

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

**FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUIMICA**



**Modelado y simulación de un calentador de agua eléctrico de
temperatura variable basado en un controlador proporcional
integral derivativo**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

Autor: Uceda Pérez, Juan Manuel

Asesor: Dr. Loyola Carranza, Wilber Alamiro

Trujillo – Perú

2021

JURADO DICTAMINADOR



Ing. Ernesto S. Wong Lopez
CIP. 40771

Ms. Ernesto Wong López
Presidente



Ms. Walter Moreno Eustaquio
Secretario



Ms. Paul Henry Esquerre Pereyra
Miembro



Dr. Wilber Alámido Loyola Carranza
Asesor

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi familia por su amor incondicional y apoyo constante. A mi padre, Juan C. Uceda Vargas, quien con su ejemplo, sacrificio y dedicación me ayuda en mi formación personal y profesional. Asimismo, a mi madre Rosario P. Pérez Azahuanche; a mi hermano, Juan Carlos, y a mi tío, Santiago A. Uceda Duclós.

Asimismo, agradezco a mi asesor, el Dr. Wilber A. Loyola Carranza, por sus enseñanzas y su apoyo en el desarrollo de la presente investigación.

Finalmente, manifiesto un agradecimiento especial al Ing. Carlos Herrera de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por su aporte en el desarrollo tecnológico de la presente tesis.

ÍNDICE

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
I. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Realidad problemática	12
1.2. Antecedentes	13
1.3. Marco Teórico	17
1.3.1. Hervidor de Agua Eléctrico	17
1.3.2. Controlador On-Off	18
1.3.3. Control Proporcional Integral Derivativo (PID)	20
1.3.4. Efecto <i>Windup</i>	21
1.3.5. Placa Arduino Uno	22
1.3.6. Sensor DS18B20	22
1.3.7. Métodos de Sintonización Controladores PID.....	22
1.3.7.1. Método de la Respuesta en Escalón de Ziegler y Nichols.....	22
1.3.7.2. Métodos de Visioli	24
1.3.7.3. Método de Síntesis Directa	25
1.3.7.4. Método de Ali y Majhi	26
1.3.7.5. Método de Arrieta, Vilanova y Visioli	27
1.4. Problemas	29
1.4.1. Problema General.....	29
1.4.2. Problemas Específicos.....	29
1.5. Objetivos	29
1.5.1. Objetivo General	29
1.5.2. Objetivos Específicos	29
1.6. Hipótesis	29
1.6.1. Hipótesis General	29
1.6.2. Hipótesis Específicas.....	30
1.7. Importancia del Problema	30
II. MATERIALES Y MÉTODOS	31
2.1. Modelado de un Hervidor de Agua Eléctrico.....	31
2.1.1. Objeto de estudio.....	31
2.1.2. Métodos y técnicas	31
2.1.2.1. Análisis Termodinámico	31
2.1.2.2. Prueba de Escalón Abierto.....	32
2.1.2.3. Técnicas matemáticas.....	34
2.1.2.4. Métodos computacionales.....	35
2.1.3. Equipos e instrumentación.....	35
2.1.4. Procedimiento experimental.....	35

2.2.	Diseño del Lazo de Control PID de Temperatura.....	36
2.2.1.	Métodos y técnicas	36
2.3.	Diseño del Controlador PID	36
2.3.1.	Métodos y técnicas	36
2.3.1.1.	Modelado de ajuste	36
2.3.1.2.	Fórmulas de sintonización.....	37
2.3.1.3.	Esquema <i>anti-windup</i>	37
2.3.1.4.	<i>Setpoint weighting</i>	37
2.3.1.5.	Caracterización dinámica	37
2.3.1.6.	Técnicas computacionales	37
III.	RESULTADOS	41
3.1.	Modelo Matemático del Hervidor de Agua Eléctrico.....	41
3.2.	Diseño Propuesto del Lazo de Control PID.....	46
3.3.	Diseño del Controlador PID	47
IV.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	60
4.1.	Modelado Teórico y Fenomenología.....	60
4.2.	Propuesta Tecnológica	63
4.3.	Rendimiento del Controlador PID.....	64
V.	CONCLUSIONES.....	67
VI.	RECOMENDACIONES	67
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
	ANEXOS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Ejemplar de un hervidor de agua eléctrico metálico	18
Fig. 1.2. Termostato bimetálico para hervidor de agua eléctrico	19
Fig. 1.3. Formas de un controlador <i>on-off</i> : a) ideal, b) con histéresis y c) con banda muerta	20
Fig. 1.4. Fluctuación de la temperatura alrededor del valor de consigna	20
Fig. 1.5. Placa Arduino Uno con microcontrolador	23
Fig. 1.6. Sensor DS18B20.....	23
Fig. 1.7. Parámetros característicos de una curva de reacción según el método de la respuesta en escalón de Ziegler y Nichols	24
Fig. 2.1. Algoritmo de análisis termodinámico	33
Fig. 2.2. Diseño de lazo abierto.....	33
Fig. 2.3. Diagrama de conexiones entre el sensor DS18B20 y la placa Arduino Uno.....	34
Fig. 2.4. Diagrama de bloques de la prueba de lazo abierto	34
Fig. 3.1. Conceptualización de un hervidor de agua eléctrico: objeto real (a) y concepto mental de este (b)	42
Fig. 3.2. Diagrama de bloques del hervidor de agua eléctrico.....	45
Fig. 3.3. Gráfico temperatura vs tiempo para el hervidor de agua eléctrico	45
Fig. 3.4. Gráfico de potencia vs tiempo para el hervidor de agua eléctrico	46
Fig. 3.5. Curvas de reacción de la planta y de ajuste FOPDT.....	46
Fig. 3.6. Componentes del lazo de control PID: el sensor de temperatura DS18B20 (1), el potenciómetro 10 kOhm (2), el microcontrolador en la placa Arduino Uno (3) y el sistema de calefacción (bloque de línea discontinua) basado en un relé en estado sólido (4) y su dissipador de calor (5)	47
Fig. 3.7. Diagrama de bloques en Simulink de un calentador de agua eléctrico con control PID de temperatura, <i>setpoint weighting</i> y un circuito <i>anti-windup</i> ..	48
Fig. 3.8. Respuestas de lazo obtenidas a partir del método de respuesta en escalón de Ziegler y Nichols con <i>setpoint weighting</i> y <i>anti-windup</i> para cambios del setpoint de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	49
Fig. 3.9. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de respuesta en escalón de Ziegler y Nichols con <i>setpoint weighting</i> y <i>anti-windup</i> para cambios del setpoint de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	49

Fig. 3.10. Respuestas dinámicas obtenidas a partir del método de Visioli basado en el criterio ISE para cambios del <i>setpoint</i> de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	51
Fig. 3.11. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de Visioli basado en el criterio ISE para cambios del <i>setpoint</i> de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	51
Fig. 3.12. Respuestas del lazo obtenidas a partir del método de Visioli basado en el criterio de minimización del índice ITSE para cambios del <i>setpoint</i> de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	52
Fig. 3.13. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de Visioli basado en el criterio de minimización del índice ITSE para cambios del <i>setpoint</i> de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	52
Fig. 3.14. Respuestas del lazo obtenidas a partir del método de Visioli basado en el criterio ISTE para cambios del <i>setpoint</i> de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	53
Fig. 3.15. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de Visioli basado en el criterio ISTE para cambios del <i>setpoint</i> de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	54
Fig. 3.16. Respuestas de lazo del controlador PID sintonizado por el método de síntesis directa con <i>setpoint weighting</i> y <i>anti-windup</i> para cambios del setpoint de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	55
Fig. 3.17. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de síntesis directa con <i>setpoint weighting</i> y <i>anti-windup</i> para cambios del setpoint de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	55
Fig. 3.18. Efecto del factor λ sobre la dinámica del lazo de control para cambios del <i>setpoint</i> de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	56
Fig. 3.19. Respuestas del lazo obtenidas a partir del método de Ali y Majhi con <i>anti-windup</i> para cambios del <i>setpoint</i> de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	57
Fig. 3.20. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de Ali y Majhi con <i>anti-windup</i> para cambios del <i>setpoint</i> de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	57
Fig. 3.21. Efecto del filtro derivativo sobre la dinámica del proceso según el método de Ali y Majhi con <i>anti-windup</i> : a) con filtro derivativo y b) sin filtro derivativo	58

Fig. 3.22. Respuestas del lazo obtenidas a partir del método de Arrieta, Vilanova y Visioli con <i>anti-windup</i> para cambios del <i>setpoint</i> de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	59
Fig. 3.23. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de Arrieta, Vilanova y Visioli con <i>anti-windup</i> para cambios del <i>setpoint</i> de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C	60
Fig. 3.24. Efecto del <i>setpoint weight</i> sobre la dinámica del lazo según el método de Arrieta, Vilanova y Visioli con <i>anti-windup</i> : a) con <i>setpoint weight</i> y b) sin <i>setpoint weight</i>	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Fórmulas de sintonización de Ziegler y Nichols para una prueba de escalón de lazo abierto.....	26
Tabla 1.2. Fórmulas de sintonización de controladores PID de Visioli (2001) según los índices de desempeño integrales ISE, ITSE e ISTE	27
Tabla 1.3. Valores de los parámetros λ para sistemas integrantes según el factor de balance	30
Tabla 2.1. Características del hervidor de agua eléctrico.....	34
Tabla 2.2. Conexiones entre el sensor DS18B20 y la placa Arduino Uno.....	36
Tabla 2.3. Metodologías de diseño del controlador PID para procesos integrantes	40
Tabla 3.1. Parámetros de ajuste según un modelo FOPDT	47
Tabla 3.2. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de lazo abierto de Ziegler y Nichols	50
Tabla 3.3. Parámetros de sintonización de un controlador PID según el método de Visioli y los índices de desempeño integrales ISE, ITSE e ISTE	50
Tabla 3.4. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de Visioli y un mínimo índice ISE	51
Tabla 3.5. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de Visioli y un mínimo índice ITSE.....	53
Tabla 3.6. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de Visioli y un mínimo índice ISTE.....	54
Tabla 3.7. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de síntesis directa	56
Tabla 3.8. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de Ali y Majhi con <i>anti-windup</i>	58
Tabla 3.9. Efecto del filtro derivativo sobre las respuestas dinámicas para un controlador PID sintonizado por el método de Ali y Majhi con <i>anti-windup</i>	58
Tabla 3.10. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de Arrieta, Vilanova y Visioli con <i>setpoint weighting</i> y <i>anti-windup</i>	60
Tabla 3.11. Efecto del <i>setpoint weight</i> sobre las respuestas dinámicas para un controlador PID sintonizado por el método de Arrieta, Vilanova y Visioli con <i>anti-windup</i>	61

Tabla 3.12. Energía consumida (kW) por el calentador durante la primera hora de su funcionamiento	62
Tabla B.1. Primer grupo de datos experimentales	79
Tabla B.2. Segundo grupo de datos experimentales.....	84
Tabla B.3. Tercer grupo de datos experimentales.....	89
Tabla B.4. Cuarto grupo de datos experimentales	94
Tabla B.5. Quinto grupo de datos experimentales	99
Tabla B.6. Sexto grupo de datos experimentales	104

RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito desarrollar el modelo y la simulación computacional de un calentador de agua eléctrico, con control variable de temperatura basado en la implementación de un controlador PID, con *anti-windup* a un hervidor eléctrico. El modelado se llevó a cabo mediante la aplicación de balances de materia y energía, así como en una prueba de lazo abierto. Para esto último, se ensambló un sistema de medición de la temperatura con una placa Arduino Uno y un sensor DS18B20, obteniéndose un modelo FOPDT mediante ajuste por mínimos cuadrados de las curvas de reacción. Posteriormente, se propuso el diseño del lazo de control PID y se realizó la sintonización del controlador basada en la aplicación de cinco metodologías diferentes y *anti-windup*. Los resultados de la simulación demostraron que la metodología basada en Ali y Majhi (2010) proporcionaron las respuestas dinámicas con menores sobrepasos y tiempos de estabilización, asimismo un menor consumo energético durante la primera hora de funcionamiento del aparato.

Palabras claves: Hervidor de agua eléctrico, controlador PID, *anti-windup* y *setpoint weighting*.

ABSTRACT

The purpose of this research was to develop the model and computational simulation of an electric water heater with variable temperature control, based on the implementation of a PID controller with anti-windup to an electric kettle. The modeling was carried out by applying mass and energy balances, as well as in an open loop test. For the latter, a temperature measurement system was assembled with an Arduino Uno board and a DS18B20 sensor, obtaining a FOPDT model by means of least squares adjustment of the reaction curves. Subsequently, the design of the PID control loop was proposed and the controller tuning was carried out based on the application of five different and anti-windup methodologies. The simulation results showed that the methodology based on Ali and Majhi (2010) provided the dynamic responses with the smallest overshoots and short stabilization times, as well as lower energy consumption during the first hour of device operation.

Key words: Electric water kettle, PID controller, anti-windup and setpoint weighting.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Un hervidor de agua eléctrico es un aparato utilizado para el calentamiento y la ebullición de agua, siendo este proceso regulado por una unidad que permite su apagado inmediato cuando se haya alcanzado tal condición de saturación (Murray *et al.*, 2016, p. 231). Por otro lado, un controlador proporcional integral derivativo (PID) es el dispositivo de control más utilizado en la industria de procesos (Shah *et al.*, 2019, p. 1683) y cuya manipulación y demanda ingenieril han hecho posible su evolución tecnológica (Visioli, 2006, p. 1).

En el Perú, la demanda de hervidores de agua eléctricos ha ido aumentando durante la última década (Jugo, 2020; MINEM, 2020; Pinto, 2020; Redacción EC, 2020), aspecto que se traduce como un relevante uso cotidiano de estos aparatos. Como se mencionó anteriormente, el funcionamiento de estos se basa en un termostato bimetálico de acción mecánica (Billingsley, 2010, p. 42), el cual permite calentar agua hasta alcanzar su condición de saturación a la presión del ambiente. En otras palabras, un hervidor eléctrico, como su mismo nombre lo indica, solamente sirve para hervir agua. Esto resulta siendo un inconveniente para aquellos usuarios que desean controlar la temperatura del agua a un valor determinado, esto es, cuando se requiere precisar la temperatura a ciertos valores para preparar diferentes tipos de infusiones (Madugu, 2018, p. 15; Shah *et al.*, 2019, p. 1684). Dada esta condición, el consumo de energía resulta siendo usualmente desmesurado. La evidencia reporta que los hervidores eléctricos son los artefactos con el segundo mayor índice de consumo energético, especialmente durante las temporadas invernales (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2010; Redacción Gestión, 2018). Estos representan en promedio un consumo energético equivalente al uso de 10 a 45 focos de 100 W (Redacción El Peruano, 2020), asimismo le correspondía hasta 2017 una potencia eléctrica nominal de 1850 W y una utilización de dos (02) horas en promedio diariamente (MINEM, 2017). A pesar del lanzamiento al mercado de hervidores digitales y algunos ejemplares basados en un control PID (hervidores *Stagg EKG* y *Corvo EKG*), la demanda de estos es demasiado

minúscula como para representar una solución ante esta problemática lo suficientemente viable desde un punto de vista técnico o económico. Asimismo, también se han reportado reclamos por parte de usuarios referidos a fallos en sus sistemas de control (Amazon, 2020). Por otro lado, y en lo que respecta a los controladores PID, a pesar de que estos son los más utilizados en la industria, pocas veces intervienen en actividades más sencillas (Madugu, 2018, p. 15). Por lo tanto, existe gran desconcierto por parte la comunidad científica referente a su escasa relevancia en el sector doméstico.

Una última problemática se orienta al contexto académico. Si bien la disciplina de control de procesos orienta sus esfuerzos a una escala industrial, resultaría crucial que los estudiantes se familiaricen con una aplicación más sencilla, pero con elevada trascendencia. Son pocas las investigaciones que pretenden unificar y validar las supuestas atribuciones de cada una de las metodologías referentes al diseño de controladores PID, partiendo desde el modelado teórico y el análisis mediante simulación computacional. Si bien esto último podría atribuirse al hecho de que gran cantidad de estas investigaciones son realizadas por ingenieros electrónicos, se espera que el presente enfoque, arraigado a la ingeniería química, satisfaga un análisis exhaustivo de tales métodos.

