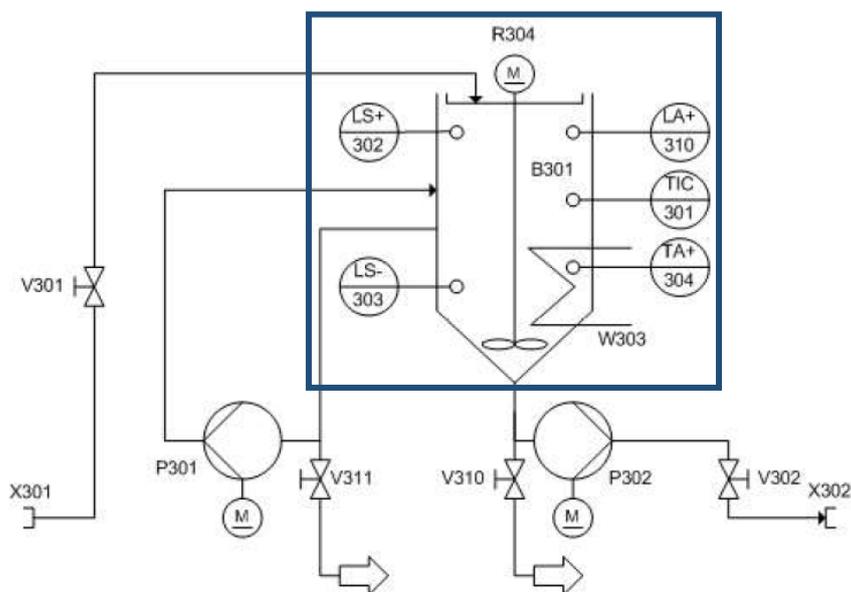


Imagen 4. Fronteras establecidas para el estudio. Diagrama P&ID Estación Reactor. Tomado de Documento con especificaciones estación Reactor

El cuadro azul sobre el diagrama P&ID de la estación representa la frontera establecida. En ella se entiende que lo que está dentro del recuadro, es el sistema de interés por lo que, todo elemento que no haya quedado dentro, no será considerado en el análisis matemático. Este ejercicio de establecer la frontera se realiza con el propósito de definir el sistema de interés.

El proceso genérico de interés (Estación del reactor) se puede ver, entonces, representado en la *Figura 1*:



Figura 1. Proceso genérico de interés.

Para ello se tendrán en cuenta los elementos involucrados en el siguiente esquema reducido del sistema mostrado en la *Figura 2*:

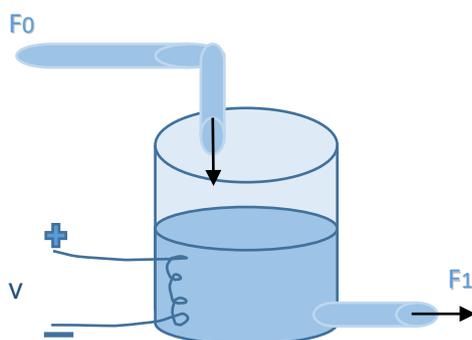


Figura 2. Esquema de sistema de interés.

El siguiente paso en el análisis del sistema es transferir conocimientos básicos científicos a colación, mediante los balances de materia y energía.

Balance de Materia

Partiendo de la ecuación general del balance de materia, se tiene:

$$G + E = S + A$$

donde:

G → Generación,

E → Entradas,

S → Salidas,

A → Acumulación,

Debido a que es un proceso simple donde no se cuenta con reacciones químicas y donde todo el flujo que entra por el punto inicial, sale por el punto final, se entiende que:

$$G = A = 0$$

Por lo que:

$$E = S$$

Debido a que se mantiene un volumen constante de agua en el tanque a lo largo del tiempo, se entiende entonces que el nivel de agua nunca cambia, por lo que:

$$A \frac{dh}{dt} = \frac{dV}{dt} = 0 = S - E \rightarrow S = E$$

donde:

$V \rightarrow$ Volumen,

$t \rightarrow$ tiempo,

$A' \rightarrow$ Área del tanque,

$h \rightarrow$ altura del nivel de agua en el tanque

Debido a este proceso, finalmente se obtiene:

$$F_0 = F_1$$

Balance de Energía

Partiendo de la ecuación general del balance de energía, donde no hay reacción química y se asumen propiedades constantes, se tiene:

$$G + E = S + A$$

donde:

$G \rightarrow$ Generación,

$E \rightarrow$ Entradas,

$S \rightarrow$ Salidas,

$A \rightarrow$ Acumulación,

Y, debido a la ausencia de reacción química, se entiende la generación como nula:

$$G = 0$$

$$E = S + A \rightarrow A = E - S$$

Ahora se debe tener en cuenta que se acumula energía en el proceso de calentamiento del agua, por lo que:

$$\frac{dE}{dt} = A$$

donde

$E \rightarrow$ Energía ,

De esta manera, se entiende que la energía se puede determinar en general como:

$$E = m * H$$

donde

$H \rightarrow$ Entalpía,

$m \rightarrow$ Masa,

La entalpía se puede determinar como:

$$H = \int_{T_R}^T C_p * T dT$$

donde

$T \rightarrow$ Temperatura resultante

$T_R \rightarrow$ Temperatura de referencia, se puede tomar como nula

$$T_R = 0$$

$C_p \rightarrow$ Calor específico (agua)

Por lo que, reorganizando, se tiene:

$$H = C_p * \int_{T_R}^T T dT = C_p * (T - T_R) = C_p * T$$

$$E = m * C_p * T$$

Ahora, se sabe que en la estación se maneja agua como fluido, por lo que se deja la masa en función de la densidad y el volumen:

$$\frac{m}{V} = \rho$$

donde:

$\rho \rightarrow$ densidad,

Y, de esta manera:

$$E = \rho * V * C_p * T$$

Por lo que:

$$\frac{d(\rho * V * C_p * T)}{dt} = E - S$$

Entendiendo que la **E** corresponde a las entradas (representadas en la ecuación con signo positivo) y la **S** a las salidas (representadas en la ecuación con signo negativas). Por lo que:

$$\frac{d(\rho * V * C_p * T)}{dt} = (\rho * F_0 * C_p * T_0) + (Q) - (\rho * F_1 * C_p * T_1) \quad ,$$

donde:

$(\rho * F_0 * C_p * T_0) \rightarrow$ flujo de entrada en términos de energía (F0 es flujo volumétrico)

$Q \rightarrow$ Calor añadido al sistema

$(\rho * F_1 * C_p * T_1) \rightarrow$ flujo de salida en términos de energía (F1 es flujo volumétrico)

Ahora, recapitulando, debido a los balances de materia y energía, se tiene:

$$F_0 = F_1 \quad (1)$$

$$\frac{d(\rho * V * C_p * T)}{dt} = (\rho * F_0 * C_p * T_0) + (Q) - (\rho * F_1 * C_p * T_1) \quad (2)$$

Ahora, reordenando (1) en (2) y factorizando términos se tiene, finalmente:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V} (T_0 - T_1) + \frac{Q}{V * \rho * C_p} \quad (3)$$

Es en este punto donde surge la pregunta, ¿qué es Q?, Q se vuelve la fuente de energía calorífica del sistema, que se entiende como la potencia añadida al calentador que está conectado al tanque. A través de ella, la resistencia es la encargada de convertir la energía eléctrica en calor. Esto nos indica que la potencia es directamente proporcional a la resistencia.

$$P = R * I^2$$

donde

I → Corriente

R → Resistencia

P → Potencia

La corriente se puede describir como:

$$I = \frac{v}{R}$$

donde

v → voltaje o tensión de la fuente

Por lo que, reescribiendo, para obtener en el modelo principal el manejo directo de la variable independiente: voltaje, se tiene:

$$P(t) = \frac{v^2(t)}{R} \quad (4)$$

Y así, al tener $P(t) = Q$, se tiene, en la ecuación del modelo:

Modelo Resultante donde las entradas arbitrarias de voltaje aplicadas al modelo a lazo

abierto servirán para realizar una caracterización de la planta y así conocer sus curvas de funcionamiento/respuesta. Esto se pretende cumplir haciendo seguimiento al **comportamiento de la temperatura en el tiempo:**

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V} (T_0 - T_1) + \frac{Qv^2(t)}{R \cdot V \cdot \rho \cdot C_p} \quad (5)$$

Supuestos del modelo

- El volumen de líquido en tanque se mantiene constante ($dV/dt = 0$), por lo que el flujo de entrada y de salida tienen el mismo valor constante, el cual es arbitrario y depende del usuario, respetando las limitaciones de los instrumentos y de los elementos que interactúan para permitir dicho flujo, como lo son las válvulas a la entrada y a la salida del sistema y sus respectivas resistencias asociadas.
- No se interactúa con las bombas (en un inicio no hay recirculación ni interacción con la siguiente estación donde se necesite activar la bomba P302), por lo que la estación es independiente y se respetan los límites establecidos.
- Se mantiene activo el agitador para así suponer que el aumento de temperatura en el tiempo en cualquier punto del tanque se comporta igual (calentamiento homogéneo a lo largo del volumen).

Tabla de variables y parámetros

| n° | Variables | | Parámetros | | |
|----|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|--|----------------------|
| | Nombre | Unidades | Nombre | Valor | Unidades |
| 1 | Voltaje (v) | Voltios (v) | Flujo (F) | Arbitrario (depende de la prueba) | (m ³ /s) |
| 2 | Temperatura salida (T ₁) | Grados Centígrados (°C) | Volumen agua a calentar (V) | Arbitrario (depende de la prueba) | (m ³) |
| 3 | - | - | Temperatura inicial (T ₀) | Temperatura ambiente promedio Bogotá-Colombia (20) | (°C) |
| 4 | - | - | Densidad agua | 1000 | (Kg/m ³) |
| 5 | - | - | Calor específico agua | 4186 | (J/Kg°C) |
| 6 | - | - | Resistencia Calentador | 2,5 | Ohmios |

Se procede ahora a hacer uso de la herramienta Simulink de Matlab la cual es descrita como un “*entorno de diagramas de bloque que se utiliza para diseñar sistemas con modelos multidominio, simular antes de implementar en hardware y desplegar sin necesidad de escribir código*” (Simulink. (n.d.).)

De la mano de esta herramienta se buscará emular un entorno de aprendizaje práctico que permita desarrollar escenarios cercanos a la realidad y así poder desarrollar el proyecto con un

margen de error menor. Esto último, sin embargo, sólo se podrá comprobar si se le da continuidad al proyecto posteriormente en los laboratorios en estudio de MPS-PA de Festo®. Para lo que concierne al presente proyecto, en primera instancia se buscará llegar a resultados coherentes, introduciendo valores realistas, que permitan ver si el modelo es apropiado para el ejercicio.

Teniendo en cuenta que al final del ejercicio se pretende contar con un controlador adecuado para el sistema, el cual le proporcionará distintos valores de voltaje al calentador de forma continua para que la temperatura del agua se convierta en la especificada por la referencia, se decide, a modo de experimento, introducir en el modelo a lazo cerrado, tres valores distintos de potencia al calentador en diferentes momentos (para emular un funcionamiento del sistema al cual se le proporciona tensión en distintos momentos), teniendo en cuenta que el primer valor que se introduce es en el segundo cero ($t=0$), y los posteriores se sumarán al valor anterior, por lo que se deberá jugar con la contrarresta de valores de potencia en el valor final del ejercicio. Adicional a esto, se debe tener en cuenta que, antes de agregar una nueva tensión al sistema, este deberá haber llegado, idealmente, a su estado de temperatura estacionario para el valor previo de tensión dada. Debido a esto, se establecen intervalos de tiempo que permitan que cada carga lleve al sistema a dicho punto antes de realizar cualquier cambio para no alterar el comportamiento del sistema con una información inicial, y que, en cambio, se permita entender el cambio real una vez se haya llegado a un estado estable (a la temperatura esperada en condiciones dadas y con el valor de voltaje añadido). Cabe aclarar que cada voltaje está asociado a una temperatura esperada en determinadas condiciones.