1.2. Antecedentes

Uno de los antecedentes principales de la presente investigación, y el primero en ser reportado, fue el trabajo de Madugu (2018) referente al modelado y la simulación de un hervidor de agua eléctrico con control PID de temperatura. En lo que concierne al modelado, este se sustentó en la conceptualización del proceso y la aplicación de los principios de conservación de masa y energía (Felder y Rousseau, 2005; Himmelblau y Riggs, 2012). Por su parte, Sandler (2017) y Segura (2019) ofrecieron una visión filosófica y rigurosa de estos principios. Para el desarrollo de esta etapa, Madugu (2018) se basó en un modelo de parámetros concentrados (p. 15), presunción también considerada por Murray *et al.* (2016, p. 236) y estudiada por Romagnoli, Palazoglu y Whitaker (2001). Para estos últimos autores, dicha condición se fundamenta en la

búsqueda de un enfoque práctico en aras de una posterior derivación sencilla del modelo matemático. Con el fin de desarrollar su modelo matemático, Madugu (2018, p. 16) aplicó la transformada de Laplace (Corripi y Smith, 2014, p. 14). Posteriormente, para determinar los parámetros del proceso, obtuvo la curva de reacción mediante una prueba de lazo abierto (Madugu, 2018, p. 16; Madugu y Vasira; 2018, p. 187). Para este montaje experimental, se utilizaron un multímetro digital MAS-345, como sensor de la temperatura, y una computadora portátil para la recolección de los datos enviados por el multímetro a través de su conexión a un puerto USB. Debido a que dicha instrumentación resultó siendo imposible de acceder, se recurrió al proyecto presentado por Watson (2018), cuyo objetivo fue la implementación de un sistema de medición de temperatura basado en un termistor DS18B20, una placa Arduino Uno y un código de simulación en el ambiente Arduino IDE. Para el modelado de ajuste, Madugu (2018) empleó el método de la tangente (Visioli, 2006, p. 166; Corripi y Smith, 2014, p. 333) obteniendo un modelo de primer orden con tiempo muerto (FOPDT). Otros métodos reportados de mayor o similar reproducibilidad fueron los de Smith (1972) (Corripi y Smith; 2014, p. 334), Sundaresan y Krishnaswamy (1978) (Seborg *et al.*, 2011, p. 120) y el método basado en áreas (Aström y Hägglund, 1995, p. 24; Visioli, 2006, p. 166). Fue en esta etapa, que se cuestionó dicho trabajo, pues a pesar de que su modelo empírico se relacionaba con el derivado por la teoría, este no logró explicar satisfactoriamente la física del fenómeno.

Shah *et al.* (2019) fueron quienes aportaron la innovación tecnológica al construir un hervidor eléctrico con control PID de temperatura. Su diseño se basaba en una placa Arduino Uno con microcontrolador, un termistor DS18B20, un circuito basado en un modelo TRIAC con un relé en estado sólido (SSR), un *display* de temperatura y un potenciómetro 10 k. Aunque un controlador PID, por teoría, trabaja con señales analógicas, si es posible su conexión a un SSR. Esto quedó evidenciado con algunas investigaciones, como la de Soedira (2020), referente al diseño de una máquina de extrusión de polímeros; y la de Gajjar, Patel y Singh (2015), cuyo objetivo fue la implementación de un controlador PID a una máquina

lavadora de botellas. Por su parte, Tan y Yan (2017) discutieron la factibilidad del ensamblado de un circuito de control de temperatura basado en un microcontrolador.

En la literatura del control de procesos, existen diversos textos clásicos que profundizan estrictamente el diseño de controladores PID (Aström y Hägglund, 1995; Johnson y Moradi, 2005; Chen-Ching, 2006; Visioli, 2006; Vilanova y Visioli, 2012; Díaz-Rodríguez, Han, Bhattacharyya; 2019). Desafortunadamente, son pocos los métodos de sintonización de controladores PID para procesos integrantes, considerándose la amplia variedad de métodos orientados a procesos autorregulados. El trabajo original de Ziegler y Nichols (1942) constituyó el primer enfoque orientado a la sintonización de un controlador PID para un proceso no autorregulado, en este caso, un modelo integrante con tiempo muerto (Aström y Hägglund, 1995, p. 165). Se propusieron dos métodos, siendo el de principal interés en la presente investigación, el de análisis de la respuesta en lazo abierto ante una entrada de escalón unitario. Sin embargo, más tarde, tales fórmulas se han adecuado a la sintonización basada en un modelo FOPDT (Corripio y Smith, 2014). Esto, sumado a la publicación de otros trabajos, como el de Chien, Hrones y Reswick (1952) y Cohen y Coon (1953), ha desplazado en cierta magnitud el interés colectivo por el desarrollo de reglas de sintonización para sistemas no autorregulados. Por otro lado, el aporte original de Ziegler y Nichols (1942) no era capaz de abordar problemas de cambio del *setpoint* (punto de consigna). Ante tal desventaja, Aström y Hägglund (2004) propusieron un método conocido como *setpoint weighting* (Visioli, 2006, pp. 61-63), aunque enfocado a un modelo de planta FOPDT. Fue el trabajo de Chidambaram (2000), el que se encaminó al estudio del control de plantas integrantes con *setpoint weighting*. A pesar de que varios trabajos se centraron en mejorar las ideas planteadas por Ziegler y Nichols, no se analizó el problema de cambio de *setpoint*. Habiéndose analizado otros métodos de sintonización clásicos (Luyben, 1996), se buscaron otras metodologías basadas específicamente en procesos integrantes y la aplicación de un *setpoint weight*. Fue en esta etapa, que se reportó el método de Visioli (2001), el cual llamó la atención por su sencillez en

cuanto a la eliminación de la acción integral de un controlador PID. No obstante, dada la ineeficacia de un controlador PD ante el problema de regulación de una perturbación a la planta. En aras de mayor complejidad y vigencia, se reportó el trabajo de A. S. Rao, V. S. R. Rao y Chidambaram (2009), quienes propusieron el diseño de un controlador PID en serie con un compensador basado en el método de síntesis directa y la adición de un *setpoint weight*. Asimismo, se consideraron las metodologías propuestas por Ali y Majhi (2010) y Arrieta, Vilanova y Visioli (2011). Estos grupos de autores presentaron enfoques unificadores, es decir, metodologías basadas en un rendimiento óptimo del lazo de control ante una entrada de perturbación y un cambio del *setpoint*. Otros trabajos analizados fueron el Chidambaram y Sree (2003), el Control por Modelo Interno (IMC) (Skogestad, 2003; Kaya, 2004) y el predictor de Smith (Liu et al., 2005; Lu, 2005). Las primeras simulaciones basadas en las metodologías citadas presentaron un bajo rendimiento debido al efecto *windup* (Aström y Hägglund, 1995, pp. 76-78). Por otro lado, el trabajo de Wibowo y Susanto (2018) resultó de vital trascendencia. Tales autores propusieron un mejoramiento del control PID de la temperatura de un calentador de agua de laboratorio a través del implemento de un esquema *anti-windup*, siendo este sintonizado por el método de recálculo y seguimiento (Fertik y Ross, 1967; Visioli, 2006, pp. 35-60; Torstensson, 2013). Similarmente, en la investigación relevante de Jalil et al. (2013) se implementó un controlador PID con *anti-windup* a una planta piloto de blanqueamiento de glicerina. Al igual que Wibowo y Susanto (2018), estos autores utilizaron el método de recálculo y seguimiento, asimismo evaluaron el efecto de la constante del seguimiento de tiempo sobre las respuestas dinámicas. Con el propósito de determinar los parámetros óptimos de sintonización, Jalil et al. (2013) caracterizaron cada una de las respuestas dinámicas según el sobrepaso y el tiempo de estabilización. El software MATLAB ofrece el comando *stepinfo* para la caracterización de la respuesta dinámica (Hassaan, 2014, p. 121). Otros criterios de evaluación emplean los índices de desempeño integrales, tales como la integral del error absoluto (IAE) y la integral del error absoluto en el tiempo (ITAE) (Dey, Mudi y Simhachalam, 2014).

1.3. Marco Teórico

1.3.1. Hervidor de Agua Eléctrico

Un hervidor de agua eléctrico, ver Figura 1.1, es un artefacto que sirve para ebullir agua, la cual tiene un propósito alimenticio. Este se inventó a fines del siglo XIX y empezó a sustituir paulatinamente al hervidor convencional de estufa durante los años posteriores (Marcinkowski y Zych, 2017, p. 256).



Fig. 1.1. Ejemplar de un hervidor de agua eléctrico metálico.

Estos aparatos son considerados calentadores *sin toma fija de agua*, dado que poseen la ventaja de poder ser manipulados y transportados fácilmente (Müller *et al.*, 1994, p. 378).

El funcionamiento de estos se basa en una acción mecánica. En su base inferior se integra un termostato bimetálico, ver Fig. 1.2, el cual se encuentra curvado en una dirección y se compone de dos discos metálicos diferentes y concéntricos; uno de los cuales se expande con mayor rapidez que el otro cuando la temperatura se incrementa. En el momento que la temperatura del agua alcanza la condición de saturación, el vapor generado se pone en contacto con el termostato por medio de un conducto que conecta a la base. Esto provoca que el termostato se flexione en la dirección opuesta y se induzca a que una palanca haga caer el circuito. Así se corta el flujo de electricidad y el hervidor se apaga de forma segura.

El elemento calefactor es una resistencia eléctrica. Cuando el hervidor se conecta a un tomacorriente, una corriente eléctrica fluye hacia y a través del dicho elemento, ver Fig. 1.3. La forma de este es similar a la de un serpentín y puede posicionarse dentro de la base o en el interior del

recipiente (Chen y Liu, 2015, p. 296). La resistencia al paso de la carga ofrecida por los metales que constituyen el elemento provoca que la electricidad se convierta en calor (efecto Joule). Dado que este elemento se calienta y, a su vez, está en contacto directo con el agua fría, se transfiere calor por conducción para el calentamiento del líquido (David, 2021).



Fig. 1.2. Termostato bimetálico para hervidor de agua eléctrico.

1.3.2. Controlador On-Off

Un controlador *on-off* presenta dos posiciones fijas: una de encendido (*on*) y otra de apagado (*off*) (Bolton, 2004, p. 102). Formalmente, su ley de control se define así

$$m(t) = \begin{cases} m_{\max} & \leftarrow e(t) > 0 \\ m_{\min} & \leftarrow e(t) < 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

Donde $m(t)$ es la señal de salida del controlador o variable de manipulación (Visioli, 2006, p. 3).

En otras palabras, esta señal salida adquiere un valor máximo cuando el error de control es positivo y un valor mínimo cuando tal error es negativo. Usualmente, se asigna $m_{\min} = 0$ (*off*) y el controlador se implementa mediante un relé (Visioli, 2006, p. 3).

En casos prácticos, la naturaleza básica de un controlador *on-off* se modifica insertando una banda muerta o histéresis para hacer frente al ruido de medición y limitar el desgaste de este. En otras palabras, esta evita que el controlador responda a cambios demasiado minúsculos de la variable controlada (Bolton, 2004, p. 103; Visioli, 2006, p. 4).

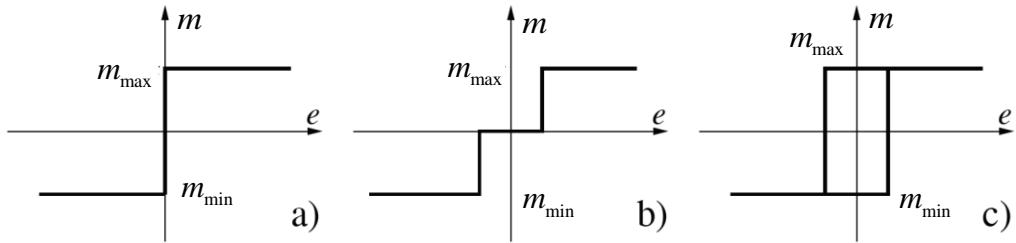


Fig. 1.3. Formas de un controlador on-off: a) ideal, b) con histéresis y c) con banda muerta. Adaptado de Visioli (2006, p. 4).

Este tipo de control es relativamente simple y barato, razón por la cual su uso es extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos. Un ejemplo es el termostato bimetálico (Bolton, 2004, p. 102).

Dado que la acción de un controlador on-off es discontinua y existen tiempos de retardo en la dinámica del sistema, las oscilaciones tendrán de la variable controlada tendrán lugar en su aproximación al valor de consigna (Bolton, 2004, p. 103), ver Fig. 1.4.

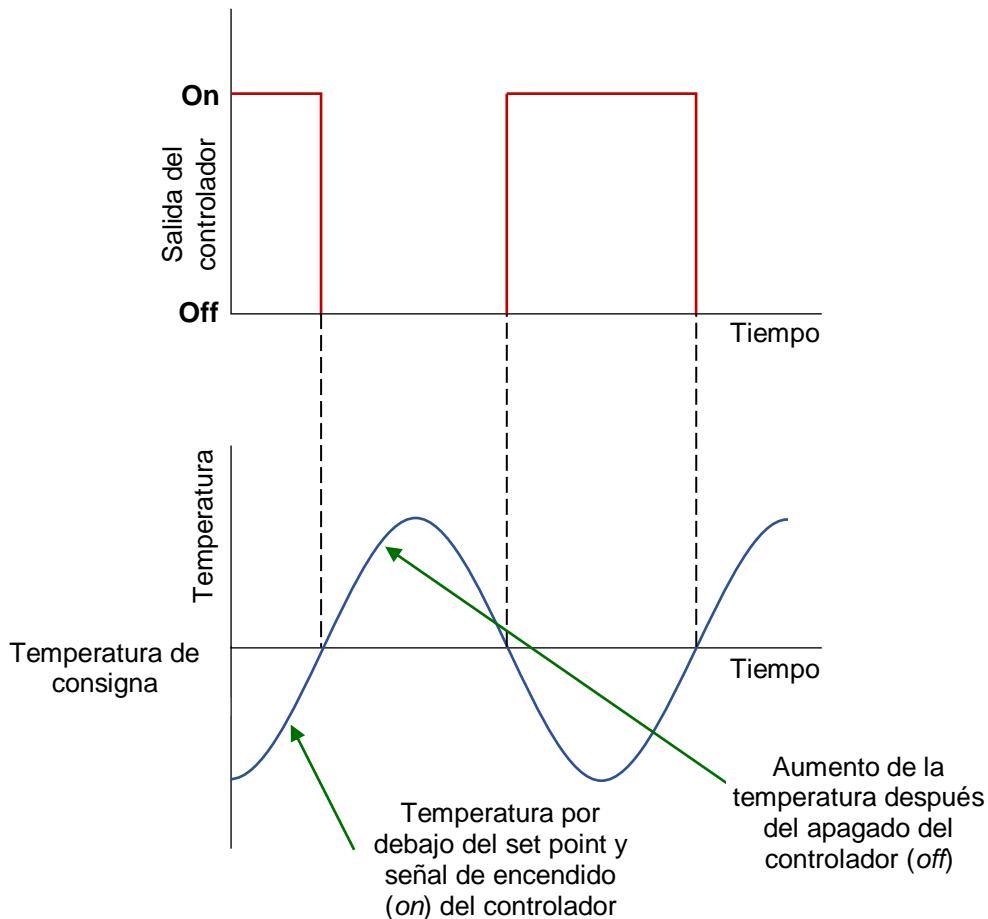


Fig. 1.4. Fluctuación de la temperatura alrededor del valor de consigna. Adaptado de Bolton (2004, p. 103).

1.3.3. Control Proporcional Integral Derivativo (PID)

La mitad de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID o PID modificado (Ogata, 2003). La acción de un controlador PID es la suma de otros tres tipos de acciones de control: una proporcional, una integral y una derivativa.

a) Acción Proporcional

Esta acción es proporcional al error de control. Su ecuación es

$$m(t) = K_p e(t) = K_p [r(t) - c(t)] \quad (1.2)$$

Donde

K_p : Ganancia proporcional

$r(t)$: Variable de referencia (setpoint)

$c(t)$: Variable de control

Su función de transferencia correspondiente es

$$G_C(s) = K_p \quad (1.3)$$

Esta posee la ventaja de evitar esfuerzos excesivos del controlador; sin embargo, también produce un error en estado estacionario, tanto para un cambio del *setpoint* como para la entrada de una perturbación a la planta (Visioli, 2006, pp. 3-4; Seborg *et al.*, 2011, p. 136).

b) Acción Integral

Esta acción es proporcional a la integral del error de control. Su ecuación es

$$m(t) = K_I \int_0^t e(t) dt \quad (1.4)$$

Donde K_I es la ganancia integral. Su función de transferencia correspondiente es

$$G_C(s) = \frac{K_I}{s} \quad (1.5)$$

Debido a la presencia de un polo en el origen del plano complejo, esta acción permite la supresión del error de estado estacionario (Visioli, 2006, p. 5). Una desventaja inherente a esta acción es el fenómeno conocido como *windup* (Seborg *et al.*, 2011, p. 137).

c) Acción Derivativa

Esta acción se basa en la observación de la tasa de cambio del error de control con el tiempo (Corripio y Smith, 2014, p. 252). Su ecuación es

$$m(t) = \frac{de(t)}{dt} \quad (1.6)$$

Donde K_D es la ganancia derivativa. Su función de transferencia correspondiente es

$$G_C(s) = K_D s \quad (1.7)$$

Esta acción mejora el rendimiento del lazo de control, puesto que anticipa una tendencia del error de control y lo contrarresta (Visioli, 2006, p. 6).

En síntesis, un controlador PID ideal es descrito mediante la siguiente función de transferencia

$$G_C(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad (1.8)$$

Donde

τ_I : Constante del tiempo integral

τ_D : Constante del tiempo derivativo

A partir de la ecuación (1.7) se define la forma paralela de un controlador PID

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (1.9)$$

Donde

$$K_I = \frac{K_P}{\tau_I} \quad (1.10)$$

$$K_D = K_P \tau_D \quad (1.11)$$

1.3.4. Efecto Windup

Cuando ocurre un error sostenido, el término integral se vuelve demasiado grande y la salida del controlador eventualmente se satura. Esta acumulación adicional del término integral mientras el controlador está saturado se conoce como *windup* (Seborg *et al.*, 2011, p. 138).

El efecto windup puede ocurrir debido a grandes cambios del *setpoint*, o puede ser causada por grandes perturbaciones o fallas en el equipo (Aström y Hägglund, 1995, p. 76).

1.3.5. Placa Arduino Uno

El Arduino Uno es una placa de microcontrolador basada en el ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada y salida digitales (de los cuales 6 se pueden usar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio (Škultéty, Pivarčiová y Karrach, 2018, p. 169).



Fig. 1.5. Placa Arduino Uno con microcontrolador.

1.3.6. Sensor DS18B20

El DS18B20, ver Fig. 1.4, es un sensor de temperatura digital y que utiliza el protocolo 1-Wire para comunicarse (Hemanth, 2021). Este mide la temperatura dentro de un rango de -55°C a 125°C y con una exactitud del 5% (Fezari y Al Dahoud, 2019).



Fig. 1.6. Sensor DS18B20.

1.3.7. Métodos de Sintonización Controladores PID

1.3.7.1. Método de la Respuesta en Escalón de Ziegler y Nichols

El primer método presentado por Ziegler y Nichols (1942) se fundamenta en la obtención de la curva de reacción de lazo abierto del proceso a partir de una prueba de escalón unitario (p. 159) y se

sustentan en la salida de una respuesta dinámica con razón de asentamiento de un cuarto (Corripio y Smith, 2014, p. 339).

La Fig. 1.7 representa una típica curva de reacción. En el control de procesos no autorregulados, como el control del nivel de un líquido, esta curva alcanza un valor máximo de pendiente y continúa indefinidamente (o hasta que el tanque rebalse) (Ziegler y Nichols, 1942, p. 764). No obstante, estos autores también presentaron un enfoque orientado al control de procesos autorregulados (Smith, 2009; Corripio y Smith, 2014).

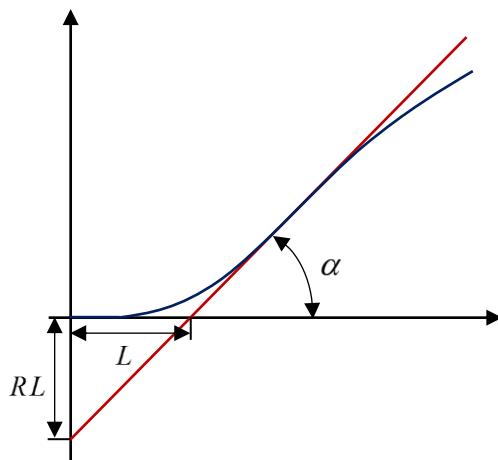


Fig. 1.7. Parámetros característicos de una curva de reacción según el método de la respuesta en escalón de Ziegler y Nichols. Adaptado de Ziegler y Nichols (1942, p. 763).

Esta curva es caracterizada por dos parámetros. El primero es la “velocidad de respuesta” (R), la cual es la tasa máxima de cambio de la curva. Dicho parámetro viene determinado por la pendiente de la recta tangente al punto de inflexión de la curva. La intersección de esta recta con el eje del tiempo provee el segundo parámetro conocido como *lag* o tiempo muerto (L). Asimismo, su intersección con el eje de las ordenadas determina el producto de ambos parámetros (Ziegler y Nichols, 1942, p. 764; Aström y Hägglund, 1995, p. 165). A partir de ambos parámetros, se deriva el siguiente modelo IPDT

$$G_P(s) = \frac{R}{s} e^{-Ls} \quad (1.12)$$

Este es un modelo integrante fue el utilizado originalmente por Ziegler y Nichols para derivar sus fórmulas de sintonización (Aström y Hägglund, 1995), las cuales se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. *Fórmulas de sintonización de Ziegler y Nichols para una prueba de escalón de lazo abierto*

Control	Ganancia	Tiempo integral	Tiempo derivativo
P	$\frac{1}{RL}$		
PI	$\frac{0,9}{RL}$	3,33L	
PID	$\frac{1,2}{RL}$	2,0L	0,5L

Fuente: Aström y Hägglund (1995, p. 136).

1.3.7.2. Métodos de Visioli

Visioli (2001) presentó fórmulas de sintonización de controladores PID aplicados a procesos integrantes e inestables, así como a entradas de perturbación y cambios del punto de consigna (p. 180). A continuación, considérese la siguiente función de transferencia de planta para un proceso integrante.

$$G_p(s) = \frac{K_v}{s} e^{-Ls} \quad (1.13)$$

Donde

K_v : Ganancia de velocidad (Aström y Hägglund, 2004, p. 165).

Para Visioli (2001), el problema de la sintonización de un controlador PID radica en la selección de aquellos parámetros que minimicen ciertos índices de desempeño integrales, tales como la integral del error al cuadrado (ISE), la integral del error al cuadrado por el tiempo (ITSE) y la integral del error al cuadrado por el cuadrado del tiempo (ISTE) (p. 180).

Para un controlador PID y un cambio del *setpoint*, Visioli (2001) derivó sus fórmulas de sintonización, ver Tabla 3.2, mediante un algoritmo genético (p.181). Cabe resaltar que la ausencia del tiempo integral resulta siendo intuitiva, puesto que ya se cuenta con la presencia de un integrador en la función de transferencia de planta para la supresión del error en estado estacionario (Visioli y Zhong, 2011, p. 43).

Tabla 1.2. Fórmulas de sintonización de controladores PID de Visioli según los índices de desempeño integrales ISE, ITSE e ISTE

Criterio	Ganancia	Tiempo integral	Tiempo derivativo
ISE	$\frac{1,03}{KL}$	0	$0,49L$
ITSE	$\frac{0,96}{KL}$	0	$0,45L$
ISTE	$\frac{0,90}{KL}$	0	$0,45L$

Fuente: Visioli y Zhong (2011, p. 43).

1.3.7.3. Método de Síntesis Directa

La función de transferencia de lazo cerrado entre la referencia y la variable de salida es

$$\frac{Y(s)}{Y^{sp}(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)} \quad (1.14)$$

Para el controlador

$$G_c = \frac{1}{G_p} \frac{Y(s)/Y^{sp}(s)}{1-Y(s)/Y^{sp}(s)} \quad (1.15)$$

Se especifica un modelo dinámico para el lazo cerrado.

$$G_c = \frac{1}{G_p} \frac{\left[Y(s)/Y^{sp}(s) \right]_d}{1 - \left[Y(s)/Y^{sp}(s) \right]_d} \quad (1.16)$$

Donde

$\left[Y(s)/Y^{sp}(s) \right]_d$: Función de transferencia deseada para cambios del *setpoint*.

Para el caso particular de un proceso que puede ser aproximado al siguiente modelo IFOPTD

$$G_p = \frac{Ke^{-Ls}}{s(Ts+1)} \quad (1.17)$$

La función de transferencia de lazo cerrado que se especifica para el diseño del controlador es

$$\frac{Y(s)}{Y^{sp}(s)} = \frac{(\eta_2 s^2 + \eta_1 s + 1)e^{-Ls}}{(\lambda s + 1)^3} \quad (1.18)$$

Entonces, para el controlador

$$G_c(s) = \frac{s(\tau s + 1)}{K} \frac{(\eta_2 s^2 + \eta_1 s + 1)}{\left[(\lambda s + 1)^3 - (\eta_2 s^2 + \eta_1 s + 1) e^{-Ls} \right]} \quad (1.19)$$

Se aplica la aproximación de Padé de primer orden para el tiempo muerto. Después de simplificarse, la ecuación se ajusta a un controlador PID en serie con un compensador lead/lag, cuya ley de control es

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \left(\frac{\alpha s + 1}{\beta s + 1} \right) \quad (1.20)$$

Donde

$$K_c = \frac{\eta_1}{K(3\lambda^2 + 1,5L\lambda + 0,5L\eta_1 - \eta_2)} \quad (1.21)$$

$$\tau_I = \eta_1 \quad (1.22)$$

$$\tau_D = \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad (1.23)$$

$$\alpha = 0,5L \quad (1.24)$$

$$\beta = \frac{0,5L\lambda^3}{\tau(3\lambda^2 + 1,5L\lambda + 0,5L\eta_1 - \eta_2)} \quad (1.25)$$

$$\eta_1 = 3\lambda + L \quad (1.26)$$

$$\eta_2 = \frac{(0,5L - \tau)\lambda^3 + (3\tau^2 - 1,5L\tau)\lambda^2 + 3L\tau^2\lambda + 0,5L^2\tau^2}{\tau(0,5L + \tau)} \quad (1.27)$$

Para reducir el sobrepaso de la respuesta dinámica, los autores sugieren adicionar un *setpoint weight* entre 0,3 y 0,4, asimismo recomiendan considerar un factor entre 0,8 y 3,0.

1.3.7.4. Método de Ali y Majhi

Ali y Majhi (2010) propusieron un método de sintonización para procesos integrantes también basado en la minimización del índice ISE, pero con la condición de que la pendiente de la curva de Nyquist tenga un valor específico en la frecuencia de cruce de ganancia.

Considérese un controlador PID en paralelo con filtro derivativo, cuya ley de control es

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \frac{\tau_D s}{\tau_F s + 1} \right) \quad (1.28)$$

Donde τ_F es el filtro derivativo, [s].

Además,

$$\tau_F = \alpha \tau_D \quad (1.29)$$

Donde α es la constante de filtro derivativo. Ali y Majhi (2010) trabajaron con un valor de 0,10.

Se determinaron las siguientes correlaciones de sintonización

$$KK_c T = 0,78 \left(\frac{L}{T} \right)^{-1,53} + 0,10 \quad (1.30)$$

$$\frac{\tau_I}{T} = 5,44 \left(\frac{L}{T} \right)^{1,02} \quad (1.31)$$

$$\frac{\tau_D}{T} = 0,96 \left(\frac{L}{T} \right)^{0,77} \quad (1.32)$$

Siendo estas correlaciones válidas para valores numéricos de L y L/T cercanos a 10.

1.3.7.5. Método de Arrieta, Vilanova y Visioli

Esta metodología combina la sintonización, tanto para la regulación de la entrada de una perturbación como para un cambio del *setpoint* (Arrieta, Vilanova y Visioli, 2011).

Para un modelo IPDT, ecuación 1.13, la familia de parámetros de sintonización basándose en un factor de balance α , cuyo valor depende del tipo de operación del sistema. Para un problema de cambio del punto de consigna, el valor de α es cero o se aproxima a este. Mientras más cercano a la unidad sea este valor, el problema se orienta a la regulación del sistema ante una entrada de perturbación. Para cada α , se utilizan ciertos parámetros γ , ver Tabla 1.3, cuyos valores se restringen a un rango de 0 a 1.

Tabla 1.3. Valores de los parámetros γ para sistemas integrantes según el factor de balance

Parámetro γ	Valores del factor de balance		
	0.25	0.50	0.75
γ_1	0,5591	0,7064	0,8274
γ_2	0,3906	0,5702	0,7532
γ_3	0,5903	0,7421	0,8731

Fuente: Arrieta, Vilanova y Visioli (2001).

Las ganancias de un controlador PID en paralelo se calculan mediante las siguientes fórmulas

$$K_P = \gamma_1 K_P^{id} + (1 - \gamma_1) K_P^{sp} \quad (1.33)$$

$$K_I = \gamma_2 K_I^{id} \quad (1.34)$$

$$K_D = \gamma_3 K_D^{id} + (1 - \gamma_3) K_D^{sp} \quad (1.35)$$

Donde las ganancias se calculan a partir del criterio de mínimo ISE de Visioli (2001). El superíndice “*id*” se refiere a la entrada de una perturbación; mientras que el “*sp*”, a un cambio del *setpoint*. Finalmente, los parámetros de sintonización para la forma ideal del PID se calculan a partir de las ecuaciones (1.10) y (1.11).

1.4. Problemas

1.4.1. Problema General

¿Cómo se describe el funcionamiento de un hervidor de agua eléctrico con un controlador PID de temperatura acoplado?

1.4.2. Problemas Específicos

- a) ¿Cuál es el modelo matemático que describe el funcionamiento de un hervidor de agua eléctrico?
- b) ¿Es factible la implementación de un controlador PID a un hervidor de agua eléctrico?
- c) ¿Cuál es la metodología de diseño de controlador PID que provee la mejor respuesta del lazo de control de temperatura del calentador de agua eléctrico?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Simular el control de temperatura variable de un calentador de agua eléctrico basado en el acoplamiento de un controlador PID a un hervidor de agua casero.

1.5.2. Objetivos Específicos

- a) Desarrollar el modelo matemático de un hervidor de agua eléctrico para describir su funcionamiento y obtener sus parámetros dinámicos.
- b) Diagramar el circuito de control PID de temperatura para simular el lazo de control de un calentador de agua eléctrico.
- c) Analizar y contrastar diferentes metodologías de sintonización del controlador PID con *anti-windup* para obtener el mejor desempeño del calentador de agua eléctrico.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

El acoplamiento de un controlador PID a un hervidor de agua eléctrico proveerá un adecuado control de la temperatura del líquido.

1.6.2. Hipótesis Específicas

- a) El funcionamiento de un hervidor de agua eléctrico obedecerá un modelo dinámico de primer orden con tiempo muerto.
- b) Será factible proponer el diseño de un sistema de control PID de temperatura para el hervidor de agua eléctrico.
- c) La sintonización basada en el método de Arrieta, Vilanova y Visioli y el acoplamiento de un circuito *anti-windup* proveerán la mejor respuesta del lazo de control PID del calentador de agua eléctrico.

1.7. Importancia del Problema

Dentro de un contexto tecnológico, el presente trabajo denota el primer paso para una posterior innovación tecnológica. Esto yace en la modificación de un hervidor de agua eléctrico convencional con el propósito de hacerlo más versátil. La simulación computacional demostró la factibilidad de acoplar un controlador PID con circuito *anti-windup* integrado a uno de estos aparatos caseros. Los esfuerzos se orientaron a que el comportamiento del lazo de control diseñado se traduzca en una respuesta relativamente rápida y con la menor fluctuación posible. En consecuencia, el control eficiente de la temperatura de este calentador permitirá realizar un consumo responsable de la energía y un mejor manejo de la economía de los hogares.

Esta investigación también trasciende dentro de un ámbito académico. La disciplina del control de procesos abarca un sinfín de metodologías de diseño que desafortunadamente son poco contrastadas entre sí. El presente trabajo se justifica en el análisis de cada uno de estos métodos postulados basado en la simulación de un objeto real. Debido a que gran parte de estas investigaciones son llevadas a cabo por ingenieros electrónicos, es lamentable y predecible observar la carencia de un enfoque puramente teórico. En otras palabras, tales trabajos tienen por objetivo solamente presentar una tecnología y validar su funcionamiento empíricamente. Precisamente, los fundamentos teóricos adquieren relevancia por su trasfondo riguroso y forman parte de los cimientos de esta investigación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Modelado de un Hervidor de Agua Eléctrico

Esta etapa de la investigación comprendió dos fases. La primera consistió en el modelado teórico de un hervidor de agua eléctrico por medio de la aplicación de un análisis termodinámico; la segunda, en la determinación del modelo de ajuste a través de un montaje experimental.

2.1.1. Objeto de estudio

El objeto de análisis de la presente investigación fue un hervidor de agua eléctrico cuyas principales características de diseño, proporcionadas por el manual de usuario, se citan en la Tabla 1. Una descripción más detallada del aparato se visualiza en el Apéndice A.

Tabla 2.1. *Características del hervidor de agua eléctrico (Miray, 2021)*

Criterio	Dato
Marca	Miray
Número de modelo	HM-870
Voltaje	220 V
Potencia nominal	1850 W
Material de construcción	Acero inoxidable
Capacidad máxima	1,7 L
Dimensiones	291 mm × 150 mm × 245 mm
Masa	0,805 kg

Autoría propia.

2.1.2. Métodos y técnicas

2.1.2.1. Análisis Termodinámico

Basándose en la filosofía rigurosa de Sandler (2017) y en la didáctica de Segura (2019), se aplicó un algoritmo, ver Figura 2.1, el cual permitió la obtención del modelo matemático que explica la operación dinámica e ideal del objeto definido. Dicho algoritmo estuvo conformado por los siguientes pasos.

a) Conceptualización

Esta se define como un proceso de generación de ideas (Mogahzy, 2009) destinadas a la comprensión y la descripción de un fenómeno.

En este caso, se conceptualizó el hervidor eléctrico definiéndose el sistema, el tipo de proceso y las presunciones lógicas y necesarias.