Asimismo, se pretende lograr distintos escenarios, haciendo que el sistema funcione con flujos más grandes o más pequeños, para entender puntos adicionales en la validación del modelo, pues este no podrá, en esta investigación, ser comparado con el sistema real, sino que se comparará con una lógica propuesta de lo que se esperaría en un escenario real. Por esta razón, se permite hacer cambios arbitrarios en los valores del flujo, acción que no necesariamente se podría hacer en el laboratorio, debido a las limitaciones de las válvulas, bombas y tuberías de entrada y salida.

Cabe aclarar que, si bien no se tendrán datos reales del laboratorio, sí se intentará mantener los valores a elegir dentro de los rangos establecidos para cada parámetro dado por el sistema en estudio. Estos rangos dependen de las capacidades de los componentes, principalmente.

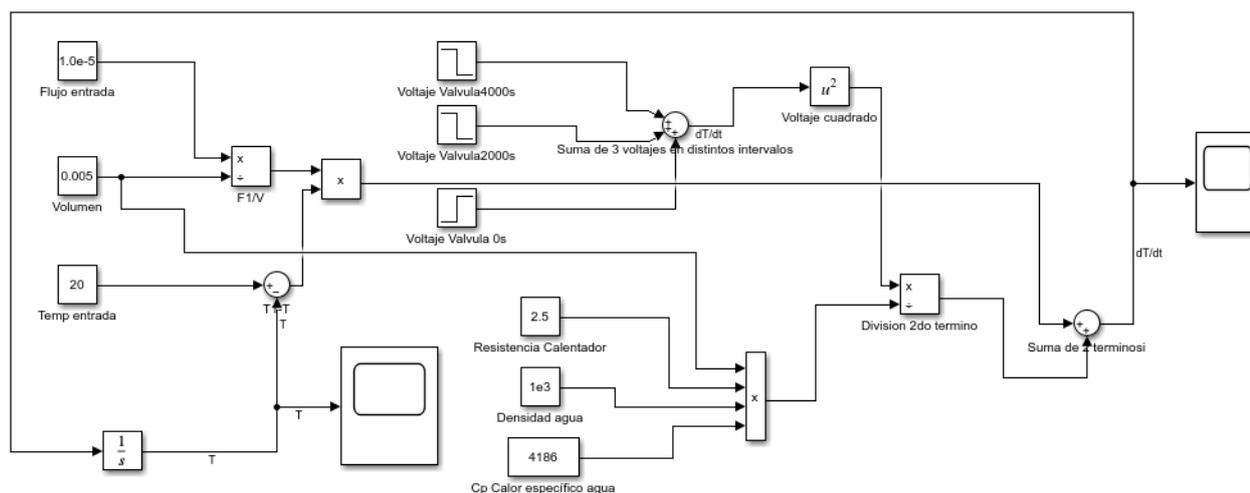


Figura 3. Modelo resultante programado en Simulink.

El modelo establecido cuenta con dos vistas “Scopes”, las cuales permiten ver dos escenarios:

El primero, denominado dT/dt , muestra, de manera continua, las desviaciones de los valores de la temperatura en el tiempo con respecto a la temperatura en el instante inmediatamente anterior ($t-1$). Si la curva se encuentra por encima de la referencia ($dT/dt=0$, o sin cambio) significa que hubo un aumento de la temperatura en el tiempo. En cambio, si la curva se encuentra por debajo de la referencia, significa que hubo una disminución en la temperatura.

El segundo, denominado T, describe, de forma continua, el comportamiento de la temperatura en el tiempo.

Mediante los Scoop previamente mencionados se podrán observar las gráficas que permitirán comprobar la validez del modelo.

Comprobación de la validez del modelo a partir del establecimiento de diferentes escenarios

Como método escogido para determinar el valor de referencia del valor del flujo que entra y sale del sistema se escoge uno experimental, de simple ejecución: Las primeras pruebas se harán con un flujo de valor ($1.0e-5$), en metros cúbicos, pues es un valor determinado en el marco de un escenario común del día a día por cualquier persona. A modo de práctica se determinó el valor a partir del siguiente escenario: Desocupar una botella de agua de 500ml de manera constante y con poca inclinación, de tal manera que el flujo permanezca sin

turbulencia a simple vista.

Este experimento tomó alrededor de 20 segundos. Al hacer la conversión de medidas y, asumiendo comportamiento lineal, se puede ver cómo 1 litro de agua podría ser desocupado entonces en 40 segundos y, tomando como referencia que 1 metro cúbico de agua son 1000 litros, se llega fácilmente al valor establecido para las primeras pruebas. Esto se hace debido a que no se tienen valores reales de referencia de flujos dados en el contexto real, por lo que se toma una botella de 500ml estándar que puede reflejar la tubería del sistema debido al tamaño similar (sin hacer cálculos exactos de comparación).

Ahora se procede a la realización de seis pruebas de validación en Simulink para, posteriormente, analizar los resultados. Cada prueba tendrá sus tablas donde se indicarán los valores utilizados para la misma.

Prueba 1 - Tiempo: 7500s

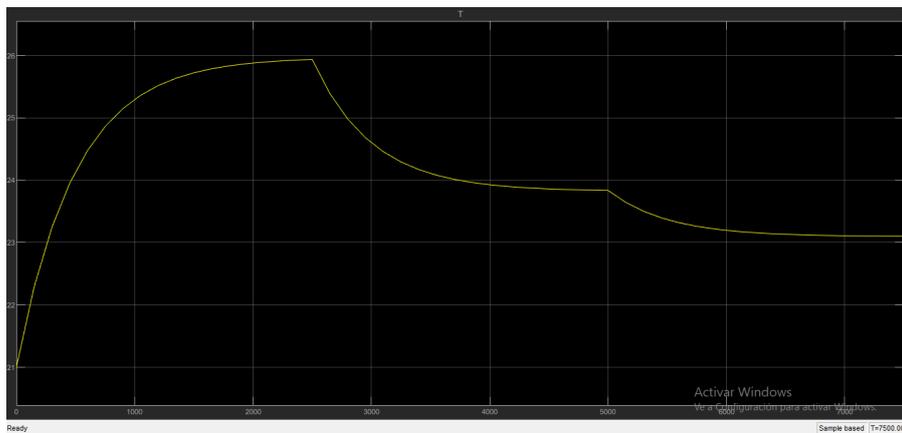
Tabla 2. Valores tensión prueba 1.

| Segundo de entrada voltaje | <u>Valores escalón momento inicial intervalo (v) – Entrada analógica</u> |
|-----------------------------------|---|
| 0 | 0...10 |
| 2500 | 10...5 |
| 5000 | 5...3 |

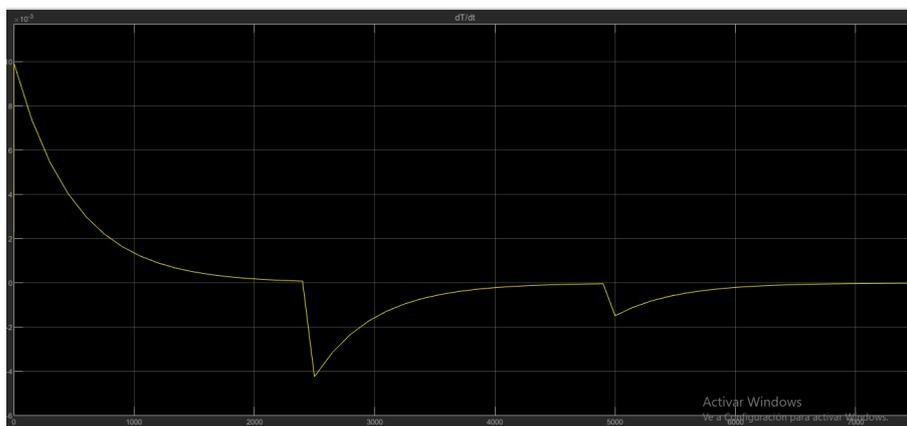
Tabla 3. Valores parámetros prueba 1.

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|--------------------------|
| Flujo (F) | 1e-5 (m ³ /s) |
| Volumen agua a calentar (V) | 0,005 (m ³) |

Scope T



Scope dT/dt



Prueba 2 - Tiempo 9000s

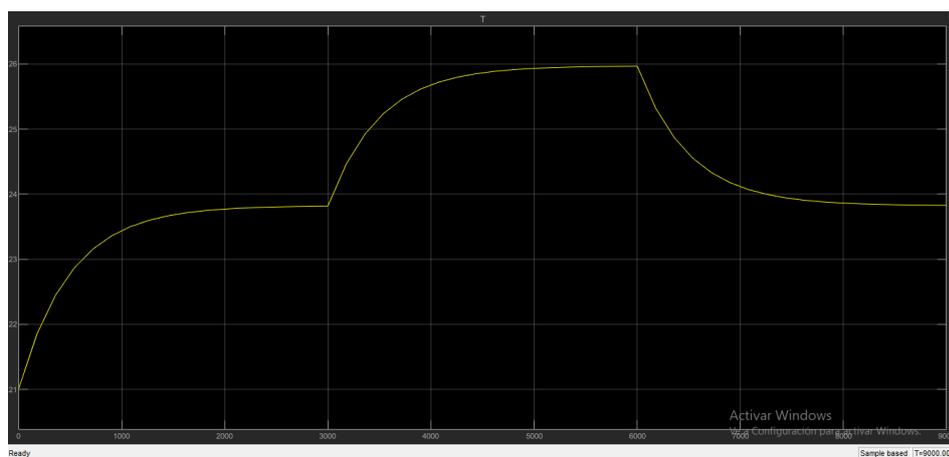
Tabla 4. Valores tensión prueba 1.

| Segundo de entrada voltaje | <u>Valores escalón momento inicial intervalo (v) – Entrada analógica</u> |
|----------------------------|--|
| 0 | 0...5 |
| 3000 | 5...10 |
| 6000 | 10...5 |

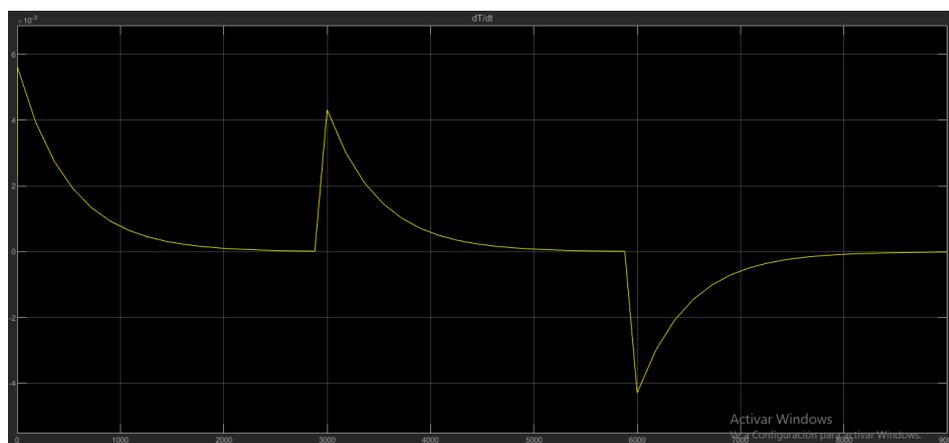
Tabla 5. Valores parámetros prueba 1.