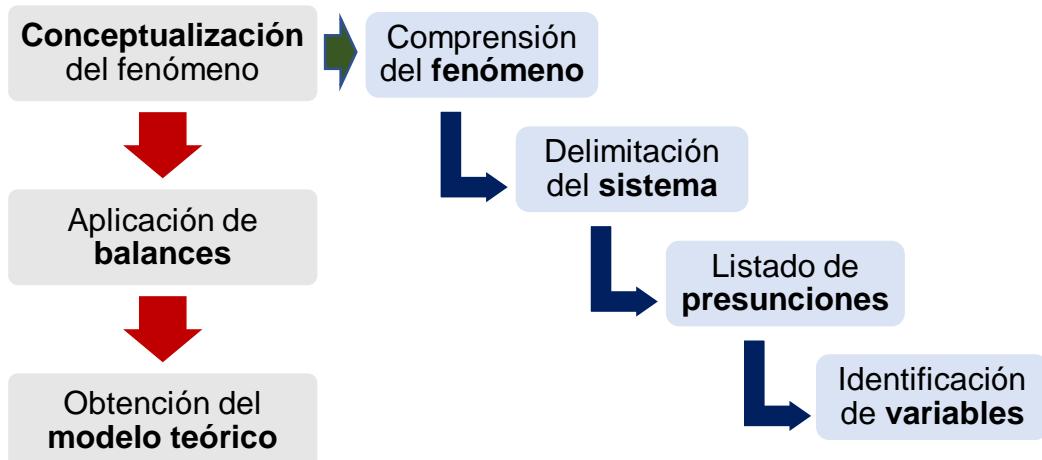


Fig. 2.1. Algoritmo de análisis termodinámico.

b) Balances de Materia y Energía

Se aplicaron las ecuaciones de balances de materia y energía con el propósito de evaluar los índices de variación de masa y temperatura con el tiempo.

2.1.2.2. Prueba de Escalón Abierto

Una prueba de escalón abierto permitió obtener la curva de reacción del hervidor de agua eléctrico. La Fig. 2.2 describe el esquema de lazo abierto, véase 2.1.3 para conocer la instrumentación.

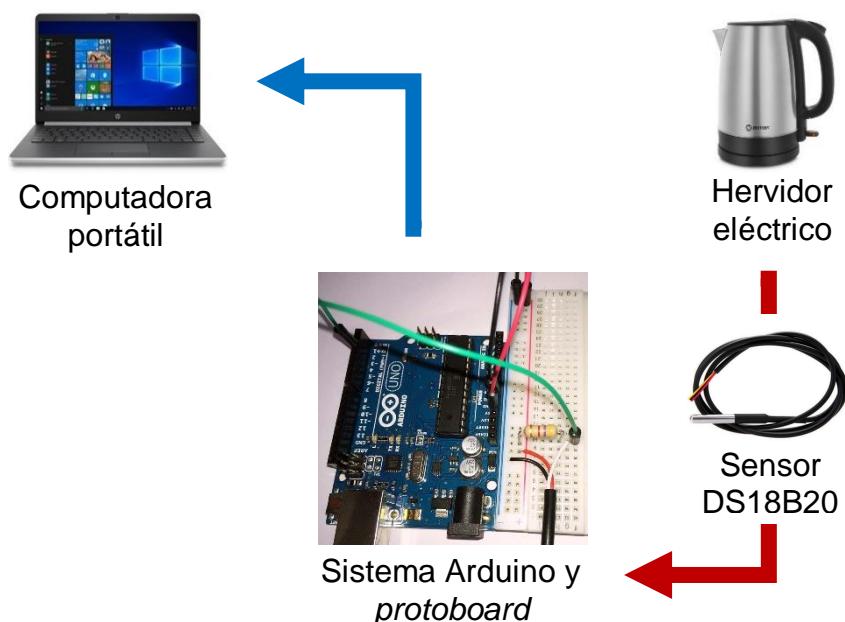


Fig. 2.2. Esquema de lazo abierto.

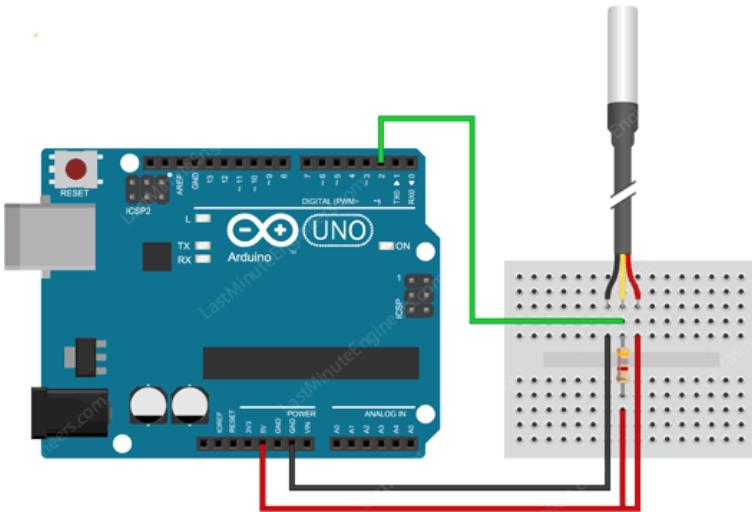


Fig. 2.3. Diagrama de conexiones entre el sensor DS18B20 y la placa Arduino Uno
(Redacción *LastMinuteEngineers*, 2021).

Tabla 2.2. Conexiones entre el sensor DS18B20 y la placa Arduino Uno

Pin de DS18B20	Puerto Arduino
Alimentación V _{DD}	7
Tierra GND	GND
Transmisión de datos DQ	5V

Autoría propia

A partir de la Fig. 2.2, se construyó el diagrama de bloques basado en la simbología del software *Simulink* (MATLAB R2021b), ver Fig. 2.4. Obsérvese los bloques correspondientes al hervidor eléctrico y al sistema Arduino de medición de la temperatura (sensor Arduino).

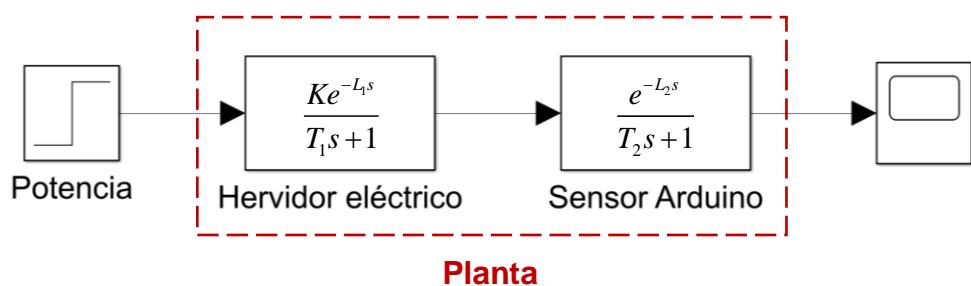


Fig. 2.4. Diagrama de bloques de la prueba de lazo abierto.

Del diagrama de bloques se dedujo un modelo dinámico de segundo orden con tiempo muerto (SOPDT). Entonces, se definió la siguiente función de transferencia para la planta (sistema hervidor eléctrico y sensor Arduino)

$$G_P(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{(T_1s+1)(T_2s+1)} \quad (2.1)$$

Donde

- K : Ganancia del proceso en estado estacionario, [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$],
- T_1 : Constante de tiempo del hervidor eléctrico, [s],
- T_2 : Constante de tiempo del sistema Arduino, [s],
- L : Tiempo muerto de la planta (suma del tiempo muerto del hervidor L_1 y el del sensor L_2), [s].

A partir de la ecuación (2.1), se derivó

$$T(t) = \bar{T}^{sp} + KA\dot{Q}_{\max} \left(1 - e^{-(t-L)/T_1}\right) + KB\dot{Q}_{\max} \left(1 - e^{-(t-L)/T_2}\right) \quad (2.2)$$

Donde

\bar{T}^{sp} : Temperatura de consigna (*setpoint*) inicial, [$^{\circ}\text{C}$].

Además,

$$A = 1 - \frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_2}} \quad (2.3)$$

$$B = 1 - A \quad (2.4)$$

Posteriormente, se procedió al cálculo de los parámetros del proceso mediante un ajuste de datos por mínimos cuadrados y la aplicación del complemento *Solver* de Microsoft Excel.

El presente método culminó con la recolección de los parámetros calculados para cada curva de reacción, la eliminación de datos atípicos y el promedio de los valores.

2.1.2.3. Técnicas matemáticas

a) Transformada de Laplace

La transformada de Laplace permitió resolver la ecuación diferencial derivada del balance de energía, así como despejar la función de transferencia del proceso (Corripio y Smith, 2014, p. 16).

b) Ajuste de datos por mínimos cuadrados

Se utilizó el ajuste por mínimos cuadrados para obtener el modelo dinámico de la planta a partir del tratamiento de los datos de las curvas de reacción (ver Tablas A.1 a A.6).

2.1.2.4. Métodos computacionales

a) Arduino IDE 1.6.8.

El software Arduino IDE 1.6.8 permitió la elaboración y la carga del código de simulación de medición y registro de la temperatura, léase Anexo A, a la placa Arduino Uno.

b) Excel 2020

Este software facilitó el gráfico de las curvas de reacción y todos los cálculos posteriores.

c) Plantilla de Excel PLX-DAQ

Este complemento de Microsoft Excel se utilizó para la recolección automática de los datos de tiempo y temperatura proporcionados por el sistema Arduino.

d) Solver de Microsoft Excel

Este complemento de Microsoft Excel se aplicó a la determinación de los parámetros del proceso mediante el ajuste de datos por mínimos cuadrados.

2.1.3. Equipos e instrumentación

- a) Un sensor de temperatura DS18B20
- b) Una placa Arduino Uno con cable de conexión a puerto USB
- c) Una placa de pruebas o de inserción (*Protoboard*)
- d) Cables puente con conexiones macho-macho
- e) Una resistencia de 10 kOhm
- f) Una computadora portátil

2.1.4. Procedimiento experimental

- a) Llenar el hervidor de agua eléctrico hasta alcanzar su capacidad máxima.
- b) Armar el sistema Arduino de medición de temperatura realizando las conexiones detalladas en la Fig. 2.2 y la Tabla 2.2.
- c) Conectar el sistema Arduino a la computadora portátil a través del puerto USB y posicionar el sensor DS18B20 en el interior del hervidor.
- d) Abrir el ambiente Arduino IDE 1.6.8. y descargar las librerías de OneWire y DallasTemperature.
- e) Redactar el código de simulación (Anexo A) en una plantilla nueva.

- f) Validar el código y subirlo a la placa Arduino Uno.
- g) Conectar el hervidor eléctrico y ponerlo en marcha. Inmediatamente, hacer correr la herramienta PLX-DAQ.
- h) Registrar la temperatura hasta que empiece a disminuir una vez que se haya alcanzado la saturación y el hervidor se haya apagado. Detener la herramienta PLX-DAQ.

2.2. Diseño del Lazo de Control PID de Temperatura

2.2.1. Métodos y técnicas

Se llevó a cabo un análisis bibliográfico con la finalidad de evaluar circuitos de control diseñados por otros autores. Se orientaron los esfuerzos a definir los siguientes elementos.

- a) Sensor
- b) Controlador
- c) Elemento de acción

Dada la naturaleza y los alcances de la presente investigación, solamente se limitó a definir estos componentes, mas no a explicar el fundamento técnico de su ensamblado.

2.3. Diseño del Controlador PID

2.3.1. Métodos y técnicas

2.3.1.1. Modelado de ajuste

El método de Ziegler y Nichols (1942) permitió obtener el modelo de ajuste de tipo IPDT para cada una de las curvas de reacción. Para ello, la tangente en el “punto de inflexión” se determinó mediante un análisis de regresión lineal.

$$T(t) = \bar{T}^{sp} + R\dot{Q}_{PN}(t-L) \quad (2.5)$$

Donde \bar{T}^{sp} era el valor inicial del *setpoint* (temperatura de consigna), mientras que R era la velocidad de respuesta.

Asimismo, se utilizó el método de Aström y Hägglund (1995) para obtener el modelo IFOPDT de la curva de reacción.

2.3.1.2. Fórmulas de sintonización

La Tabla 2.3 presenta las fórmulas correspondientes a cada uno de los métodos de sintonización aplicados al diseño de un controlador PID. A continuación, se detalla cada uno de estos métodos.

- a) Método de lazo abierto de Ziegler y Nichols (1942)
- b) Métodos de Visioli (2001)
- c) Método de síntesis directa con compensador lead/lag (A. S. Rao, V. S. R. Rao y Chidambaram, 2009)
- d) Método de Ali y Majhi (2010)
- e) Método de Arrieta, Vilanova y Visioli (2011)

2.3.1.3. Esquema anti-windup

Se aplicó el método de recálculo y seguimiento (Visioli, 2006) para la determinación del tiempo de seguimiento y su ganancia respectiva (pp. 38-39).

2.3.1.4. Setpoint weighting

Con el propósito de mejorar el desempeño del controlador PID, Chidambaram (2003) sugirió la adición de un *setpoint weight* al lazo de control (p. 215).

2.3.1.5. Caracterización dinámica

Se calcularon el tiempo de elevación, el sobrepaso, el tiempo de estabilización y el pico máximo para cada respuesta dinámica.

2.3.1.6. Técnicas computacionales

a) Comando *stepinfo* de MATLAB R2021b

Para llevar a cabo la caracterización dinámica, se utilizó la siguiente sintaxis del comando *stepinfo* de MATLAB R2021b.

$$S = \text{stepinfo}(T, t, T_{\infty}^{sp}) \quad (2.6)$$

Esta sintaxis calculó las características de la respuesta dinámica con relación a su valor final en estado estacionario T_{∞}^{sp} , el cual ya se conocía de antemano.

b) Comando *trapz* de MATLAB R2021b

Se utilizó la siguiente sintaxis del comando *trapz* de MATLAB R2021b para el cálculo del área bajo la señal de salida del controlador PID.

$$Q_i = \text{trapz}(t, T_i) \quad (2.7)$$

Esta sintaxis calculó la integral aproximada de T_i definida en el intervalo de tiempo t cuyo rango fue de 0 a 3600 s mediante el método del trapecio. El resultado Q_i se definió como la cantidad de energía consumida durante la primera hora de funcionamiento del calentador de agua eléctrico.

Tabla 2.3. Metodologías de diseño del controlador PID para procesos integrantes

Método	Modelo de planta	Modelo de controlador PID	Fórmulas o correlaciones de sintonización		
Método 1 ^[1]	$G_p(s) = \frac{K_v e^{-Ls}}{s}$	$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right)$	$K_c = \frac{1,2}{RL}$ $\tau_I = 2,0L$ $\tau_D = 0,5L$		
Método 2 ^[2]	$G_p(s) = \frac{K_v e^{-Ls}}{s}$	$G_c(s) = K_c (1 + \tau_D s)$	Criterio ISE: $K_c = \frac{1,03}{K_v L}$ $\tau_D = 0,49L$	Criterio ITSE: $K_c = \frac{0,96}{K_v L}$ $\tau_D = 0,45L$	Criterio ISTE: $K_c = \frac{0,90}{K_v L}$ $\tau_D = 0,45L$
Método 3 ^[3]	$G_p(s) = \frac{K e^{-Ls}}{s(Ts+1)}$	$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \left(\frac{\alpha s + 1}{\beta s + 1} \right)$	$K_c = \frac{\eta_1}{K(3\lambda^2 + 1,5L\lambda + 0,5L\eta_1 - \eta_2)}$ $\tau_I = \eta_1$ $\tau_D = \frac{\eta_2}{\eta_1}$ $\alpha = 0,5L$ $\beta = \frac{0,5L\lambda^3}{\tau(3\lambda^2 + 1,5L\lambda + 0,5L\eta_1 - \eta_2)}$ $\eta_1 = 3\lambda + L$ $\eta_2 = \frac{(0,5L - \tau)\lambda^3 + (3\tau^2 - 1,5L\tau)\lambda^2 + 3L\tau^2\lambda + 0,5L^2\tau^2}{\tau(0,5L + \tau)}$		
Método 4 ^[4]	$G_p(s) = \frac{K e^{-Ls}}{s(Ts+1)}$	$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \frac{\tau_D s}{\tau_F s + 1} \right)$	$KK_c T = 0,78 \left(\frac{L}{T} \right)^{-1,53} + 0,10$ $\frac{\tau_I}{T} = 5,44 \left(\frac{L}{T} \right)^{1,02}$		

$$\frac{\tau_D}{T} = 0,96 \left(\frac{L}{T} \right)^{0,77}$$

Método 5^[5]

$$G_P(s) = \frac{K_v e^{-Ls}}{s}$$

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right)$$

$$K_P(\gamma_1) = \gamma_1 K_c^{ld} + (1 - \gamma_1) K_c^{sp}$$

$$K_I(\gamma_2) = \gamma_2 K_I^{ld}$$

$$K_D(\gamma_3) = \gamma_3 K_D^{ld} + (1 - \gamma_3) K_D^{sp}$$

$$K_c = K_P(\gamma_1)$$

$$\tau_I = \frac{K_P(\gamma_1)}{K_I(\gamma_2)}$$

$$\tau_D = \frac{K_D(\gamma_3)}{K_P(\gamma_1)}$$

K_c^{ld} , K_I^{ld} , K_D^{ld} calculados según el criterio ISE de Visioli (2001) para una entrada de perturbación.

K_c^{sp} , K_I^{sp} , K_D^{sp} calculados según el criterio ISE de Visioli (2001) para un cambio de punto de consigna.

Autoría propia.

[1] Basado en la propuesta original de Ziegler y Nichols (1942).

[2] Método de Visioli (2001).

[3] Basado en la propuesta original de A. S. Rao, V. S. R. Rao y Chidambaram (2009).

[4] Basado en la propuesta original de Ali y Majhi (2010).

[5] Basado en la propuesta original de Arrieta, Vilanova y Visioli (2011)

III. RESULTADOS

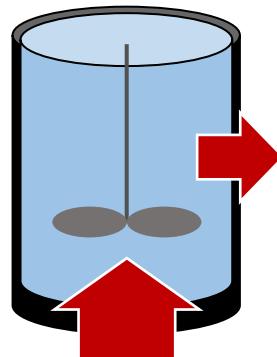
3.1. Modelo Matemático del Hervidor de Agua Eléctrico

Se conceptualizó un hervidor eléctrico, ver Fig. 3.1, como un recipiente cilíndrico metálico que contiene y calienta por medio de una resistencia un volumen de agua líquida equivalente a su capacidad máxima de diseño (1,7 L). Considerándose dicho volumen de líquido como el sistema de análisis, se establecieron las siguientes presunciones.

- a) Las pérdidas de agua debido a difusión y convección son despreciables.
- b) Las propiedades físicas del agua son homogéneas en todo su volumen e independientes de la temperatura.
- c) Las paredes del hervidor son diatérmicas y están constituidas de un único material, el cual también posee propiedades físicas homogéneas e independientes de la temperatura.
- d) Se transfiere una potencia de entrada constante en el tiempo y que se distribuye uniformemente en el volumen de agua.
- e) La temperatura del ambiente se mantiene constante durante el funcionamiento del hervidor eléctrico.



a)



b)

Fig. 3.1. Conceptualización de un hervidor de agua eléctrico: objeto real (a) y concepto mental del mismo objeto (b).

Obsérvese en la Fig. 3.1 el concepto mental de un hervidor eléctrico formulado a partir del objeto real. Las flechas rojas representan energía transferida entre el sistema y el ambiente circundante. La flecha inferior denota la potencia de entrada al sistema dada una resistencia metálica posicionada en la base del hervidor (efecto Joule), mientras que la flecha

horizontal representa la transferencia de calor del sistema hacia el aire circundante. Ambas formas de calor involucran los mecanismos de transferencia por conducción y convección. Cabe resaltar que, no se tomó en consideración la energía transferida por radiación. A continuación, se presentan las ecuaciones de balance derivadas de esta conceptualización, concluyéndose así el análisis termodinámico.

Sea el balance de materia en estado uniforme

$$\frac{dM(t)}{dt} = 0 \quad (3.1)$$

Donde

M : Masa de agua contenida en el hervidor, [kg]

Sea el balance de energía en estado uniforme

$$\rho V \hat{C}_p \frac{dT(t)}{dt} = \dot{Q}(t) - UA[T(t) - T_a] \quad (3.2)$$

Donde

ρ : Densidad del agua, [kg/L],

V : Volumen de agua contenida en el hervidor eléctrico, [L],

\hat{C}_p : Capacidad calorífica a presión constante del agua, [kJ/kg · L],

T : Temperatura del agua, [°C],

\dot{Q} : Potencia de entrada, [kW],

U : Coeficiente global de transferencia de calor, [kW/m² · °C],

A : Área de transferencia de calor, [m²],

T_a : Temperatura del ambiente, [°C].

Sea el balance de energía en estado estable

$$\rho V \hat{C}_p \frac{dT^{sp}}{dt} = -UA(T^{sp} - T_a) \quad (3.3)$$

Donde

T^{sp} : Temperatura de consigna en condición estable, [°C].

Al sustraerse la ecuación (3.3) de la ecuación (3.2),

$$\rho V \hat{C}_p \frac{dT(t)}{dt} + UAT(t) = \dot{Q}(t) \quad (3.4)$$

A partir de la ecuación (3.4) se define

$$\mathbf{T}(t) = T(t) - T^{sp} \quad (3.5)$$

Donde

\mathbf{T} : Desviación de la temperatura del agua, [°C].

Al aplicarse la transformada de Laplace a la ecuación (3.4), se obtiene

$$\frac{\mathbf{T}(s)}{\dot{Q}(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \quad (3.6)$$

Donde

K_p : Ganancia del proceso en estado estable, [°C/kW].

τ_p : Constante de tiempo del proceso, [s].

A partir de la función de transferencia, ecuación (3.6), se definen los siguientes parámetros

$$K_p = \frac{1}{UA} \quad (3.7)$$

$$\tau_p = \frac{\rho V \hat{C}_p}{UA} \quad (3.8)$$

Las curvas de respuesta obtenidas mediante la prueba de escalón abierto se muestran en Anexo B.

Se obtuvo la siguiente función de transferencia para la planta

$$G_p(s) = \frac{3,70e^{-22,84s}}{(32.573,96s+1)(3,36s+1)} \quad (3.9)$$

A partir de la cual se derivaron

$$G_p(s) = \frac{3,70e^{-21,84s}}{32.573,96s+1} \quad (3.10)$$

$$H(s) = \frac{e^{-s}}{3,36s+1} \quad (3.11)$$

Donde

$G_p(s)$: Función de transferencia del proceso [°C/W].

$H(s)$: Función de transferencia del sensor de temperatura, [-].

A continuación, se presenta el diagrama de bloques en Simulink referente al proceso de calentamiento de agua en el hervidor eléctrico.

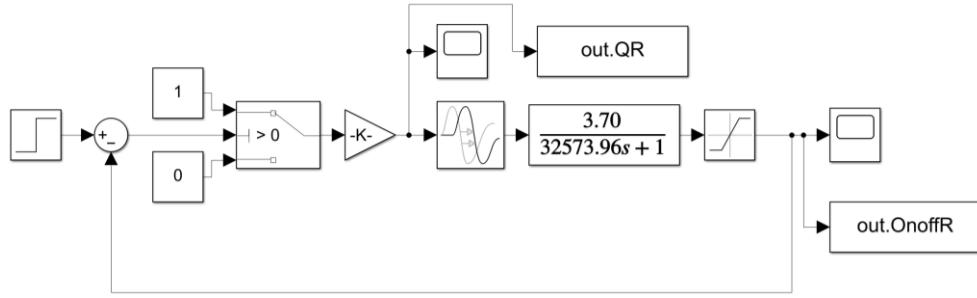


Fig. 3.2. Diagrama de bloques en Simulink del hervidor de agua eléctrico.

Asimismo, la Fig. 3.3 describe el comportamiento de la temperatura del agua en función del tiempo. Obsérvese la condición de saturación alcanzada cuando la desviación de temperatura es igual a 80°C (recuérdese un valor inicial de la temperatura del líquido aproximadamente igual a 20°C).

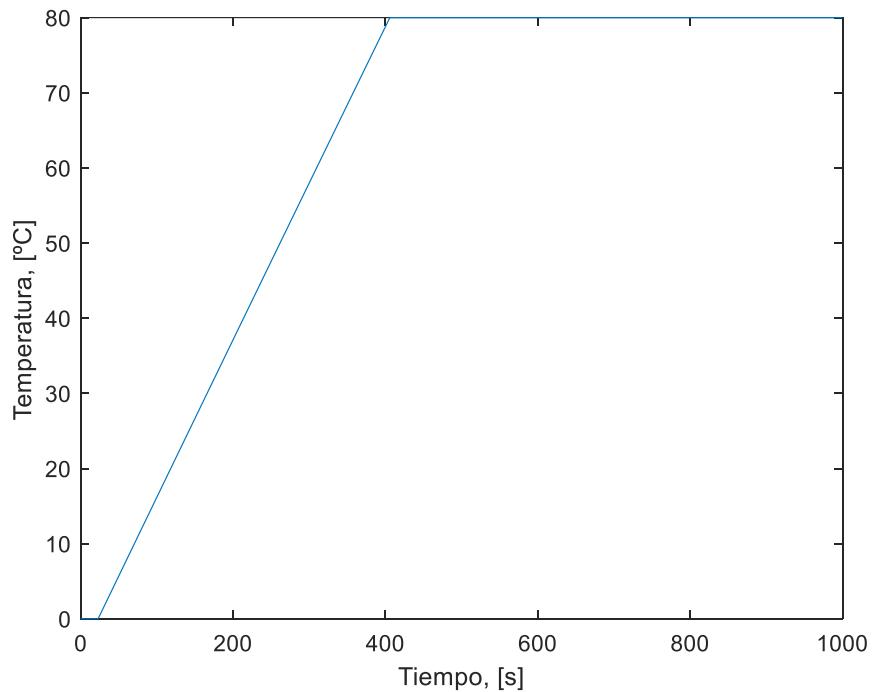


Fig. 3.3. Gráfico de temperatura vs tiempo para el hervidor de agua eléctrico.

Por otro lado, la Fig. 3.4 representa la potencia de salida en función del tiempo. Obsérvese que la potencia máxima entregada por el equipo es igual a 1850 W.

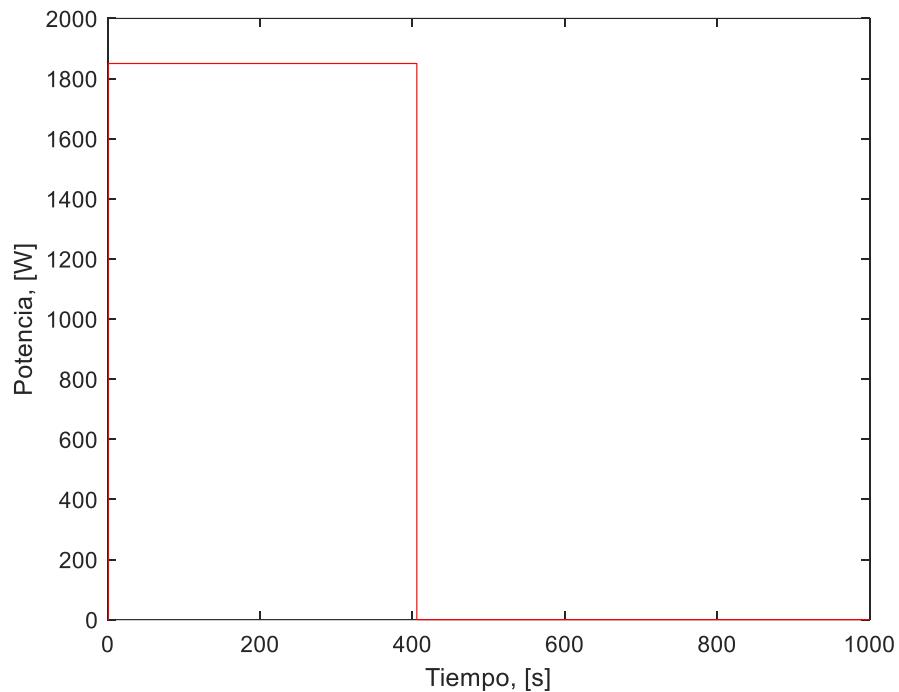


Fig. 3.4. Gráfico de potencia vs tiempo para el hervidor de agua eléctrico.

La Fig. 3.5 presenta las curvas de ajuste basadas en un modelo dinámico del tipo FOPDT, asimismo la Tabla 3.1 expone los parámetros determinados.

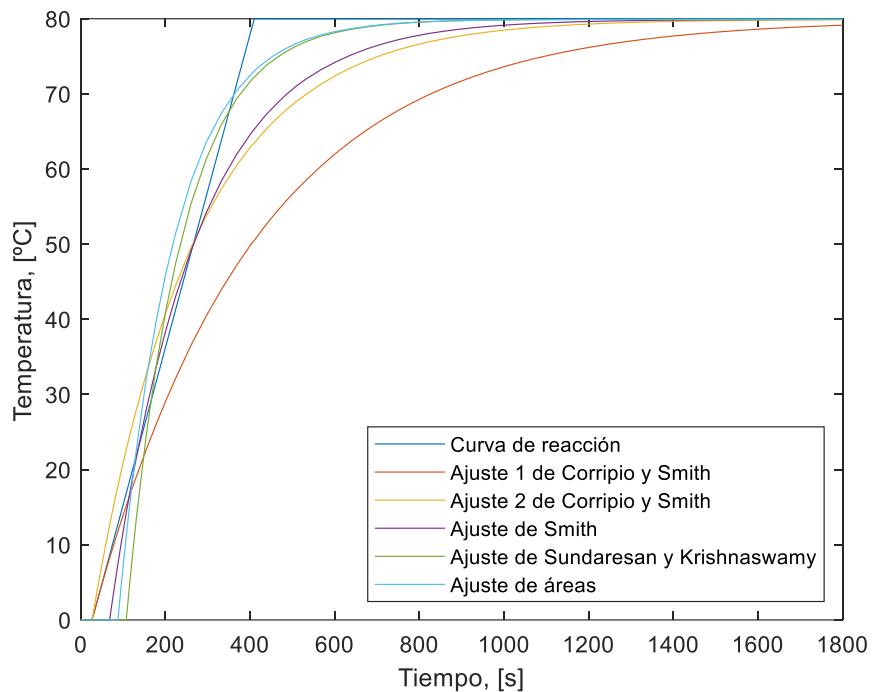


Fig. 3.5. Curvas de reacción de la planta y de ajuste FOPDT.

Tabla 3.1. Parámetros de ajuste según un modelo FOPDT

Método	Ganancia, [°C/W]	Constante del tiempo, [s]	Tiempo muerto, [s]
Corripio y Smith (1)	0,0432	382,77	25,79
Corripio y Smith (2)	0,0432	241,92	25,79
Smith	0,0432	200,42	67,29
Sundaresan y Krishnaswamy	0,0432	128,45	106,64
Áreas	0,0432	130,61	86,92

Autoría propia.

3.2. Diseño Propuesto del Lazo de Control PID

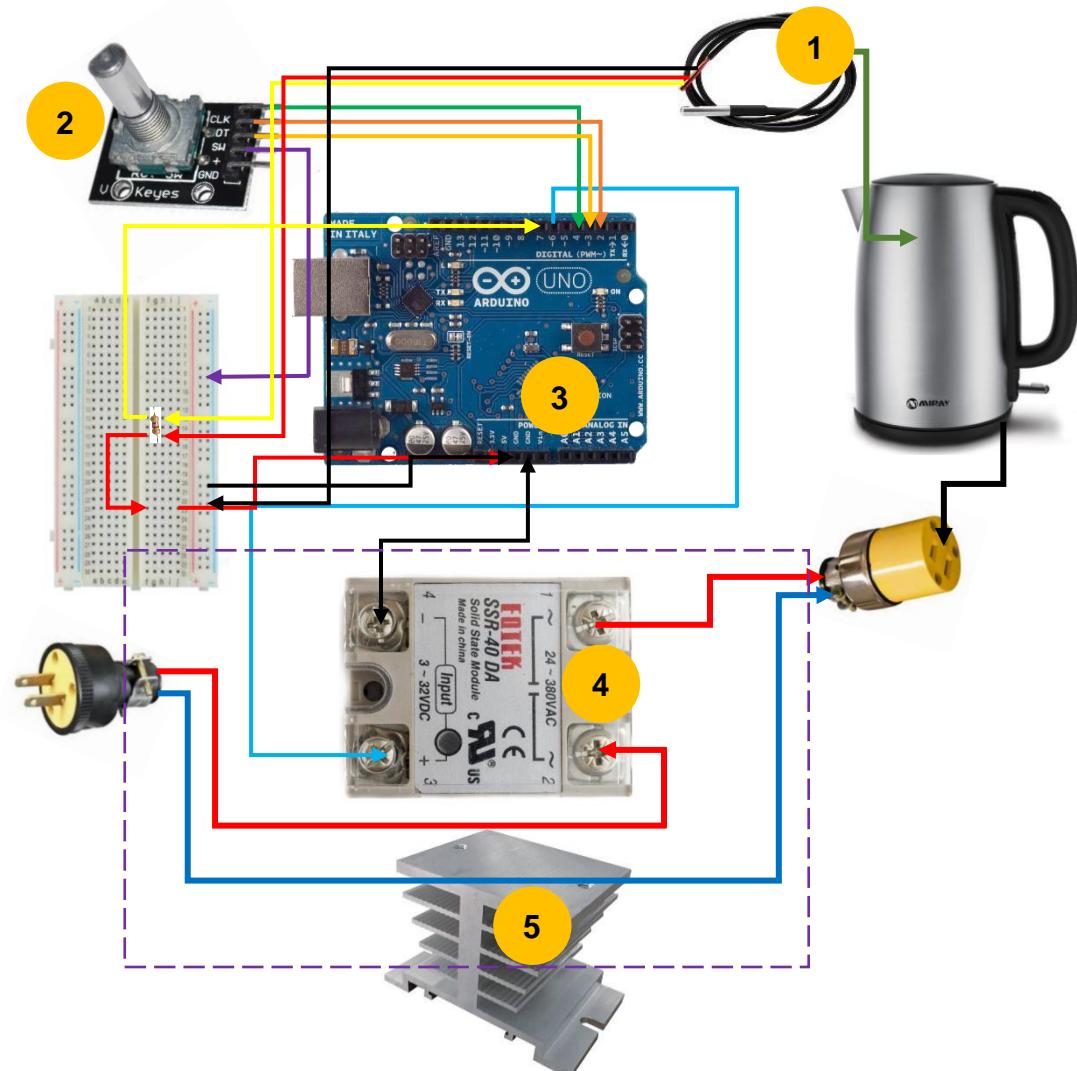


Fig. 3.6. Componentes del lazo de control PID: el sensor de temperatura DS18B20 (1), el encoder rotatorio KY-040 (2), el microcontrolador en la placa Arduino Uno (3) y el sistema de calefacción (bloque de línea discontinua) basado en un relé en estado sólido (4) y su disipador de calor (5).