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|----------------------------|
| Flujo (F) | $1e-5$ (m ³ /s) |
| Volumen agua a calentar (V) | 0,005 (m ³) |

Scope T



Scope dT/dt



Prueba 3 - Tiempo 9000s

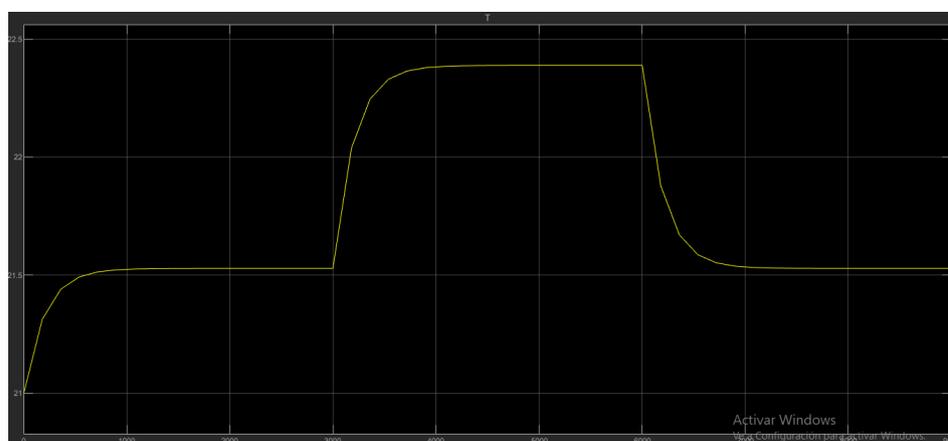
Tabla 6. Valores tensión prueba 1.

| Segundo de entrada voltaje | <u>Valores escalón momento inicial intervalo (v) – Entrada analógica</u> |
|----------------------------|--|
| 0 | 0...5 |
| 3000 | 5...10 |
| 6000 | 10...5 |

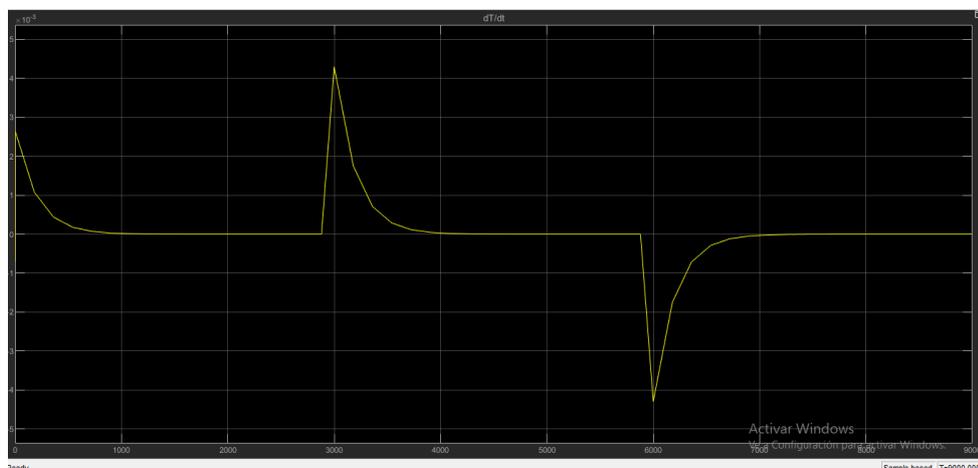
Tabla 7. Valores parámetros prueba 1.

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|----------------------------|
| Flujo (F) | 2.5e-5 (m ³ /s) |
| Volumen agua a calentar (V) | 0,005 (m ³) |

Scope T



Scope dT/dt



Prueba 4 - Tiempo 9000s

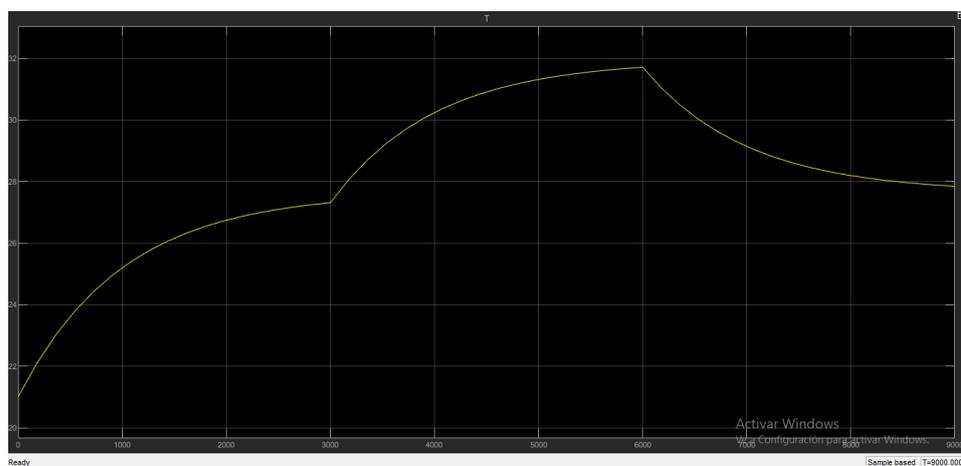
Tabla 8. Valores tensión prueba 1.

| Segundo de entrada voltaje | Valores escalón momento inicial intervalo (v) – Entrada analógica |
|-----------------------------------|--|
| 0 | 0...5 |
| 3000 | 5...10 |
| 6000 | 10...5 |

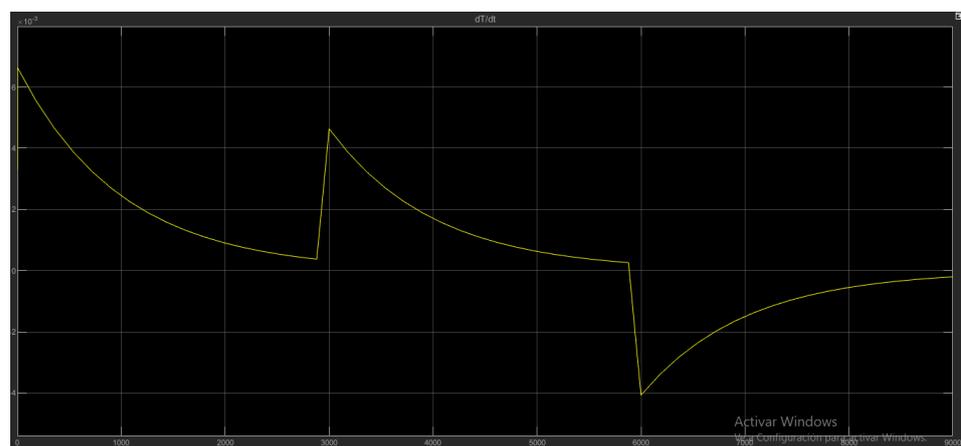
Tabla 9. Valores parámetros prueba 1.

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|----------------------------|
| Flujo (F) | 0.5e-5 (m ³ /s) |
| Volumen agua a calentar (V) | 0,005 (m ³) |

Scope T



Scope dT/dt



Prueba 5 - Tiempo 9000s

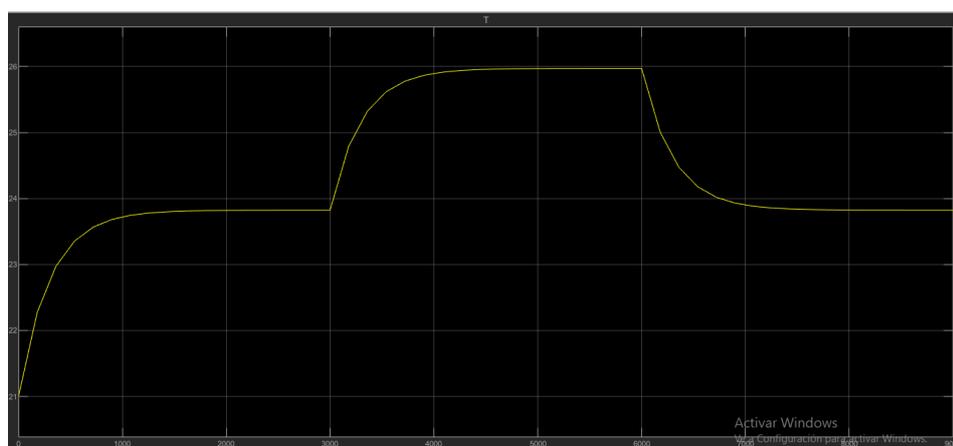
Tabla 10. Valores tensión prueba 1.

| Segundo de entrada voltaje | <u>Valores escalón momento inicial intervalo (v) – Entrada analógica</u> |
|----------------------------|---|
| 0 | 0...5 |
| 3000 | 5...10 |
| 6000 | 10...5 |

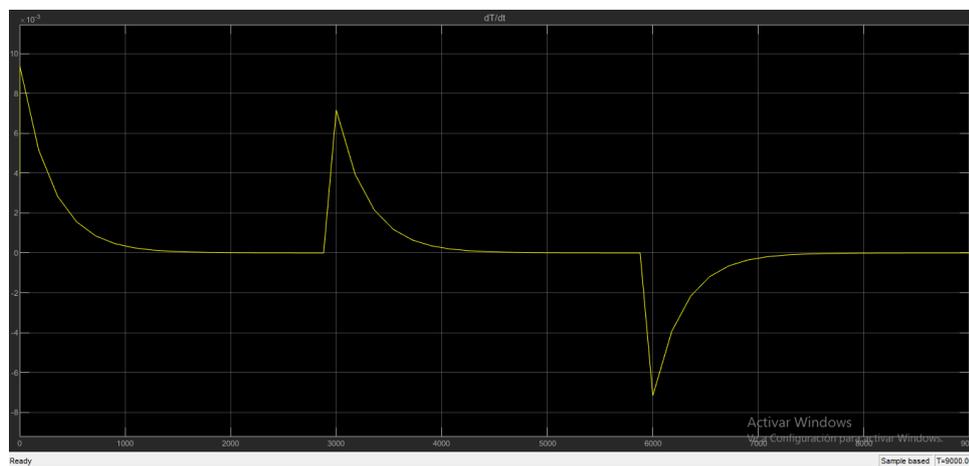
Tabla 11. Valores parámetros prueba 1.

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|----------------------------|
| Flujo (F) | $1e-5$ (m ³ /s) |
| Volumen agua a calentar (V) | 0,003 (m ³) |

Scope T



Scope dT/dt



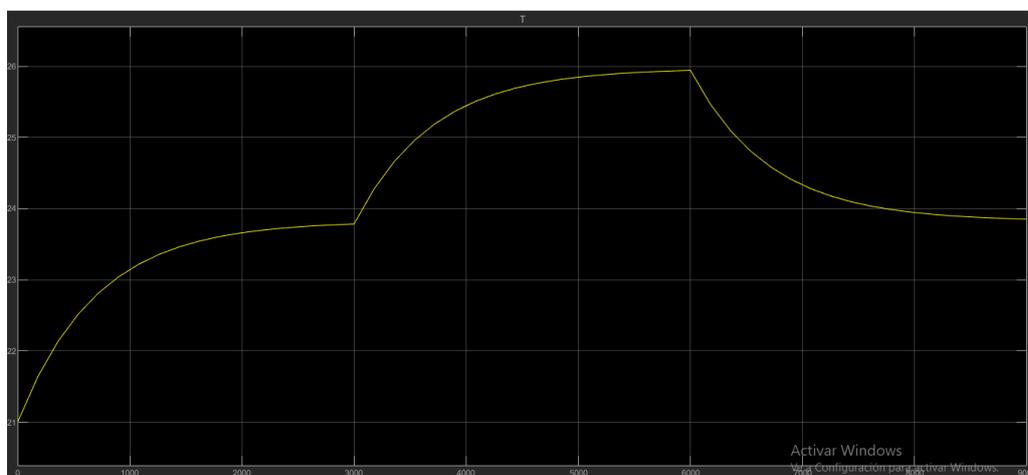
Prueba 6 - Tiempo 9000s

Tabla 12. Valores tensión prueba 1.

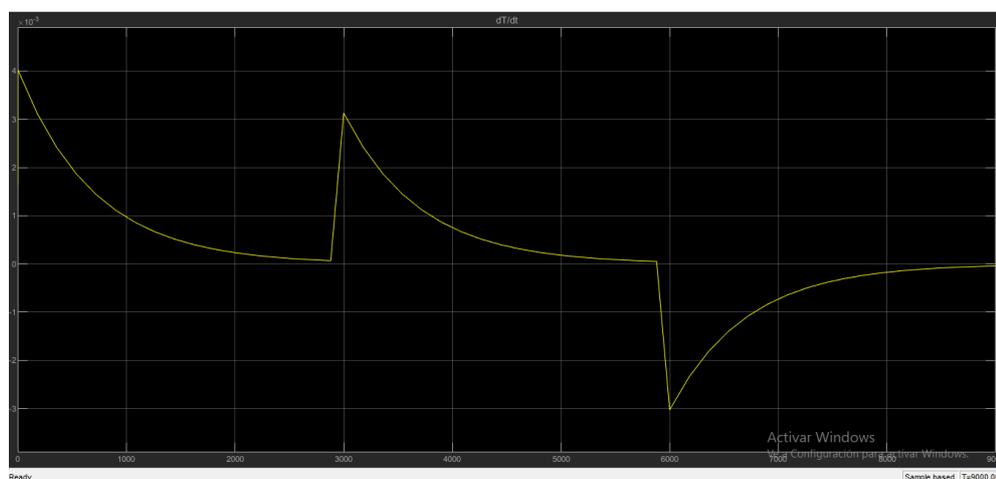
| Segundo de entrada voltaje | <u>Valores escalón momento inicial intervalo (v) – Entrada analógica</u> |
|----------------------------|--|
| 0 | 0...5 |
| 3000 | 5...10 |
| 6000 | 10...5 |

Tabla 13. Valores parámetros prueba 1.