Obsérvese en la Fig. 3.6 la propuesta de diseño del lazo de control PID de temperatura para el hervidor de agua eléctrico, así como sus componentes.

3.3. Diseño del Controlador PID

Obsérvese en la Fig. 3.7 el diagrama de bloques en Simulink de un calentador de agua eléctrico con control PID variable de temperatura, *setpoint weighting* y un circuito *anti-windup*.

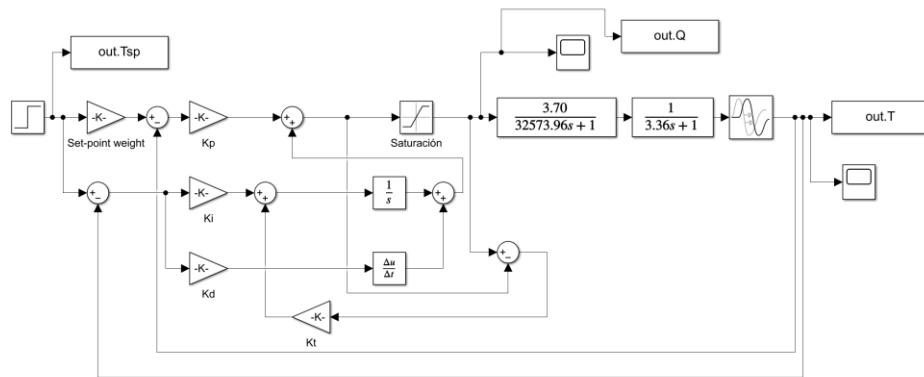


Fig. 3.7. Diagrama de bloques en Simulink de un calentador de agua eléctrico con control PID de temperatura, *setpoint weighting* y un circuito *anti-windup*.

Mediante el ajuste de los datos experimentales, ver Tablas B.1 a B.7 en el Anexo B, se determinó el siguiente modelo IPDT para la planta

$$G_p(s) = \frac{0,000113}{s} e^{-25,53s} \quad (3.12)$$

A partir del método de la respuesta en escalón de Ziegler y Nichols, se calcularon una ganancia de 416,51 W/°C, un tiempo integral de 51,06 s y un tiempo derivativo de 12,77 s para la sintonización de un controlador PID ideal. Asimismo, se consideró un *setpoint weight* de 0,4. Para el esquema *anti-windup*, se calculó una constante del tiempo de seguimiento de 25,53 s. La Fig. 3.8 describe las respuestas dinámicas de salida y cuyas características se presentan en la Tabla 3.2. Asimismo, la Fig 3.9 describe la potencia de salida del controlador en función del tiempo.

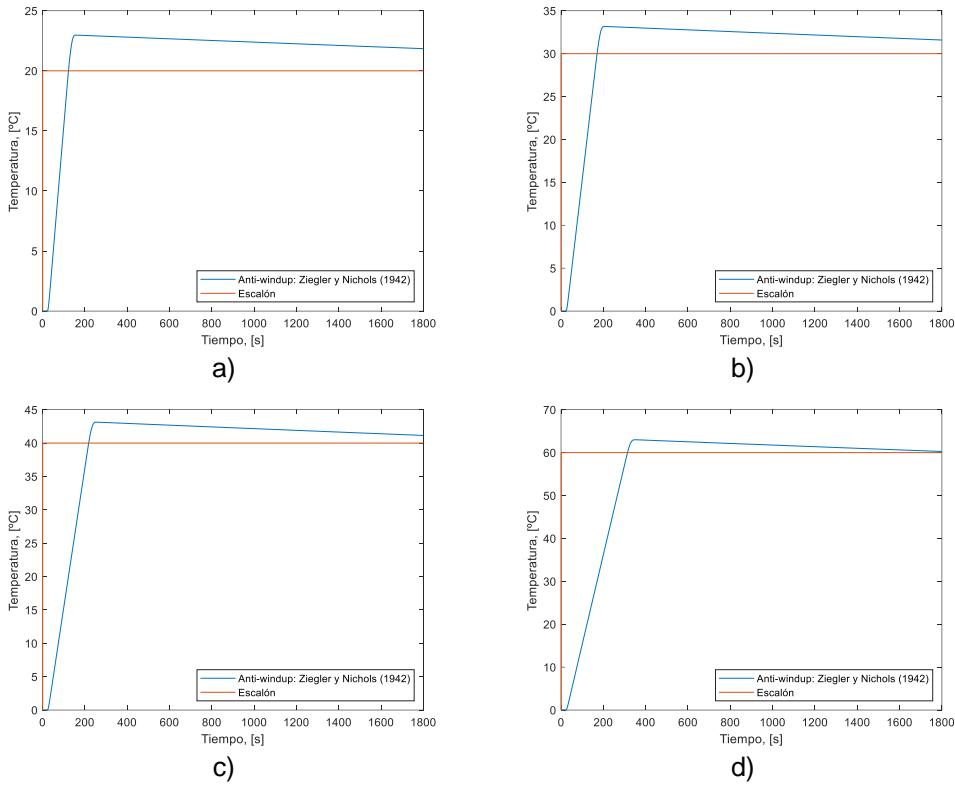


Fig. 3.8. Respuestas del lazo obtenidas a partir del método de respuesta en escalón de Ziegler y Nichols con *setpoint weighting* y *anti-windup* para cambios del *setpoint* de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C.

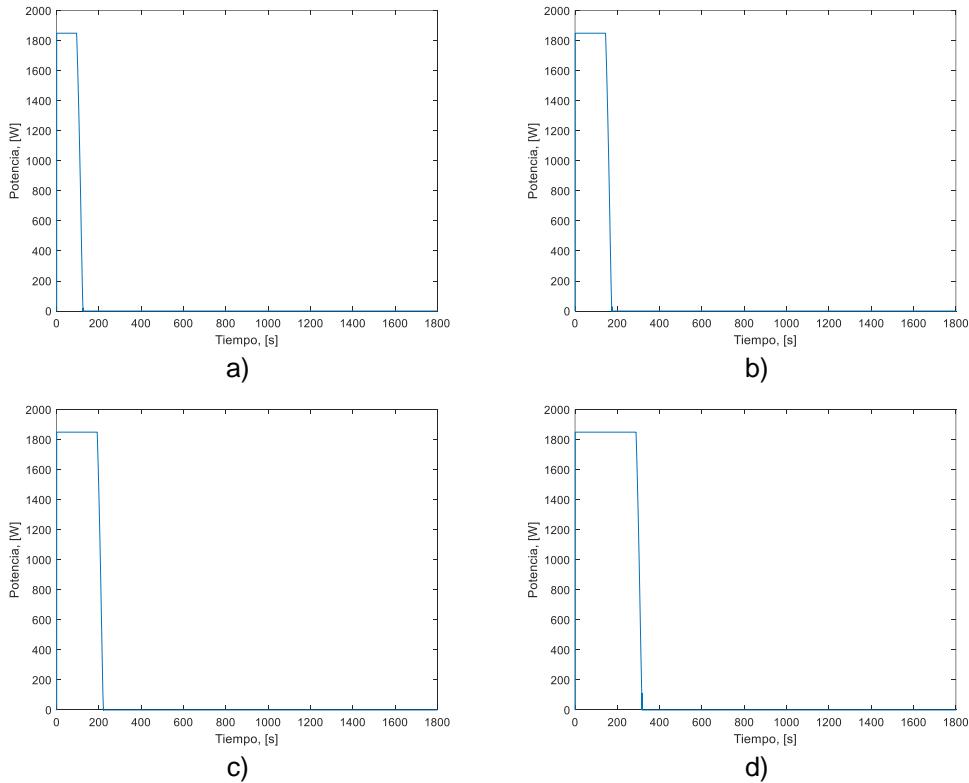


Fig. 3.9. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de respuesta en escalón de Ziegler y Nichols con *setpoint weighting* y *anti-windup* para cambios del *setpoint* de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C.

Tabla 3.2. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de lazo abierto de Ziegler y Nichols.

Cambio del setpoint	Tiempo de elevación, [s]	Sobrepaso, [%]	Pico máximo, $^{\circ}\text{C}$	Tiempo de estabilización, [s]
20	76,3301	14,8440	22,9688	3689,5
30	114,4821	10,5530	33,1659	2836,7
40	152,7324	7,8321	43,1328	2072,1
60	229,4329	4,9927	62,9956	1296,6

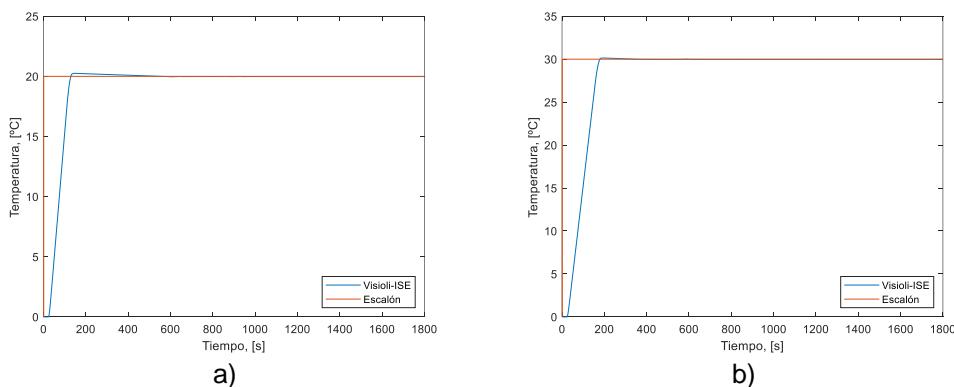
Autoría propia.

Análogamente, se determinaron los valores de los parámetros de sintonización para un controlador PID ideal según los métodos de Visioli y cada criterio de minimización de índice de desempeño integral, ver Tabla 3.3. Las Figs. 3.10, 3.12 y 3.14 describen las respuestas dinámicas de salida y cuyas características se presentan en las Tablas 3.4, 3.5 y 3.6, respectivamente. Asimismo, las Figs. 3.11, 3.13 y 3.5 describen la potencia de salida del controlador en función del tiempo.

Tabla 3.3. Parámetros de sintonización de un controlador PID según el método de Visioli y los índices de desempeño integrales ISE, ITSE e ISTE

Índice de desempeño integral	Ganancia, $[\text{W}/^{\circ}\text{C}]$	Tiempo integral, [s]	Tiempo derivativo, [s]
ISE	357,03	0	12,51
ITSE	332,77	0	11,49
ISTE	311,97	0	11,49

Autoría propia.



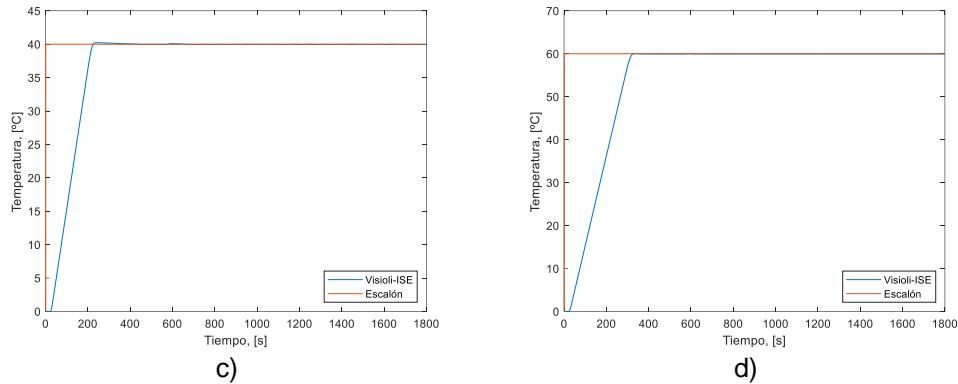


Fig. 3.10. Respuestas del lazo obtenidas a partir del método de Visioli basado en el criterio ISE para cambios del *setpoint* de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C.

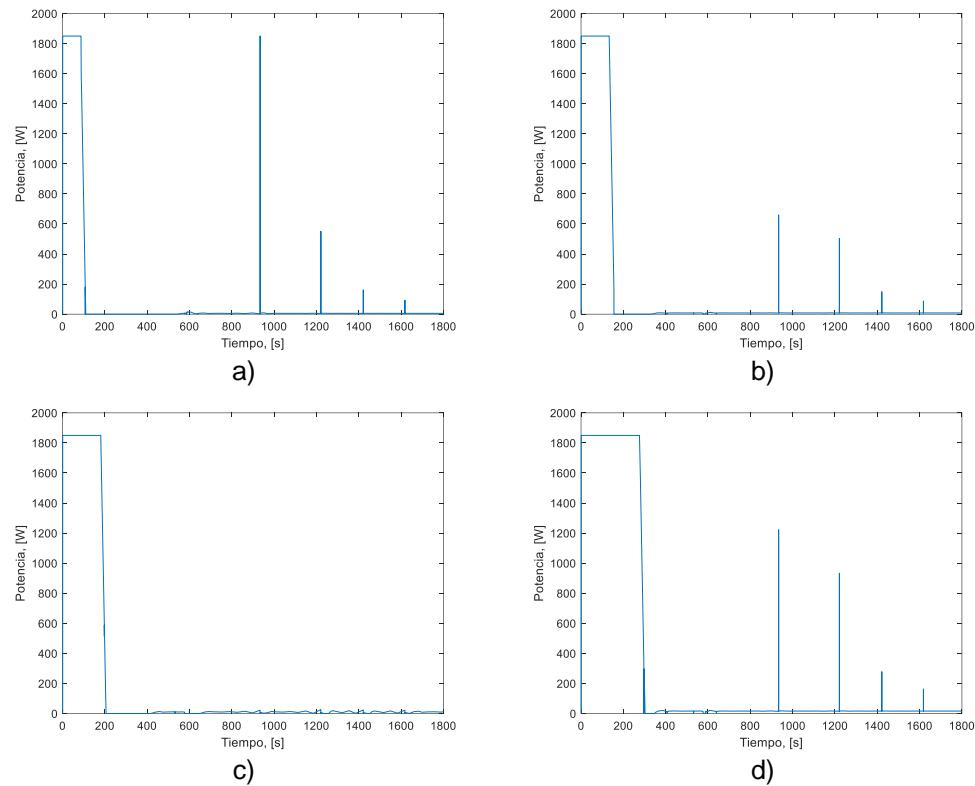


Fig. 3.11. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de Visioli basado en el criterio ISE para cambios del *setpoint* de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C.

Tabla 3.4. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de Visioli y un mínimo índice ISE

Cambio del <i>setpoint</i>	Tiempo de elevación, [s]	Sobrepaso, [%]	Pico máximo, [°C]	Tiempo de estabilización, [s]
20	76,5284	1,2518	20,2504	124,3734
30	114,4859	0,4620	30,1386	171,1923
40	152,7334	0,5701	40,2280	216,4469
60	229,4332	0,0616	60,0370	310,3477

Autoría propia.

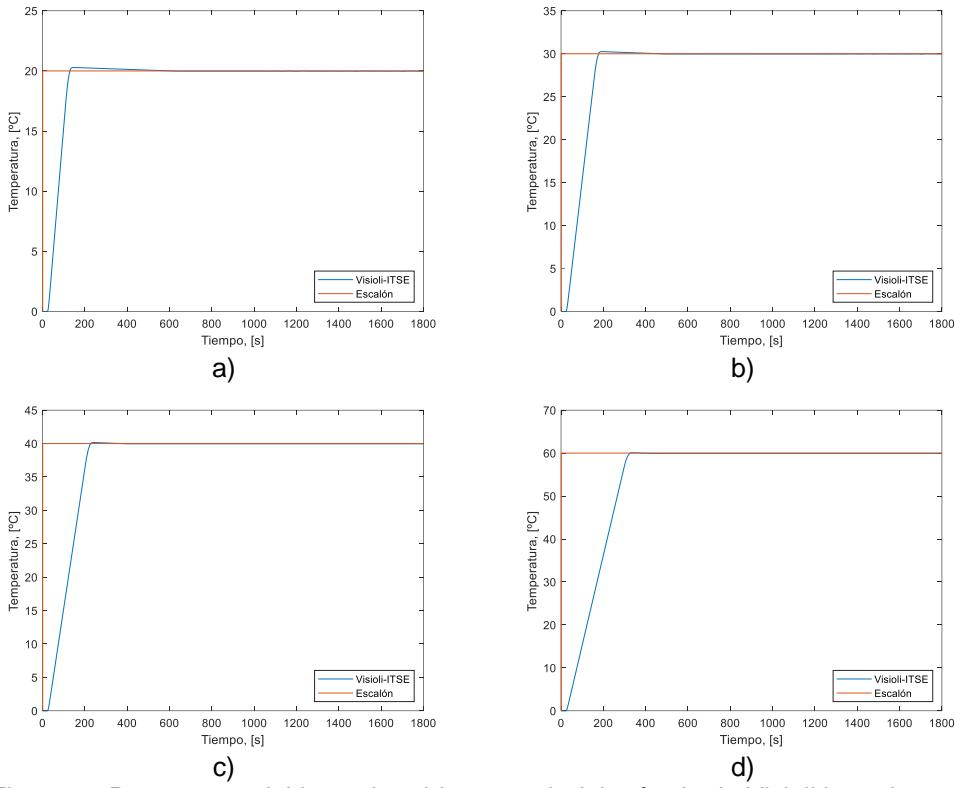


Fig. 3.12. Respuestas del lazo obtenidas a partir del método de Visioli basado en el criterio de minimización del índice ITSE para cambios del *setpoint* de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C.