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|--------------------------|
| Flujo (F) | 1e-5 (m ³ /s) |
| Volumen agua a calentar (V) | 0,007 (m ³) |

Scope T

Scope dT/dt



Después de realizadas las pruebas se aprueba la validez del modelo (ver discusión y análisis de resultados en la siguiente sección del presente informe). Debido a esto, se procede a cerrar el lazo del sistema para introducir retroalimentación en el mismo y así comenzar con el proceso de control.

Modelo Simulink Sistema lazo cerrado con introducción del bloque de control

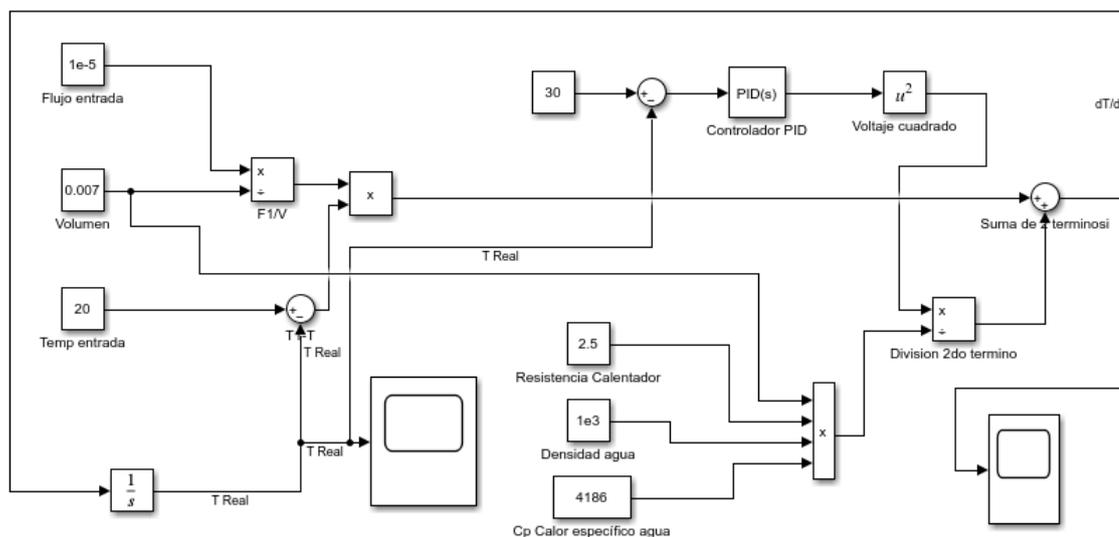


Figura 4. Lazo cerrado sobre modelo resultante programado en Simulink.

Como se puede ver en la Figura 4 el lazo cerrado se aplica de la salida de temperatura del sistema a la entrada de la referencia en el mismo. De esta manera se podrá obtener esa comparación instantánea entre lo que se tiene en el sistema en cuanto a temperatura, y lo que se desea tener. Al momento de la comparación, esta se hace por medio de una diferencia de temperatura. Es decir, si este delta de temperatura es cero, esto indicaría que la temperatura del sistema es igual a la temperatura de referencia. De esta manera el sistema entenderá que, si esto permanece a lo largo del tiempo, estará en funcionamiento estable, pues no habría que hacer nuevos cambios en las señales de entrada, pues se ha logrado el objetivo. La resta que permite hallar dicho delta es:

$$\Delta T = (\textit{Temperatura Referencia} - \textit{Temperatura Real del Sistema})$$

De esta manera el signo será el indicador de la dirección de la señal que deberá efectuar el sistema para alcanzar la temperatura de referencia.

Asimismo, introducimos el bloque de control tipo PID en paralelo, que tomará el rol de tomar esta diferencia y lograr que tienda a cero. Esto lo buscará por medio de distintos métodos que dependerán de sus parámetros asociados PID.

Si bien se pueden buscar dichos parámetros a través de prueba y error, se buscará un método más eficiente, pues carecen de sentido intuitivo y pueden llegar a ser infinitas opciones, por lo que se hace uso de herramientas existentes que nos ayudarán a agilizar el proceso de búsqueda de valores pertinentes para la posterior toma de decisiones.

Si bien existen múltiples opciones de control, se opta por la de PID debido a que el presente proyecto no pretende enfatizar en el diseño de control por métodos técnicos y complejos, entrando a identificar funciones de transferencia para evaluar diferentes opciones, sino pretende encontrar una manera simple de dar control a un sistema que va a poder estar al alcance de cualquier estudiante de ingeniería, principalmente.

Introducción del control automático PID por medio de la herramienta PID control Autotune

El bloque PID cuenta con una opción de “Autotune”, la cual, a partir del modelo de la dinámica de una planta expuesto en Simulink, evaluará rápidamente una opción viable para que el sistema alcance la referencia. Ahora se procede a hacer uso de la misma y de las herramientas que trae consigo para la posterior toma de decisiones y análisis de cuál es el

mejor escenario para la planta a partir de los propuestos.

Volviendo al modelo desarrollado en el proyecto, se tiene en cuenta para aplicar este control, que la variable a controlar (variable de entrada inicial) es el voltaje y que mediante el manejo de esta entrada se debe controlar la salida deseada de temperatura del sistema (temperatura de referencia). Si la planta es no lineal, el Autotune va a volverla lineal, automáticamente, teniendo en cuenta sus puntos de operación y calculando las especificaciones para llevar a la planta a la toma de control.

Esto se hará a través de la aplicación de *PID Tune control*, adherida a Simulink. Si bien el *Autotune* genera una respuesta automática con parámetros propuestos para un balance entre rapidez y robusteza para llevar al sistema a que alcance la referencia, estos se pueden modificar de manera manual, tomando como herramienta la interfaz visual de la aplicación que permite evaluar distintas combinaciones en cuanto al nivel de rapidez y robusteza en que se desea que se mantenga el sistema.



Imagen 5. Evidencia de herramienta manual para establecimiento de niveles de rapidez y robusteza que se desean en el diseño de control en Simulink PID Tuner. Tomado de Interfaz de Simulink PID Tuner

Una vez se está satisfecho con la respuesta del control en lazo cerrado, se puede enviar el resultado de nuevo al bloque de PID establecido para permitirle ahora al sistema funcionar con el controlador propuesto y analizar su comportamiento de respuesta.

Se deben tener en cuenta restricciones de funcionamiento de la planta dependiendo de las especificaciones de rangos de voltaje disponibles, así como temperaturas válidas para la lectura de las mismas por los sensores y debido a la resistencia térmica de los materiales del sistema. Puede que existan otras tanto referentes al modo operativo de la planta, como a políticas de funcionamiento establecidas por la entidad a cargo.

Para este proyecto, como no se tienen especificaciones de todas las restricciones, se tomarán algunos valores arbitrariamente. Sin embargo, se buscará una respuesta del sistema,

idealmente, sin sobre picos (oscilaciones). Esto debido a que, como se está hablando de un proceso industrial de embotellamiento de bebidas, se deberá ser muy cuidadoso con la temperatura que se le da a las mismas, pues las propiedades podrían cambiar y tener efectos en la calidad del producto. Asimismo, tampoco se cuenta con un método externo eficiente que sirva como refrigerante, por lo que, en caso de sobrepasar la temperatura de referencia, se deberá dejar al sistema que, casi por su cuenta, baje la temperatura. Esto podría llegar a implicar mucho tiempo, lo que volvería poco eficiente al sistema. Si bien se está estudiando una estación de un volumen relativamente pequeño de capacidad, se busca darle un sentido práctico al proyecto, por lo que se entiende que en la industria se podría presentar este mismo escenario a un nivel claramente mucho mayor, lo que implicaría mayores consecuencias.

A continuación, se aplicará la herramienta PID Autotune al modelo, la cual dará como resultado una propuesta de parámetros. Se evaluará dicha propuesta teniendo los indicadores resultantes de la respuesta con la misma, pero, sobre todo, se evaluará la posibilidad de una mejora en la relación rapidez-robustez con los que responde el sistema ante los parámetros establecidos. Una vez se tengan los parámetros que se consideren como mejor opción, se utilizarán los mismos para proceder a realizar las comparaciones entre controladores PID, P, PI, PD para aplicar al sistema en estudio.

Los resultados de las pruebas se discutirán posteriormente en el documento en la sección establecida para ello. Tener en cuenta que todas las temperaturas serán tomadas en grados centígrados y que el tiempo será tomado en segundos.

Temperatura inicial del sistema (ambiente) → 20°C

Volumen de Agua a calentar → 5 litros

Prueba 1: Controlador tipo PID en paralelo

Se genera una prueba por el PID, que da como resultado los siguientes parámetros y comportamiento:

| Controller Parameters | |
|----------------------------|------------------------|
| | Tuned |
| P | 8.7486 |
| I | 0.034973 |
| D | -158.8583 |
| N | 0.0075619 |
| | |
| | |
| Performance and Robustness | |
| | Tuned |
| Rise time | 433 seconds |
| Settling time | 1.54e+03 seconds |
| Overshoot | 7.86 % |
| Peak | 1.08 |
| Gain margin | Inf dB @ NaN rad/s |
| Phase margin | 69 deg @ 0.00356 rad/s |
| Closed-loop stability | Stable |

Figura 5. Resultado PID Autotune. Tomado de "Show parameters" de Simulink PID Autotuner

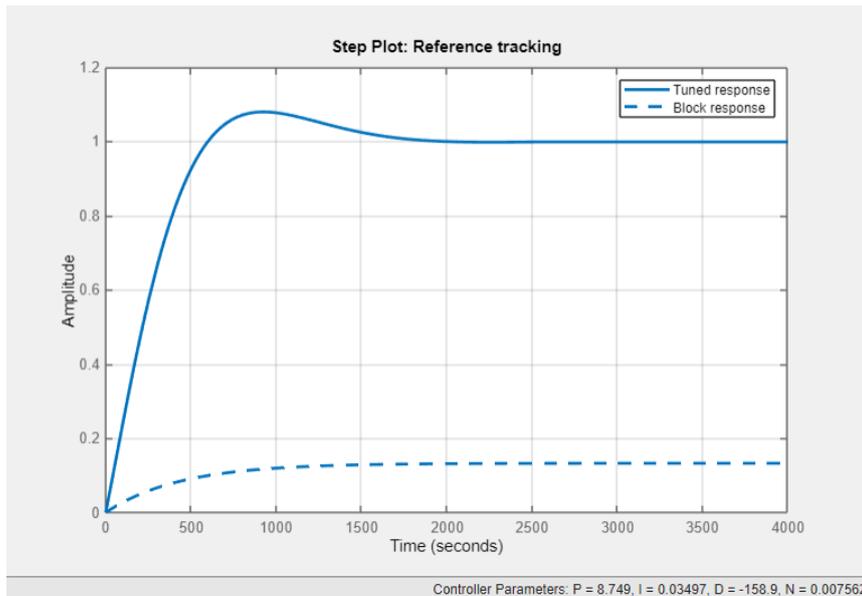


Figura 6. Resultado PID Autotune (curva continua). Tomado de Simulink PID Autotuner

A través de los resultados de la tabla y de un análisis visual de la gráfica anterior, haciendo un compromiso entre robustez y rapidez, se decide modificar los resultados generados por el PID (a través de la herramienta que maneja el programa de acoplar la curva de manera manual a partir de un ejercicio visual). Esto debido a que se considera como requisito el hecho de no generar un sobre pico debido al proceso de calentamiento de agua (en la práctica tomaría mucho tiempo el hecho de dejar enfriar la sustancia de interés, pues no se tiene un elemento eficiente refrigerante que logre bajar la temperatura). Tras las modificaciones se llega al siguiente resultado:

| Controller Parameters | |
|-----------------------|-----------|
| | Tuned |
| P | 8.5572 |
| I | 0.018972 |
| D | 238.0191 |
| N | 0.0046488 |
| | |
| | |

| Performance and Robustness | |
|----------------------------|-----------------------|
| | Tuned |
| Rise time | 790 seconds |
| Settling time | 1.27e+03 seconds |
| Overshoot | 0.428 % |
| Peak | 1 |
| Gain margin | Inf dB @ NaN rad/s |
| Phase margin | 90 deg @ 0.0027 rad/s |
| Closed-loop stability | Stable |

Figura 7. Corrección resultado PID Autotune. Tomado de "Show parameters" de Simulink PID Autotuner

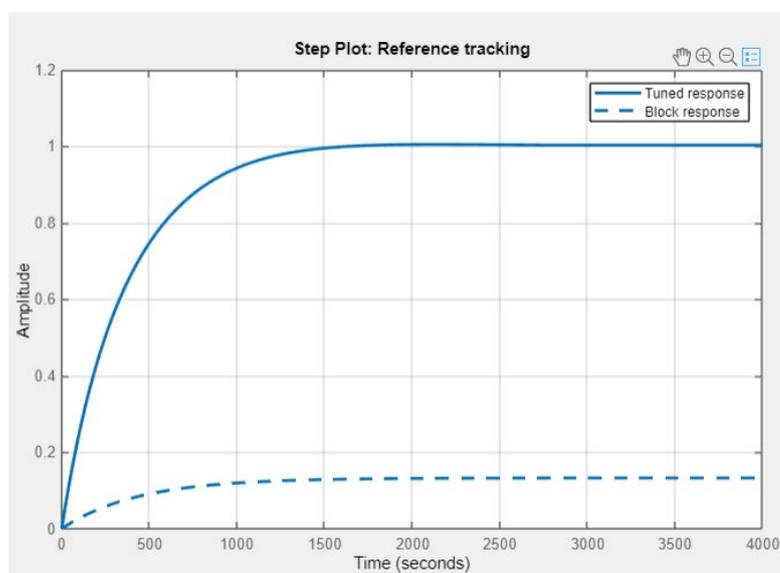


Figura 8. Corrección resultado PID Autotune (curva continua). Tomado de Simulink PID Autotuner

Se procede a aplicar los valores de los parámetros resultantes ($P= 8,5572$; $I= 0,018972$; $D= 238,0191$) al controlador adherido al modelo de Simulink para realizar algunas pruebas sobre

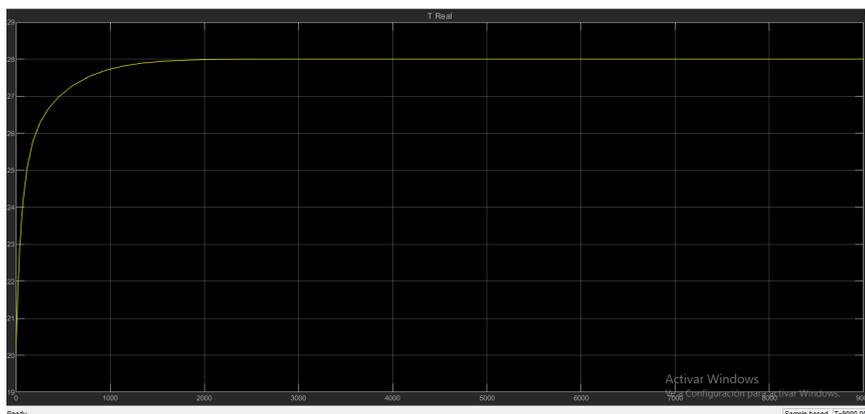
el mismo. Se establecen temperaturas de referencia aleatorias.

Se determina que los valores de los parámetros PID son adecuados para el escenario, pues se logra que, a partir del modelo y parámetros planteados, el sistema siempre logre llegar a la referencia, tras 15 pruebas realizadas, modificando en cada una la temperatura de referencia en un rango desde 23 a 55 grados Celsius.

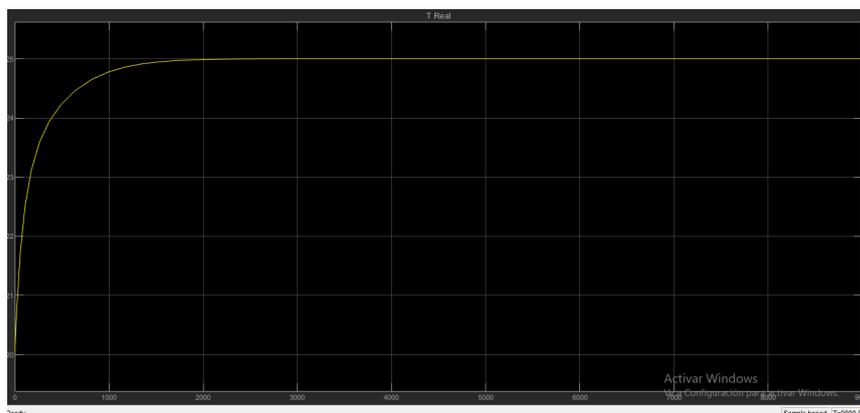
La constante de tiempo para que el sistema llegue a la temperatura de referencia mediante el PID es constante para todas las pruebas: **2000 segundos**. Cabe aclarar que, aunque la constante de tiempo para estabilizar la temperatura en la temperatura de referencia son 2000 segundos, el controlador logra llevar al sistema a una temperatura muy cercana a la de referencia en la mitad de este tiempo. Además, a partir de, en promedio, 450 segundos, el sistema está a un grado de alcanzar la temperatura de referencia. Este comportamiento se podrá evidenciar a continuación.

Muestra de 3 pruebas:

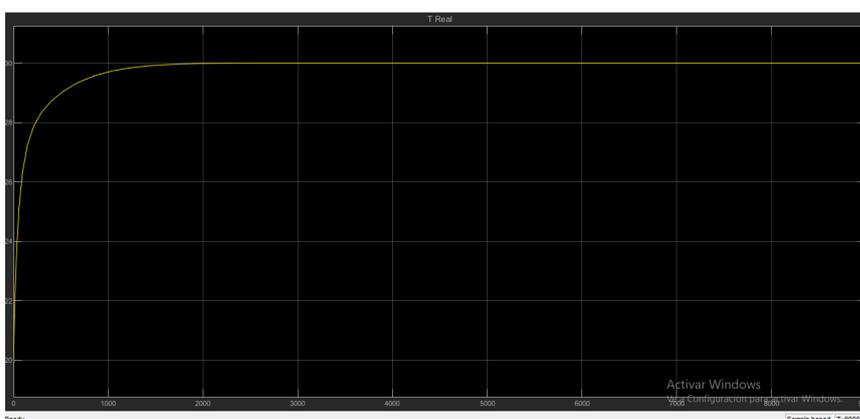
Muestra 1 → Temperatura referencia: 28°C



Muestra 2 → Temperatura referencia: 25°C



Muestra 3 → Temperatura referencia: 30°C



Una vez validados los valores del **PID** propuestos, se procede a determinar el uso de controladores **P**, **PI**, **PD** a partir de la variación de los parámetros anteriormente establecidos. Debido a que el **PID** del programa representa un **PID en paralelo**, al anular una de sus componentes, esta no tendrá efecto sobre el controlador. Lo que quiere decir que, para lograr tener un **PI**, se deberá tomar **D=0**, y de esta manera sucesivamente para los otros casos. Asimismo, se propondrá evaluar una variación en los parámetros a utilizar en cada caso para ver el efecto que podría tener esta sobre el resultado. Se propone una variación, para cada caso, de un **+25%** del parámetro. Este porcentaje, escogido arbitrariamente a modo de punto de comparación y de prueba, se espera que permita entender diferentes comportamientos que puede presentar el sistema con la prueba de distintos escenarios de control. Debido a que el sistema en estudio busca representar uno real, se pretende abarcar mayor campo de acción para reaccionar ante posibles perturbaciones que se puedan presentar.

Prueba 2: Controladores tipo P (Se establece en los parámetros del bloque I=D=0)

$P=8,5572$

Se establecen 6 (seis) temperaturas aleatorias de referencia para probar el funcionamiento de cada uno de los 3 (tres) controladores tipo P propuestos y se documenta la constante de tiempo y la temperatura alcanzada en estado estable para cada temperatura en cada controlador. Posteriormente se establece, a modo de referente comparativo, un promedio del tiempo necesario para alcanzar el estado estable y un promedio de error generado por cada controlador propuesto. (ver tabla de resultados). Para ver la discusión de resultados ir a sección propuesta en el documento para este fin.

Tabla 14. Resultados pruebas controladores propuestos Tipo P.

| P+25% | | | | P-25% | | | P | | |
|-------|----------------------|------------|-----------|----------------------|-------------|------------|----------------------|------------|------------|
| Tref | T Regimen Permanente | Tao | Error% | T Regimen Permanente | Tao | Error% | T Regimen Permanente | Tao | Error% |
| 23 | 21,7 | 1100 | 6% | 21,2 | 1600 | 8% | 21,52 | 1000 | 6% |
| 25 | 23,2 | 800 | 7% | 22,4 | 1600 | 10% | 22,94 | 800 | 8% |
| 28 | 25,7 | 700 | 8% | 24,5 | 1600 | 13% | 25,24 | 650 | 10% |
| 30 | 27,3 | 1000 | 9% | 26 | 1400 | 13% | 26,86 | 640 | 10% |
| 32 | 29,1 | 700 | 9% | 27,6 | 1500 | 14% | 28,5 | 560 | 11% |
| 35 | 31,7 | 800 | 9% | 29,9 | 1300 | 15% | 31,02 | 550 | 11% |
| | Promedio | 850 | 8% | Promedio | 1500 | 12% | Promedio | 700 | 10% |

Prueba 3: PI (D=0)

Si bien la parte integral (I) del controlador no es ideal para este sistema, debido a que este genera, generalmente, oscilaciones en la respuesta del sistema, será igualmente evaluado en las potenciales opciones del controlador a establecer en el sistema debido a que el valor del

parámetro propuesto es cercano a cero, sin dejar de ser significativo para la respuesta del sistema en cuanto a disminuir el error generado. Se espera que, al ser cercano a cero, esto implique que, aunque logra controlar el error, lo haga sin incurrir necesariamente en oscilaciones significativas.

P= 8,5572; I= 0,018972

Se evalúa en primera instancia un controlador PI tal que P e I tengan los valores determinados por el PID Autotune corregido.