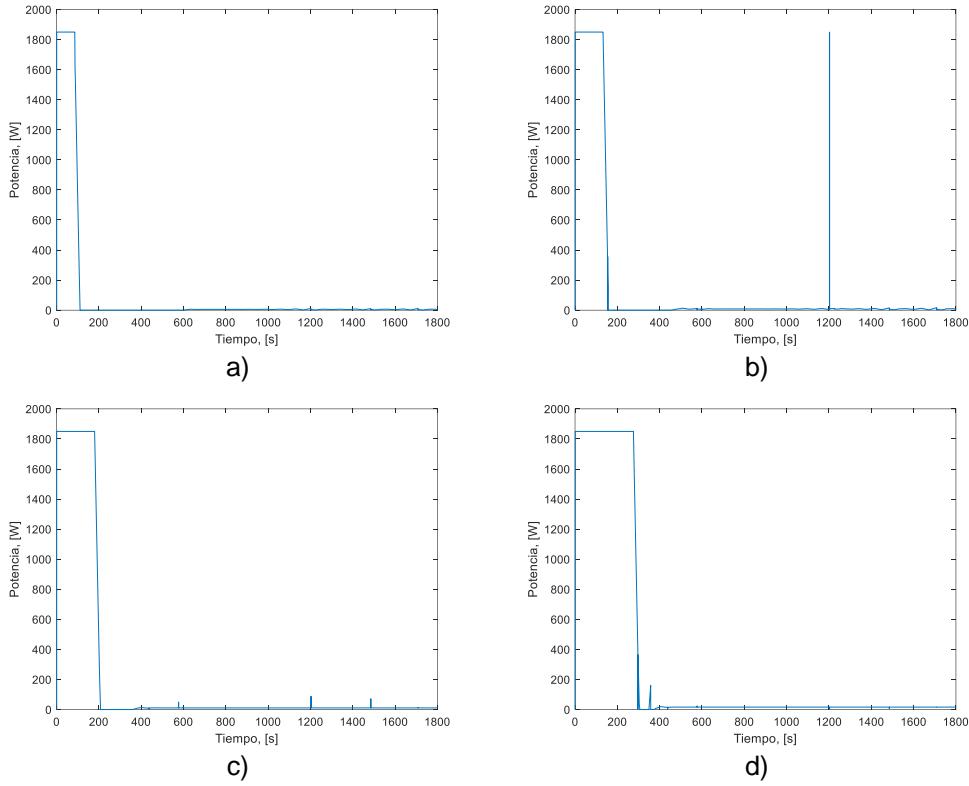


Fig. 3.13. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de Visioli basado en el criterio de minimización del índice ITSE para cambios del *setpoint* de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C.

Tabla 3.5. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de Visioli y un mínimo índice ITSE

Cambio del setpoint	Tiempo de elevación, [s]	Sobrepaso, [%]	Pico máximo, °C	Tiempo de estabilización, [s]
20	76,6370	1,4160	20,2832	124,6392
30	114,4866	0,8304	30,2491	170,6238
40	152,7330	0,3845	40,1538	217,4684
60	229,4307	0,1280	60,0768	310,5689

Autoría propia.

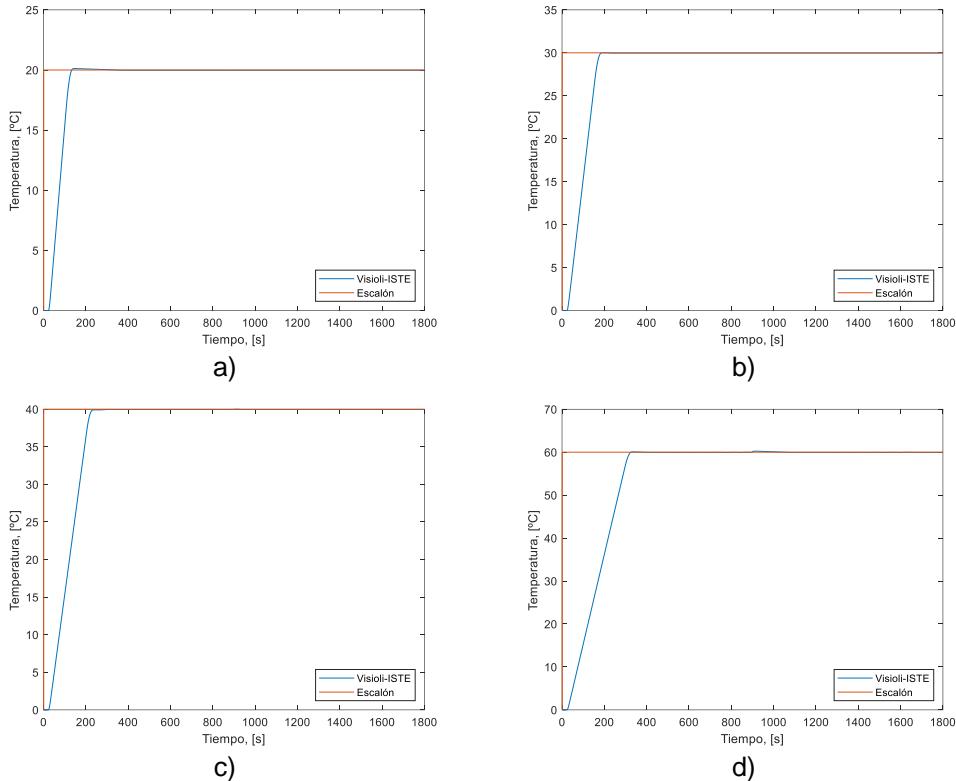
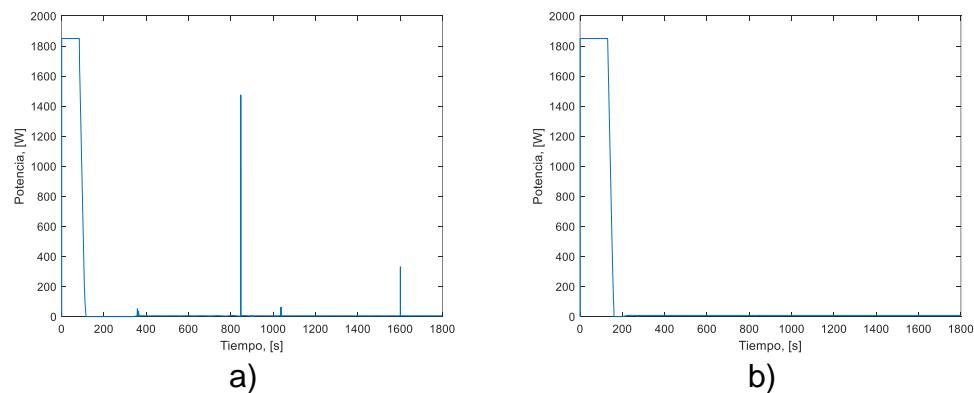


Fig. 3.14. Respuestas del lazo obtenidas a partir del método de Visioli basado en el criterio ISTE para cambios del setpoint de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C.



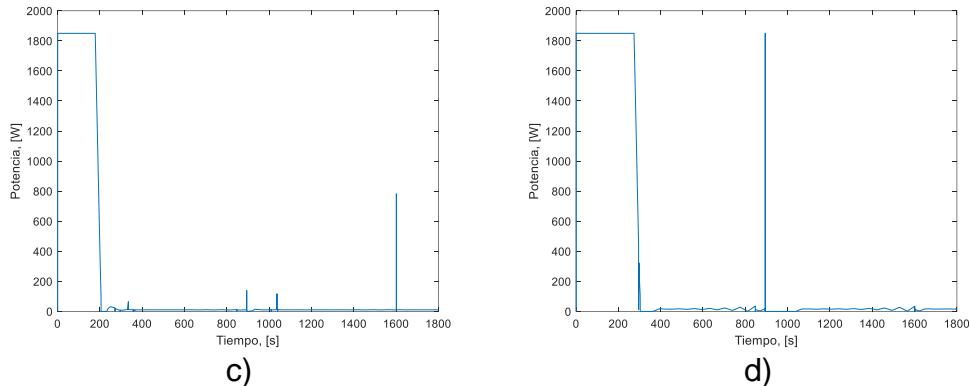


Fig. 3.15. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de Visioli basado en el criterio ISTE para cambios del *setpoint* de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C.

Tabla 3.6. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de Visioli y un mínimo índice ISTE

Cambio del setpoint	Tiempo de elevación, [s]	Sobrepasso, [%]	Pico máximo, [°C]	Tiempo de estabilización, [s]
20	77,0340	0,6009	20,1202	126,3012
30	114,5482	0,0358	30,0107	172,6434
40	152,7339	0,0000	39,9915	218,2929
60	229,4358	0,1044	60,0626	310,4076

Autoría propia.

Análogamente, el ajuste de los datos experimentales proporcionó el siguiente modelo IFOPDT para la planta

$$G_p(s) = \frac{0,000113e^{-21,87s}}{3,90s+1} \quad (3.13)$$

Según el método de síntesis directa, al controlador PID le corresponden una ganancia de 381,45 W/°C, un tiempo integral de 74,37 s, un tiempo derivativo de 7,81 s, un α igual a 10,94 y un β igual a 0,87 para la sintonización de un controlador PID con un compensador lead/lag en serie. Asimismo, se consideró un *setpoint weight* de 0,3. Para el esquema *anti-windup*, se calculó una constante del tiempo de seguimiento de 32,12 s. La Fig. 3.16 describe las respuestas dinámicas de salida y cuyas características se presentan en la Tabla 3.7. Asimismo, la Fig. 3.17 describe la potencia de salida del controlador en función del tiempo.

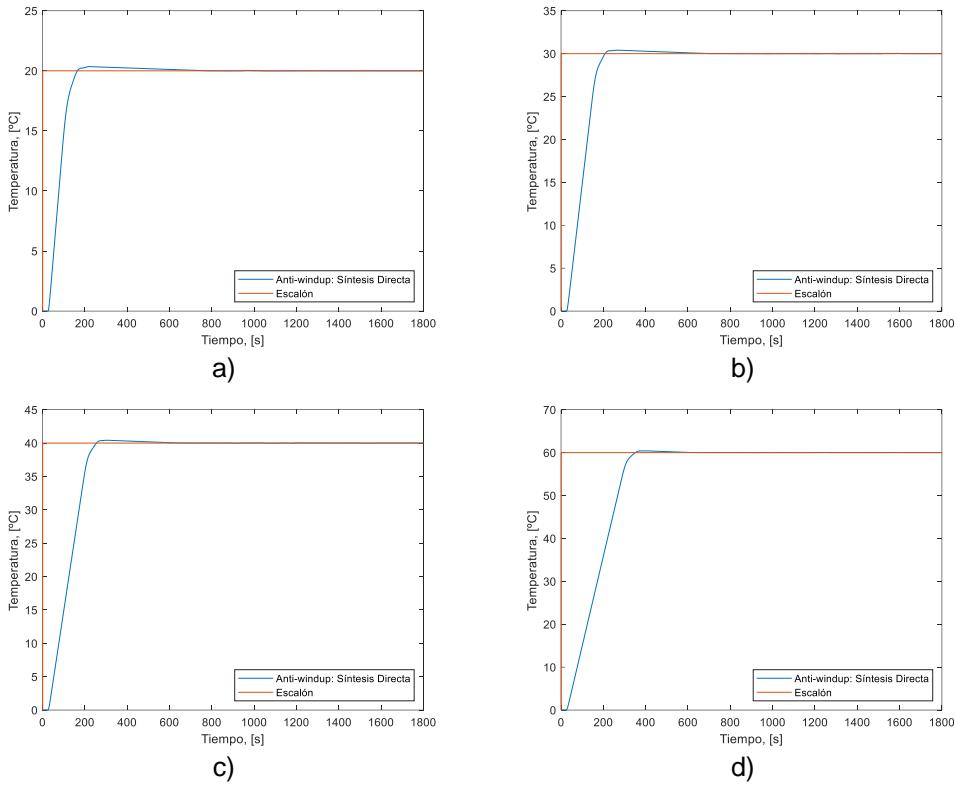


Fig. 3.16. Respuestas de lazo del controlador PID sintonizado por el método de síntesis directa con *setpoint weighting* y *anti-windup* para cambios del *setpoint* de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C.

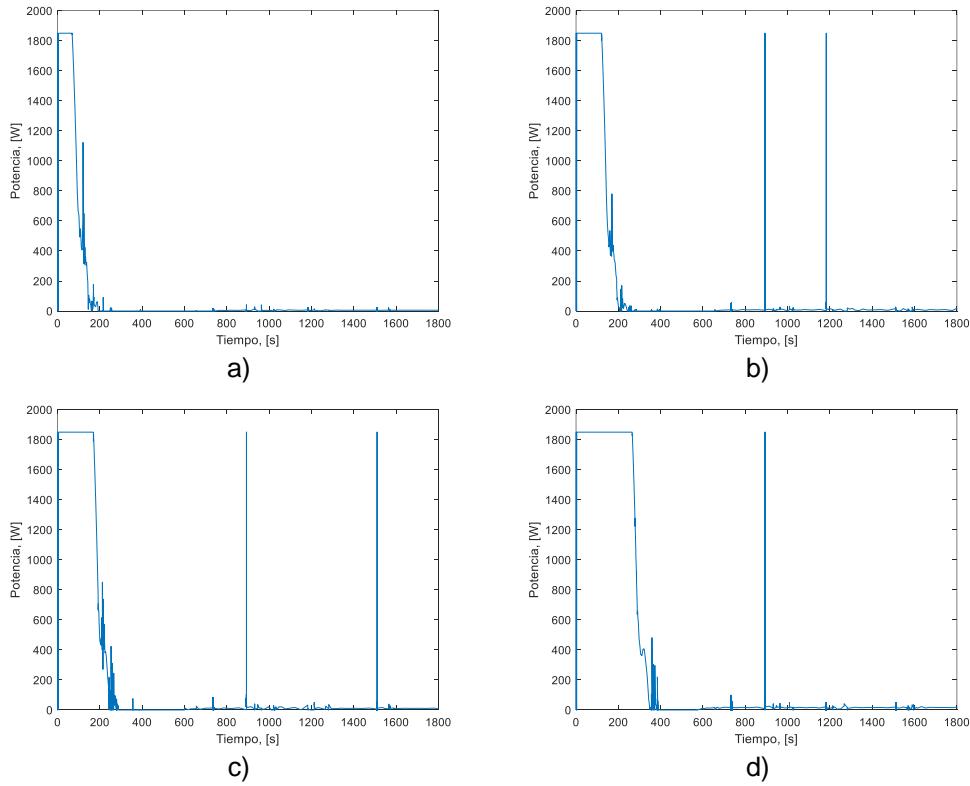


Fig. 3.17. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de síntesis directa con *setpoint weighting* y *anti-windup* para cambios del *setpoint* de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C.

Tabla 3.7. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de síntesis directa

Cambio del setpoint	Tiempo de elevación, [s]	Sobrepaso, [%]	Pico máximo, °C	Tiempo de estabilización, [s]
20	86,2807	1,7524	20,3505	153,9428
30	11,8483	1,3502	30,4051	194,6382
40	153,4015	1,0514	40,4205	237,223
60	229,4327	0,6750	60,4050	323,2725

Autoría propia.

La Fig. 3.18 presenta el efecto del factor λ sobre la dinámica del sistema.