Tabla 15. Resultados prueba controlador inicial propuesto Tipo PI.

| | | P | | |
|---|------|----------------------|------|--------|
| | | T Regimen Permanente | Tao | Error% |
| I | Tref | 23 | 3000 | 0% |
| | 25 | 25 | 3000 | 0% |
| | 28 | 28 | 3000 | 0% |
| | 30 | 30 | 3000 | 0% |
| | 32 | 32 | 3000 | 0% |
| | 35 | 35 | 3000 | 0% |

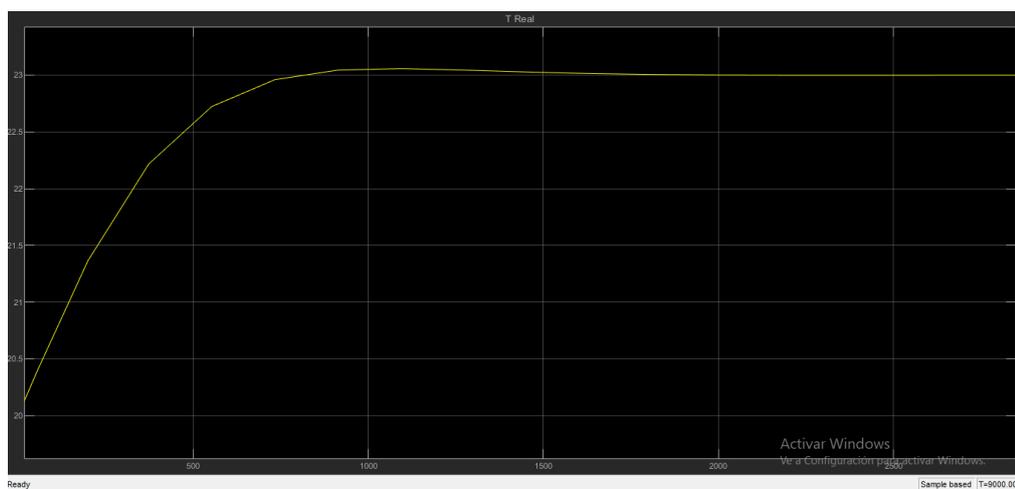
Se procede a la evaluación de unos controladores adicionales PI variando el valor tanto de P como de I en un 25% para entender los posibles escenarios que estos pueden generar siendo un poco más flexibles con los valores encontrados. En primera instancia se pretende mejorar el valor de la constante de tiempo Tao, pues el error entre la referencia y la temperatura real en estado estable ya logra ser cero.

Tabla 16. Resultados pruebas controladores propuestos Tipo PI.

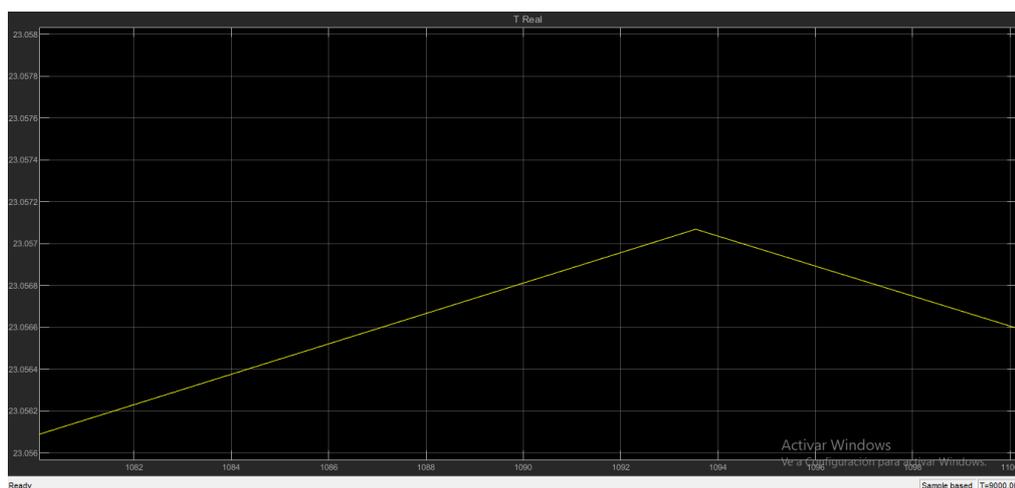
| | | P+25% | | | P-25% | | | Sobre Pico (seg) | |
|-------|------|----------------------|------|--------|----------------------|------|--------|------------------|------|
| | Tref | T Regimen Permanente | Tao | Error% | T Regimen Permanente | Tao | Error% | Inicio | Fin |
| I+25% | 23 | 23 | 3000 | 0% | 23,057 | 2000 | -0,25% | 819 | 2000 |
| | 25 | 25 | 3000 | 0% | 25,056 | 2000 | -0,22% | 740 | 2000 |
| | 28 | 28 | 3000 | 0% | 28,041 | 2000 | -0,15% | 695 | 2000 |
| | 30 | 30 | 3000 | 0% | 30,029 | 2000 | -0,10% | 727 | 2000 |
| | 32 | 32 | 3000 | 0% | 32,015 | 2000 | -0,05% | 791 | 2000 |
| | 35 | 35 | 3000 | 0% | 35 | 1000 | 0% | | |
| | 40 | | | | 40 | 1000 | 0% | | |
| | 50 | | | | 50 | 1000 | 0% | | |
| I-25% | 23 | 23 | 3000 | 0% | 23 | 3000 | 0% | | |
| | 25 | 25 | 3000 | 0% | 25 | 3000 | 0% | | |
| | 28 | 28 | 3000 | 0% | 28 | 3000 | 0% | | |
| | 30 | 30 | 3000 | 0% | 30 | 3000 | 0% | | |
| | 32 | 32 | 3000 | 0% | 32 | 3000 | 0% | | |
| | 35 | 35 | 3000 | 0% | 35 | 3000 | 0% | | |

Se evidencia un comportamiento diferente en uno de los controladores (P-25% ; I+25%), por lo que se extienden las pruebas a realizar sobre el mismo y, asimismo, se estudian los picos efectuados por el mismo, así como el comportamiento ante temperaturas altas de referencia. A continuación, se evidencian algunas pruebas llevadas a cabo mediante Simulink:

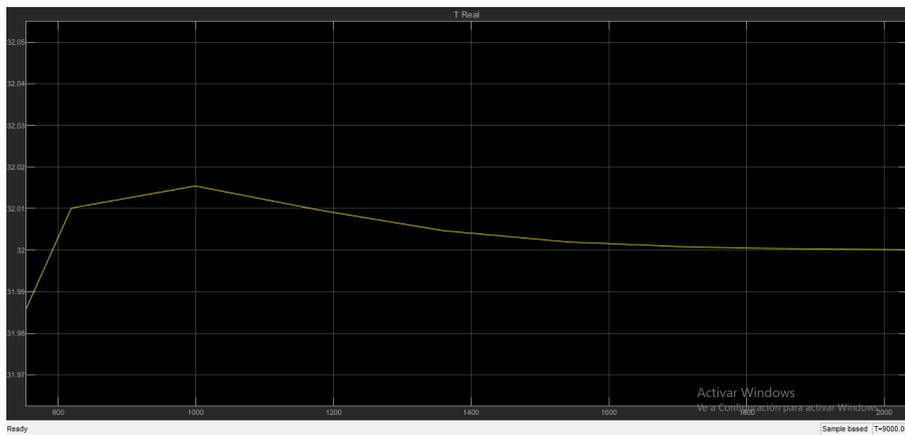
Comportamiento del controlador (P-25%; I+25%) para T_{ref} de 23°C:



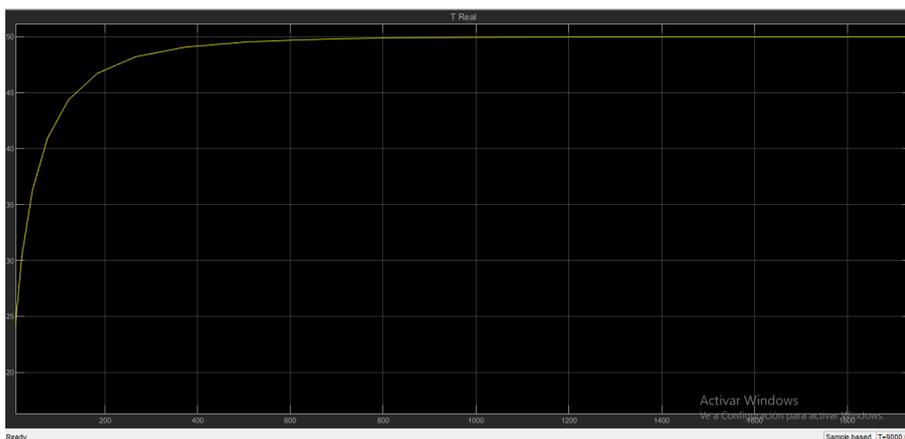
Acercamiento al sobre pico T_{ref} de 23°C:



Sobre pico del controlador (P-25%; I+25%) para T ref de 32°C:



Comportamiento del controlador (P-25%; I+25%) para T ref de 50°C (sin sobre pico), respuesta rápida:



Prueba 4: PD (I=0)

Se procede a estudiar la opción de controladores tipo PD, dejando la acción integral en cero.

P= 8,5572; D= 238,0191

Tabla 17. Resultados prueba controlador inicial propuesto Tipo PD.

| | | P | | |
|---|------|----------------------|-----|--------|
| | | T Regimen Permanente | Tao | Error% |
| | Tref | | | |
| D | 23 | 21,52 | 900 | 6,43% |
| | 25 | 22,94 | 775 | 8,24% |
| | 28 | 25,26 | 650 | 9,79% |
| | 30 | 26,87 | 550 | 10,43% |
| | 32 | 28,5 | 400 | 10,94% |
| | 35 | 31,03 | 350 | 11,34% |

Se procede a la evaluación de unos controladores adicionales PD variando el valor tanto de P como de D en un 25% para entender los posibles escenarios que estos pueden generar siendo un poco más flexibles con los valores encontrados. En primera instancia se pretende mejorar el valor del error, pues la constante de tiempo mejoró con respecto al PID. Sin embargo, aún no se logra llegar a la referencia propuesta. Posteriormente se establecerá una tabla con comparación de indicadores propuestos a partir de los resultados.

Tabla 18. Resultados pruebas controladores propuestos Tipo PD.

| | | P+25% | | | P-25% | | |
|-------|------|----------------------|-----|--------|----------------------|------|--------|
| | Tref | T Regimen Permanente | Tao | Error% | T Regimen Permanente | Tao | Error% |
| D+25% | 23 | 21,74 | 100 | 5,48% | 21,23 | 1400 | 7,70% |
| | 25 | 23,25 | 600 | 7,00% | 22,5 | 1200 | 10,00% |
| | 28 | 25,72 | 500 | 8,14% | 24,6 | 800 | 12,14% |
| | 30 | 27,4 | 400 | 8,67% | 26,08 | 670 | 13,07% |
| | 32 | 29,12 | 300 | 9,00% | 27,6 | 600 | 13,75% |
| | 35 | 31,7 | 250 | 9,43% | 30 | 500 | 14,29% |
| D-25% | 23 | 21,75 | 100 | 5,43% | 21,23 | 1500 | 7,70% |
| | 25 | 23,25 | 700 | 7,00% | 22,49 | 1500 | 10,04% |
| | 28 | 25,72 | 500 | 8,14% | 24,58 | 900 | 12,21% |
| | 30 | 27,4 | 450 | 8,67% | 26,07 | 800 | 13,10% |
| | 32 | 29,12 | 400 | 9,00% | 27,6 | 700 | 13,75% |
| | 35 | 31,73 | 350 | 9,34% | 29,97 | 600 | 14,37% |
| | 40 | 36,15 | 300 | 9,63% | 34,03 | 450 | 14,93% |
| | 50 | 45,2 | 200 | 9,60% | 42,5 | 350 | 15,00% |

Tabla 19. Comparación indicadores de promedio para la constante de tiempo y el error de cada controlador propuesto PD.

| | Prom Tao | Prom Error |
|--------------|----------|------------|
| P D | 604,2 | 9,53% |
| P+ D+ | 358,3 | 7,95% |
| P+ D- | 375,0 | 8,35% |
| P- D+ | 861,7 | 11,82% |
| P- D- | 850,0 | 12,64% |

5. Discusión de Resultados

Modelo matemático establecido bajo los supuestos y condiciones especificados:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V} (T_0 - T_1) + \frac{Qv^2(t)}{R \cdot V \cdot \rho \cdot C_p} \quad (5)$$

Se procede a la discusión de resultados de las pruebas con la herramienta Simulink con ayuda de la información descrita en la *Tabla 19*:

Tabla 19. Tabla valores resultantes T1.

| Nº Prueba | | T ₁ resultante [°C] | ΔT |
|-----------|----------------------------|--------------------------------|------|
| 1 | T ₁ debido a v1 | 26,0 | 6,0 |
| | T ₁ debido a v2 | 23,8 | -2,2 |
| | T ₁ debido a v3 | 23,1 | -0,7 |
| 2 | T ₁ debido a v1 | 23,8 | 3,8 |
| | T ₁ debido a v2 | 26,0 | 2,2 |
| | T ₁ debido a v3 | 23,8 | -2,2 |
| 3 | T ₁ debido a v1 | 21,5 | 1,5 |
| | T ₁ debido a v2 | 22,4 | 0,9 |
| | T ₁ debido a v3 | 21,5 | -0,9 |
| 4 | T ₁ debido a v1 | 27,3 | 7,3 |
| | T ₁ debido a v2 | 31,7 | 4,4 |
| | T ₁ debido a v3 | 27,8 | -3,9 |
| 5 | T ₁ debido a v1 | 23,8 | 3,8 |
| | T ₁ debido a v2 | 26,0 | 2,2 |
| | T ₁ debido a v3 | 23,8 | -2,2 |
| 6 | T ₁ debido a v1 | 23,8 | 3,8 |
| | T ₁ debido a v2 | 26 | 2,2 |
| | T ₁ debido a v3 | 23,8 | -2,2 |

Las pruebas 1 y 2 permiten definir hallazgos y empezar a relacionar temperaturas resultantes

para ciertos valores de voltaje. Ejemplo (ver prueba 1): 10v logran una temperatura del sistema de 26 grados, lo que conlleva a un delta T de 6 grados bajo las condiciones iniciales dadas. Debido a esto se entiende que la relación voltaje y cambio de temperatura es coherente y adecuada para el sistema en estudio.

Se procede, bajo las mismas condiciones de voltaje y volumen de agua a calentar que en la prueba **2**, a realizar un cambio en el flujo en la prueba **3**, volviéndolo mayor, lo que indica entradas y salidas de agua más rápidas, lo que debería indicar menor aumento de temperatura. Esto permite ver la coherencia en el modelo, debido a la disminución en el aumento de temperatura en comparación a la prueba **2**, donde el flujo de agua era menor.

Ahora se procede a la prueba **4** bajo las mismas condiciones que la prueba **2**, pero con un menor flujo, lo que debería lograr un aumento en el cambio de temperatura alcanzado por cada entrada de voltaje. Al ver que el comportamiento predicho sí se cumple, se procede con la prueba **5**. Adicional a esto, los resultados obtenidos hasta el momento también logran permitir llegar al hallazgo de que, a menor flujo, mayor cambio en la temperatura y mayor tiempo requerido para estabilizar al sistema.

Para la prueba **5** se vuelve al escenario de la prueba **2**, y ahora se modifica el volumen de agua a calentar.

Como se había detectado en las pruebas **1** y **2**, se había comenzado a asociar una constante de temperatura para cada voltaje añadido o, dicho en otras palabras, una temperatura en el estado estable de las condiciones dadas al sistema en ese escenario particular. Esto se sigue viendo reflejado en el modelo, sólo que ahora se requiere menos tiempo para llegar al estado estable del sistema, debido a que es menor cantidad de agua la que se requiere calentar en el tanque.

Por último, se procede a realizar la prueba **6** con mayor volumen de agua a calentar, esperando el resultado opuesto que de la prueba **2** a la **5**.

Se logra percibir cómo el sistema busca llegar a estabilizarse en los valores esperados, sin embargo, toma más tiempo en llegar al estado estable del establecido para el tiempo de la prueba en lograr llegar a ellos, pues se está manejando un mayor volumen de agua.

Los hallazgos resultantes de las 6 pruebas permiten afirmar la coherencia del modelo, lo que permite proceder a la validez del mismo para representar al sistema en estudio bajo las especificaciones establecidas.

Debido a esto, se procede a cerrar el lazo del sistema para introducir retroalimentación en el

mismo y así comenzar con el proceso de control.

Resultados de la incorporación del bloque de control tipo PID en paralelo al modelo en Simulink en lazo cerrado

En términos generales se espera que el sistema llegue a la temperatura de referencia. Sin embargo, hay otros factores que impactan la decisión al momento de la elección de un controlador a incorporar en el sistema. Para este caso particular se busca que, además de lograr llegar a la temperatura de referencia, el sistema logre cambios de temperatura sin sobre picos y en el menor tiempo posible, pues hay procesos de calentamiento muy precisos en cuanto a la temperatura a alcanzar, pero que toman mucho tiempo y, en general, muchos recursos para lograrlo. Por esta razón se pretende evaluar la relación entre precisión, tiempo y alteraciones al sistema. Como principal criterio se tomará el hecho de no incorporar sobre picos en el proceso de calentamiento para cuidar la calidad en el resultado del producto a nivel industrial. Debido a esto se hacen modificaciones a los parámetros propuestos por *Autotune*, pues, si bien el tiempo de subida era de 433 segundos, luego manejaba un sobre pico que, en términos prácticos, se debía anular. Se entiende que, a menor tiempo de respuesta, mayor probabilidad de existencia de sobre picos. Por esto se renuncia a un menor tiempo de respuesta, para obtener un resultado con menor porcentaje de los mismos.

Teniendo en cuenta los resultados presentados en la sección de metodología, se puede proceder a su respectivo análisis:

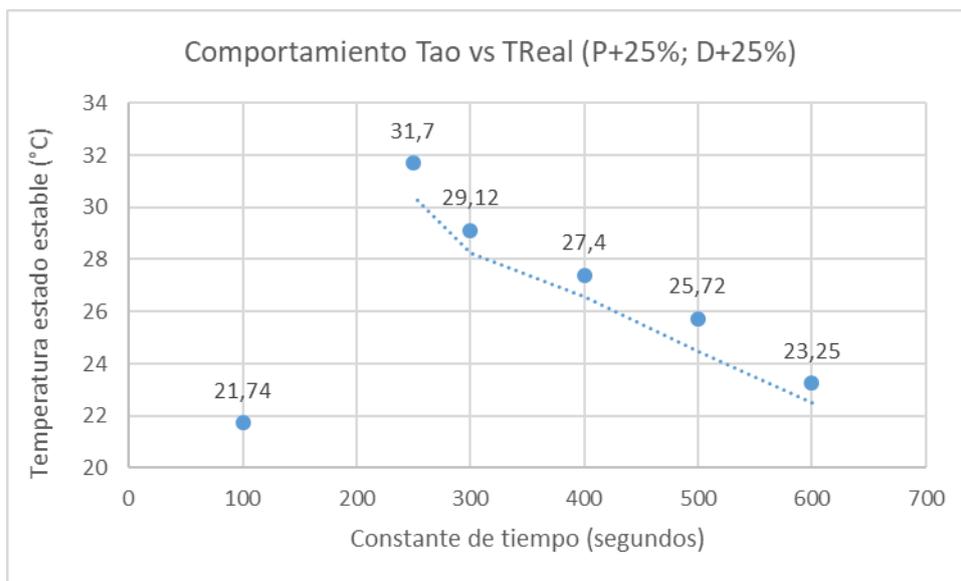
Si bien el controlador propuesto **PID** genera una respuesta del sistema aceptable teniendo en cuenta que este lleva al sistema a alcanzar siempre la temperatura de referencia, se pretende evaluar otro tipo de posibilidades con los recursos disponibles para la investigación de los mismos, y así llegar a un mayor entendimiento de las diferentes respuestas del sistema creando mayor cantidad de escenarios.

En los controladores propuestos tipo **P** se evidencia como ninguno de ellos logra llegar a las temperaturas propuestas de referencia. De igual manera se evidencian los tiempos necesarios por cada uno de ellos para alcanzar el estado estable, donde el sistema permanece en la temperatura alcanzada por el mismo. De los tres controladores propuestos, se recomienda tomar como elección el controlador **P** sin variación en el valor original del mismo. Esto debido a que, si bien maneja en el error, en promedio, 2 puntos porcentuales más que el controlador propuesto P+25%, toma 150 segundos menos, en promedio, en alcanzar la

temperatura en estado estable, lo que lo vuelve más eficiente teniendo en cuenta las preferencias de los resultados a encontrar en el sistema real. Asimismo, se evita incurrir en valores mayores de P , lo que permite controlar de una mejor manera el impulso dado al sistema para alcanzar la referencie y esto, a su vez, disminuye la probabilidad de entrar en un estado oscilatorio constante que lleve al sistema a ser inutilizable por no alcanzar un valor fijo.

En cuanto a los controladores **PI**, se evidencia en 3 de los 4 controladores adicionales propuestos al primero (sin alteración en el valor de los parámetros) que no hay cambio en su comportamiento. Sin embargo, se evidencian sobre picos en el controlador ($P-25\%$; $I+25\%$). Si bien se indica desde un inicio que un comportamiento oscilatorio no es ideal para este sistema, razón por la cual la acción integral no era de principal interés, el porcentaje de sobre pico es muy bajo (máximo $\frac{1}{4}$ (un cuarto) de punto porcentual en todos los casos), por lo que no se representaría como un sobre pico significativo, y en cambio se tiene un tiempo de respuesta en estado estable menor a la encontrada por los demás controladores propuestos tipo **PI**. Además, debido al comportamiento oscilatorio evidenciado y, que en la prueba de la temperatura 35° se presenta un error del 0% y una constante de tiempo inclusive menor a las del sobre pico, se decide hacer 2 pruebas adicionales con temperaturas mayores a 35 grados, lo que evidencia la respuesta adecuada del sistema mediante la implementación de este controlador en particular para temperaturas altas de referencia. Por esta razón, de los controladores propuestos **PI**, el referente a ($P-25\%$; $I+25\%$) se considera como la mejor opción entre los mismos esperando que, si se llegase a aplicar en el sistema real, no se generen mayores sobre picos debido a alteraciones externas que se puedan presentar.

Posterior al estudio de la posibilidad de un controlador **PD** y, evaluando las alternativas establecidas, se procede a entender el comportamiento de las respuestas del sistema ante la aplicación de los mismos. A partir de la tabla comparativa de indicadores de resultados se evidencia cuáles de ellos toma sentido estudiar: En primera instancia se opta por el de menor tiempo de respuesta promedio para llegar al estado estable del sistema (donde ya no se evidencia cambio en la temperatura en el tiempo) que coincide con el controlador que genera menor error promedio. Este último hace referencia al ($P+25\%$; $D+25\%$), el cual presenta un comportamiento más rápido en los extremos de las pruebas; es decir, la primera prueba realizada ($T_{ref}=23^\circ\text{C}$) demuestra una respuesta de estabilización en un tiempo muy corto (100 segundos) al igual que las temperaturas de referencia más altas llevadas a cabo en las pruebas, las cuales demuestran un comportamiento decreciente en cuanto al tiempo de respuesta de estabilización. Para evidenciar este comportamiento se recurre a ayudas visuales para determinar una posible correlación como lo es la gráfica de comportamiento de la constante de tiempo en relación a la temperatura alcanzada en estado estable por el sistema.

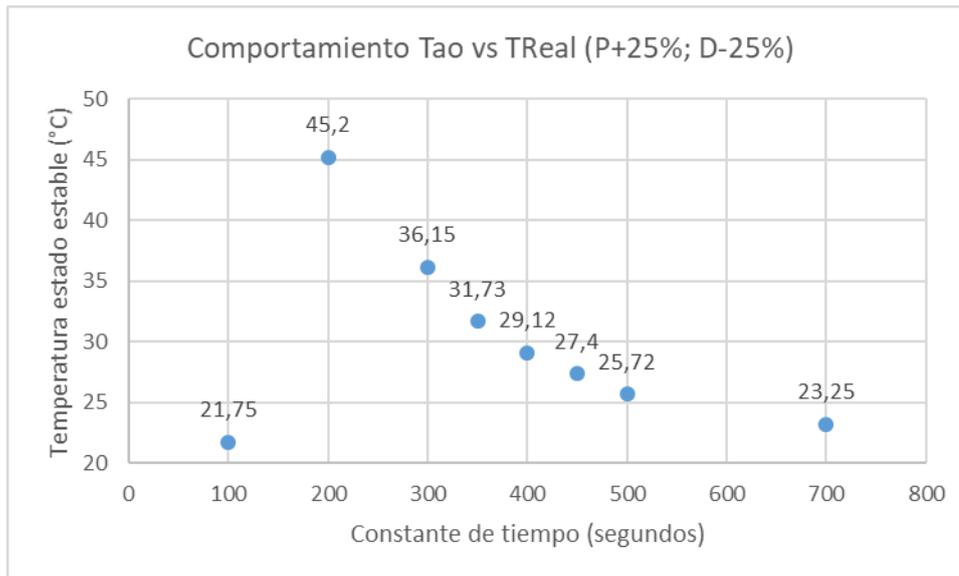


Gráfica 3. Relación T_{ao} vs T_{Real} .

Se evidencia una correlación inversamente proporcional en cuanto al tiempo de respuesta de estabilización para las temperaturas alcanzadas. A mayor temperatura alcanzada, menor valor toma la constante de tiempo correspondiente.

Posteriormente se analiza el error generado por el sistema en el intento por alcanzar la temperatura de referencia. Se evidencia que los dos controladores con mejor desempeño, dentro de los propuestos en **PD**, son tanto el (P+25%; D+25%), como el (P+25%; D-25%), pues ambos alcanzan una estabilidad en el crecimiento del error a partir de la temperatura de referencia de 32°C. Si bien todos los controladores **PD** aumentan el error a medida que aumenta la temperatura de referencia a alcanzar, estos dos controladores logran estabilizar este crecimiento en T_{ref} : 32, donde comienza a estabilizarse en un 9%, lo que los vuelve confiables a la hora de entender los posibles límites de crecimiento del error al establecer distintas temperaturas de referencia.

Es por esto que también se recurre a un análisis visual del comportamiento del controlador (P+25%; D-25%), la cual lleva a generar un mismo análisis en cuanto a la correlación manejada entre el tiempo de respuesta de estabilización para las temperaturas alcanzadas por el sistema: a mayor temperatura alcanzada, menor valor toma la constante de tiempo correspondiente, lo que indica una relación inversamente proporcional.



Gráfica 4. Relación T_{ao} vs T_{Real} .

Se puede entender que, de los controladores propuestos en **PD**, los dos analizados anteriormente mantienen una respuesta similar ante los escenarios planteados, por lo que se podría recurrir a cualquiera de ellos al momento de la toma de decisión del controlador a implementar en el sistema.

6. Estudio Económico

En este apartado se realiza el estudio económico a partir de un cálculo aproximado de los costes asociados a la realización del proyecto. Este se puede dividir en dos bloques: el coste de trabajo y el coste de equipos.

El coste de trabajo corresponde al equivalente si las horas involucradas por parte del autor en la realización del mismo fueran remuneradas monetariamente. Este cálculo se realiza con el fin de cuantificar el valor agregado que aporta el estudiante mediante la realización de un proyecto de investigación. Por tanto, el cálculo se basa, aproximadamente, en 120 horas involucradas durante las 8 semanas de duración del proyecto. Teniendo en cuenta que el sueldo mínimo por hora en España para 2022 oscila alrededor de 8 €, el tiempo involucrado en el proyecto equivaldría a 960 €.

Por otro lado, para calcular el coste de equipos se tendrán en cuenta los gastos asociados únicamente al uso del ordenador, pues este fue el único recurso utilizado. Sin embargo, al ser un equipo propio, que ya ha estado en funcionamiento continuo durante todo el período universitario (cuatro años), la realización del proyecto no representa un costo significativo en lo que concierne al uso del mismo. Esto último debido a que el porcentaje máximo asociado a la amortización anual de un ordenador se sitúa en 26%, indicando esto que, en el quinto año de uso, este gasto puede ser despreciado. (*Autonomosyemprendedor.Es. 2022*)

7. Estudio Ambiental

La automatización de procesos industriales, dentro de los beneficios que brinda en la industria, también logra transformar los procesos en función del uso eficiente de recursos, lo que trae como consecuencia la reducción de gastos innecesarios.

En lo que concierne directamente al trabajo realizado durante el proyecto de investigación, haciendo una evaluación del impacto ambiental generado, se tiene en cuenta recursos utilizados del consumo de energía eléctrica debido al uso de recursos informáticos en el ordenador. Este se aproxima a 2,2 kWh en 8 horas de trabajo. (*Chcenergia.Es. Consumo Electrico de Un Ordenador, 2022*)

Teniendo en cuenta que las horas totales de trabajo involucrado aproximado se calculan como 20 horas de trabajo semanales por 8 semanas, dando un total de 120 horas involucradas, el consumo eléctrico total se calcula en **33 kWh**.

Por último, a modo de recomendación al momento de implementar los resultados del proyecto en un laboratorio físico, es fundamental la determinación de los materiales y características de las resistencias y bridas a utilizar en función de su aplicación, para así evitar posibles deterioros innecesarios o incurrir en corrosión y/o sobrecalentamiento. De esta forma se buscaría prolongar la vida de los equipos para disminuir el impacto ambiental y con el consecuente ahorro en costes de reparación y mantenimiento.

8. Conclusiones

Teniendo en cuenta el sistema físico estudiado a lo largo de este proyecto, la estación del reactor de un sistema de tanques interactuantes, se evidencia una metodología adecuada desde el estudio y análisis del mismo hasta una opción de control simple que permita llevar al sistema a una temperatura de referencia deseada.

Se logra establecer un modelo válido para su representación, demostrando su coherencia al ser aplicado al programa de simulación en Simulink a través de la valides de su funcionamiento mediante las pruebas llevadas a cabo. A partir de esto, se procede a buscar una metodología simple de control adecuada para el sistema que permita también, de manera general, darle al lector y público interesado una visión holística del mundo de control de procesos.

Abarcando los resultados propuestos para cada tipo de controlador, se hace una recolección de los candidatos que se considera se deberían tener en cuenta para la toma de decisiones con respecto al controlador más adecuado para el sistema:

Parámetros establecidos \rightarrow **P**= 8,5572; **I**= 0,018972; **D**= 238,0191

| <i>Tipo Control</i> | <i>Propuesta</i> | <i>Consideraciones</i> |
|---------------------|------------------|--|
| <i>PID</i> | PID en paralelo | <ul style="list-style-type: none"> • Se logra llegar a las temperaturas de referencia • $T_{ao} \rightarrow 2000$ segundos • Controlador complejo debido al establecimiento de 3 parámetros distintos • Fuerte ante reacción de posibles alteraciones externas al sistema (al tener 3 parámetros podrá actuar de una mejor manera ante el ruido) |
| <i>P</i> | P | <ul style="list-style-type: none"> • No logra llegar a las temperaturas de referencia • $T_{ao} \rightarrow 700$ segundos en promedio (menor valor de t_{ao} para temperaturas más altas y mayor para temperaturas más bajas de referencia) • Controlador simple debido a un único parámetro existente • Opción para cuando no se necesita exactitud en el valor de la temperatura real del sistema (se puede establecer un <i>set point</i> estudiando la dinámica del error) • Débil ante alteraciones o ruido que puede generarse hacia el sistema |

PI

P-25%;I+25%

- Se logra llegar a las temperaturas de referencia
- $T_{ao} \rightarrow 2000$ segundos (para $T_{ref} < 35^{\circ}C$)
- $T_{ao} \rightarrow 1000$ segundos (para $T_{ref} \geq 35^{\circ}C$)
- Controlador complejo debido al establecimiento de 2 parámetros distintos, los cuales deben establecer sus valores teniendo en cuenta el riesgo de oscilaciones permanentes ante valores altos, así como otras características a tener en cuenta.
- Posiblemente estable ante reacción de alteraciones externas al sistema
- Error cero y tiempo de respuesta aceptable en temperaturas a partir de $35^{\circ}C$.

PD

P+25%;D+25%

y

P+25%;D-25%

- No logran llegar a las temperaturas de referencia
- T_{ao} promedio \rightarrow menor a 400 segundos
- Buen funcionamiento a temperaturas altas (error estable y menor tiempo de respuesta)
- Controlador complejo debido al establecimiento de 2 parámetros distintos, los cuales deben establecer sus valores teniendo en cuenta características de control proporcional y acción derivativa.
- Opción para cuando no se necesita exactitud en el valor de la temperatura real del sistema (se puede establecer un *set point* estudiando la dinámica del error)

Para la toma de la decisión final del controlador a implementar en el sistema, se recomienda establecer las restricciones de funcionamiento del mismo, así como los principales intereses de control para así tener un punto de referencia en la cercanía de estos objetivos con respecto a las consideraciones de cada controlador propuesto en la tabla anterior.

Agradecimientos

Quiero agradecer principalmente al director de proyecto, Carlos, quien me brindó la confianza y el apoyo para desarrollar este proyecto de principio a fin, entendiendo que no se trata de una estudiante de ingeniería electrónica, por lo que la paciencia fue un factor clave que le reconozco desde el momento inicial. Vuelvo a la analogía que me sirvió como mantra en la realización del trabajo: si el control de procesos fuera un traje de gala de alfombra roja, aquí se estaría cociendo el agujero en una media, pero con mucho estilo. Gracias por la confianza. Las risas no faltaron.

Asimismo, el agradecimiento va dirigido a los colaboradores desde la Pontificia Universidad Javeriana Diego y Juan Camilo, quienes dedicaron tiempo en brindar los datos e información requerida en cada momento, así como la mejor disposición para cada encuentro.

Por último, pero no menos importante, a mis amigos y familia que me apoyaron y dieron ánimos y palabras clave en momentos críticos. No lo hubiera logrado hasta el final sin su apoyo.

Bibliografía y Referencias Bibliográficas

- [1] Electronicboard. (2022, Spring 5). *Tendencias en automatización industrial 2022*. Electronicboard. <https://www.electronicboard.es/tendencias-automatizacion-industrial-2022/>
- [2] Pérez, L. (2022, June 10). *Tendencias de automatización de las compañías en 2022*. Contact Center Hub. https://contactcenterhub.es/tendencias-automatizacion-companias-2022-10-37359/?doing_wp_cron=1655723641.1231970787048339843750
- [3] *Las tres principales tendencias de automatización en 2022*. (n.d.). Interempresas. Retrieved June 26, 2022, from <https://www.interempresas.net/Electronica/Articulos/376238-Las-tres-principales-tendencias-de-automatizacion-en-2022.html>
- [4] Euroinnova Business School. (2021, July 27). *Fundamentos de automatización*. Euroinnova Business School. <https://www.euroinnova.edu.es/blog/fundamentos-de-automatizacion>
- [5] *Automatización Industrial*. (2021, March 9). Ripipsa Cobots; RIPIPSA. <https://ripipsacobots.com/automatizacion-industrial/>
- [6] *(Estación de trabajo compacta MPS PA con tramos de regulación de nivel, caudal, presión y temperatura*. (n.d.)) Festo-didactic.com. Retrieved June 26, 2022, from <https://www.festo-didactic.com/int-es/learning-systems/automatizacion-de-procesos/compact-workstation/estacion-de-trabajo-compacta-mps-pa-con-tramos-de-regulacion-de-nivel,caudal,presion-y-temperatura.htm?fbid=aW50LmVzLjU1Ny4xNC4xOC44ODIuNDM3Ng>
- [7] *ADIRO automatisierungstechnik GmbH - MPS® PA stations*. (n.d.). Adiro.Com. Retrieved June 26, 2022, from <https://www.adiro.com/en/didactic/hardware/mps-pa-stations.php>
- [8] *Simulink*. (n.d.). Mathworks.com. Retrieved June 26, 2022, from <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>
- [9] Jose Luis Guzman Sanchez, Ramón Costa Castelló, Manuel Berenguel Soria, Sebastián Dormido Bencomo. (2012). *Control Automático con herramientas Interactivas*. Pearson Educación, S.A.
- [10] OGATA. (1992). *Ingeniería De Control Moderno*. Prentice Hall & IBD.
- [11] (Consumo Eléctrico de Un Ordenador). Chcenergia.Es. Retrieved July 1, 2022, from <https://chcenergia.es/blog/cuanto-consume-un-ordenador-o-pc/>
- [12] (Las otras ventajas que tiene para los autónomos comprar un ordenador portátil para su negocio en septiembre). Autonomosyempreendedor.Es.

Retrieved July 1, 2022, from

<https://www.autonomosyemprendedor.es/articulo/todo-digital/otras-ventajas-que-tiene-autonomos-comprar-ordenador-portatil-negocio-septiembre/20210906132912025058.html>