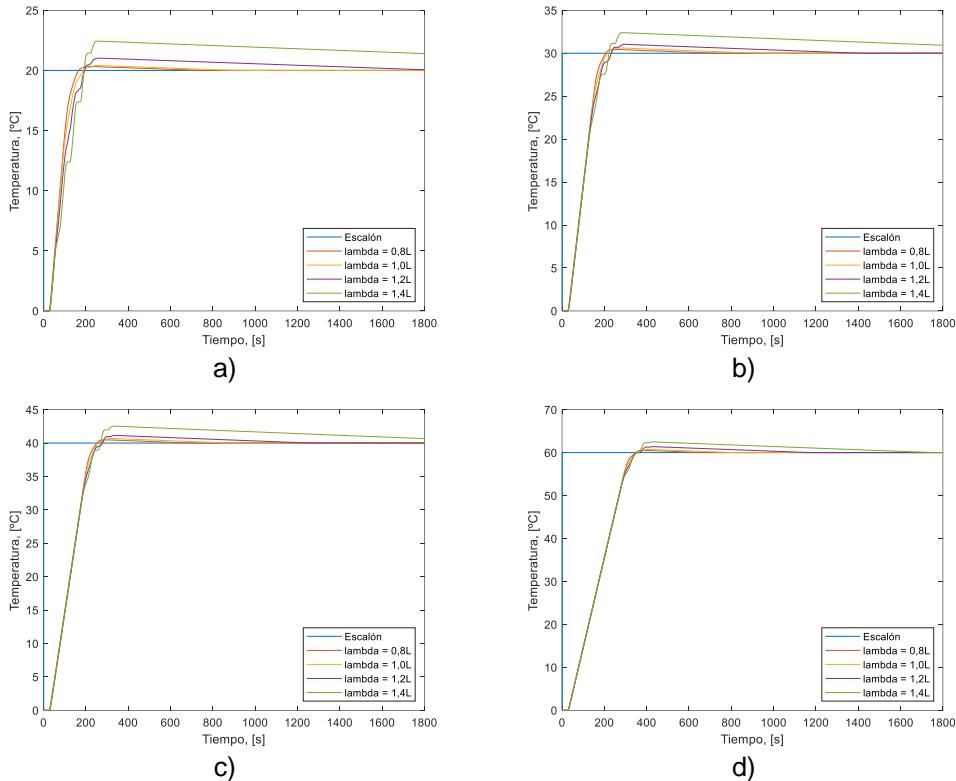


Fig. 3.18. Efecto del factor λ sobre la dinámica del lazo de control para cambios del setpoint de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C.

A partir del modelo de ajuste IFOPDT, se calcularon una ganancia igual a 353,48 W/°C, un tiempo integral igual a 123,15 s y un tiempo derivativo igual a 14,12 s para la sintonización de un controlador PID con filtro derivativo, según el método de Ali y Majhi. La constante de filtro derivativo calculada fue igual a 1,41 s. Para el esquema anti-windup, se calculó una constante del tiempo de seguimiento igual a 41,70 s. La Fig. 3.19 describe las respuestas del lazo y cuyas características se presentan en la Tabla 3.8. Asimismo, la Fig. 3.18 describe la potencia de salida del controlador en función del tiempo.

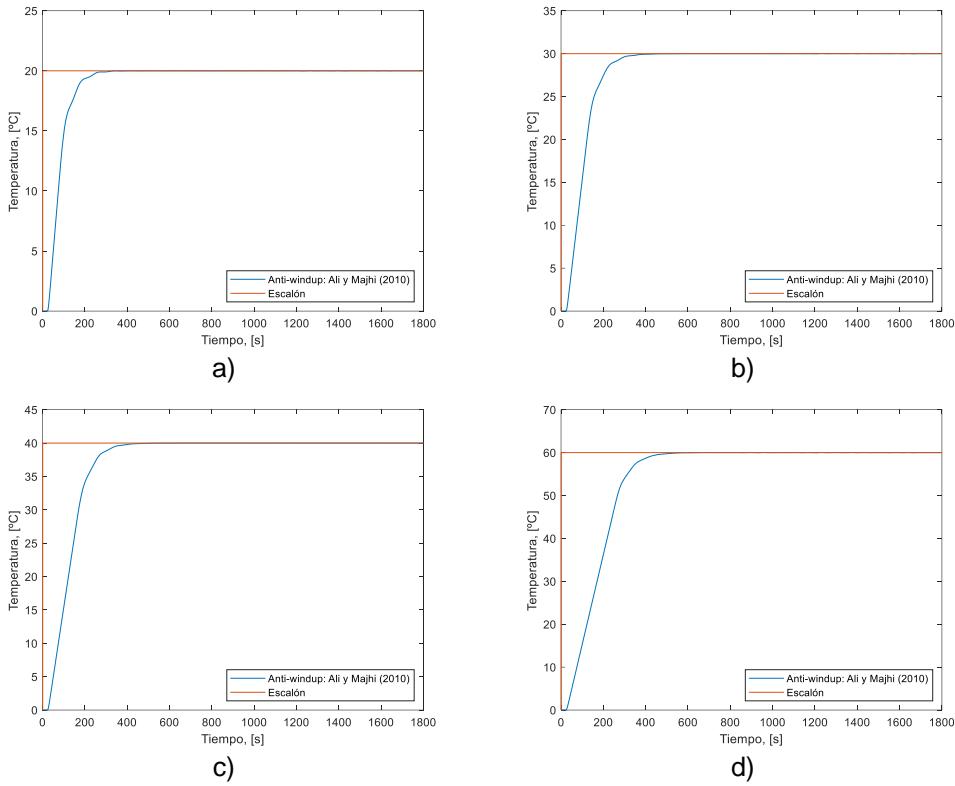


Fig. 3.19. Respuestas del lazo obtenidas a partir del método de Ali y Majhi con *anti-windup* para cambios del *setpoint* de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C.

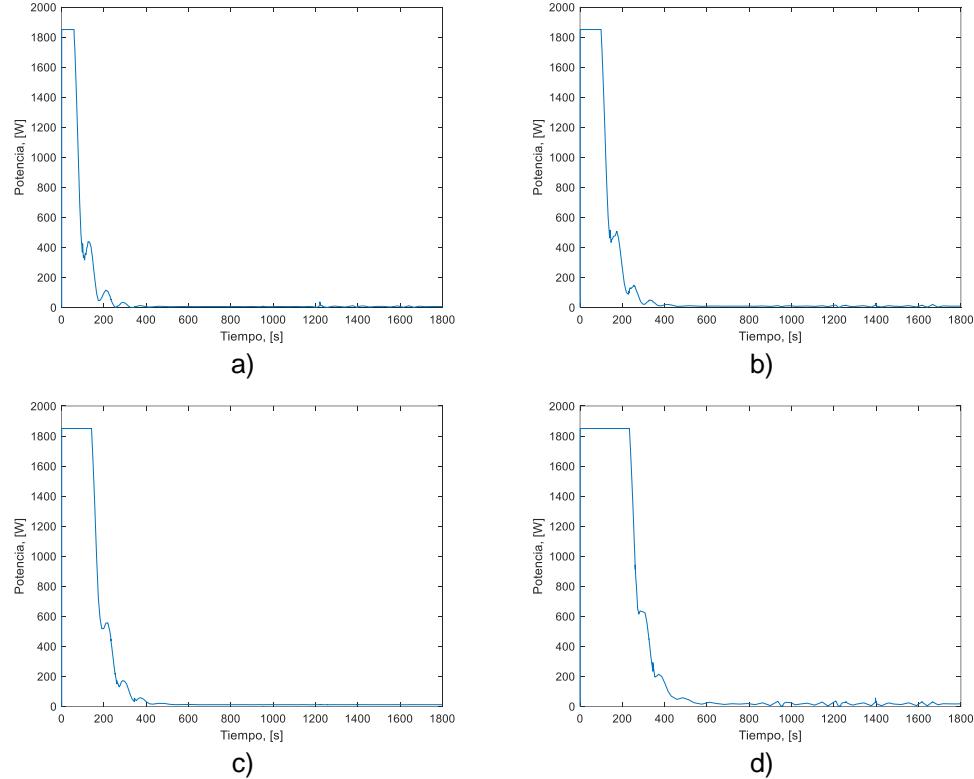


Fig. 3.20. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de Ali y Majhi con *anti-windup* para cambios del *setpoint* de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C

Tabla 3.8. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de Ali y Majhi con anti-windup

Cambio del setpoint	Tiempo de elevación, [s]	Sobrepaso, [%]	Pico máximo, [°C]	Tiempo de estabilización, [s]
20	116,4031	0,1681	20,0336	232,5789
30	150,4252	0,1605	30,0482	280,5728
40	182,9053	0,1408	40,0563	323,1671
60	244,2429	0,1251	60,0750	405,2395

Autoría propia.

La Fig. 3.21 describe el efecto de la presencia de un filtro derivativo sobre la dinámica del lazo de control, mientras que la Tabla 3.9 presenta la caracterización dinámica respectiva.

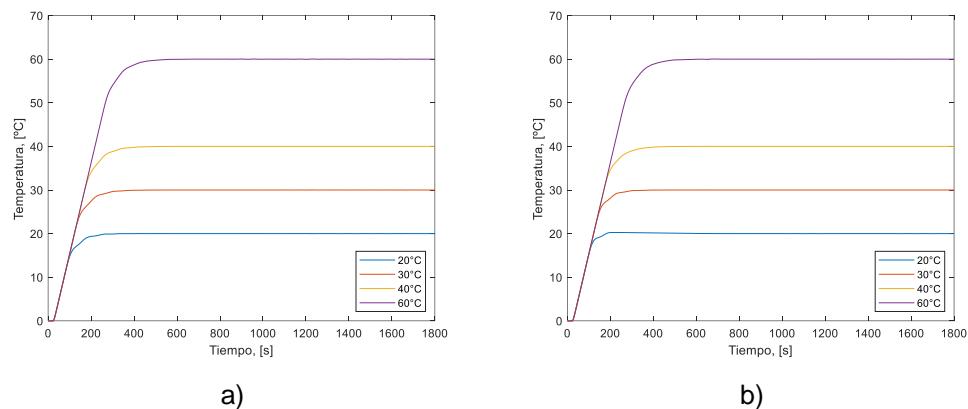


Fig. 3.21. Efecto del filtro derivativo sobre la dinámica del proceso según el método de Ali y Majhi con anti-windup: a) con filtro derivativo y b) sin filtro derivativo.

Tabla 3.9. Efecto del filtro derivativo sobre las respuestas dinámicas para un controlador PID sintonizado por el método de Ali y Majhi con anti-windup

	Cambio del setpoint	Tiempo de elevación, [s]	Sobrepaso, [%]	Pico máximo, [°C]	Tiempo de estabilización, [s]
Con filtro	20	116,4031	0,1681	20,0336	232,5789
	30	150,4252	0,1605	30,0482	280,5728
	40	182,9053	0,1408	40,0563	323,1671
	60	244,2429	0,1251	60,0750	405,2395
Sin filtro	20	82,1318	1,3118	20,2624	166,8128
	30	130,4060	0,0078	30,0023	245,2380
	40	172,9941	0,0307	40,0123	315,8949
	60	243,6282	0,0593	60,0356	397,9583

Autoría propia.

A partir del modelo de ajuste IPDT, se calcularon una ganancia igual a 422,93 W/ $^{\circ}$ C, un tiempo integral igual a 86,73 s y un tiempo derivativo igual a 14,31 s para la sintonización de un controlador PID, según la metodología de Arrieta, Vilanova y Visioli. Para el esquema *anti-windup*, se calculó una constante del tiempo de seguimiento igual a 35,23 s. La Fig. 3.22 describe las respuestas dinámicas de salida y cuyas características se presentan en la Tabla 3.10. Asimismo, la Fig 3.23 describe la potencia de salida del controlador en función del tiempo.

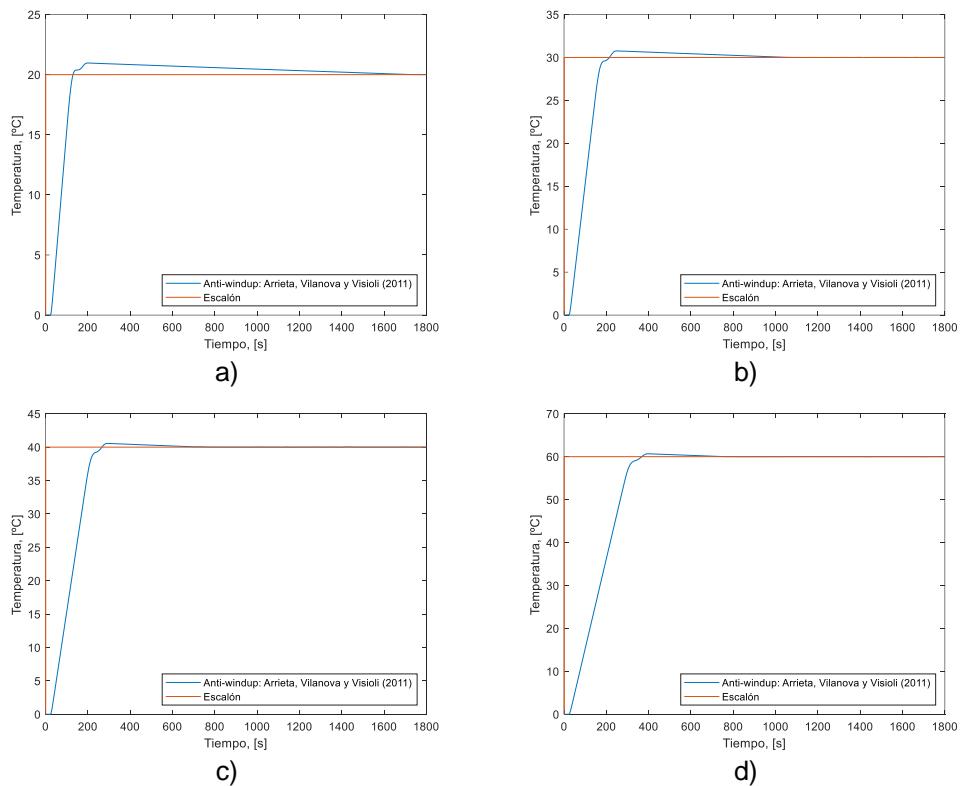
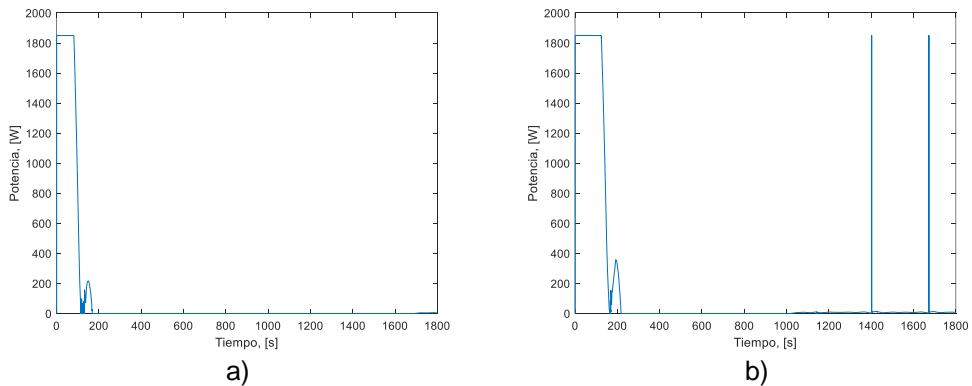


Fig. 3.22. Respuestas del lazo obtenidas a partir del método de Arrieta, Vilanova y Visioli con *anti-windup* para cambios del *setpoint* de a) 20 $^{\circ}$ C, b) 30 $^{\circ}$ C, c) 40 $^{\circ}$ C y d) 60 $^{\circ}$ C.



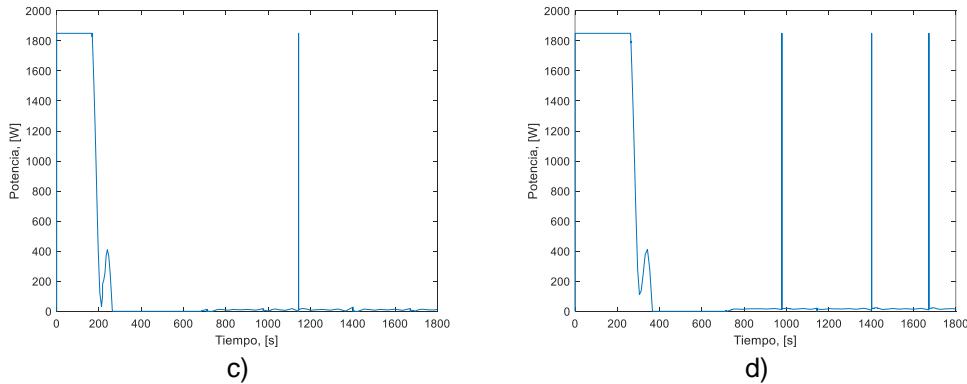


Fig. 3.23. Respuestas de salida del controlador PID sintonizado por el método de Arrieta, Vilanova y Visioli con *anti-windup* para cambios del *setpoint* de a) 20°C, b) 30°C, c) 40°C y d) 60°C.

Tabla 3.10. Características de las respuestas dinámicas de salida para un control PID sintonizado según el método de Arrieta, Vilanova y Visioli con *setpoint weighting* y *anti-windup*

Cambio del <i>setpoint</i>	Tiempo de elevación, [s]	Sobrepaso, [%]	Pico máximo, [°C]	Tiempo de estabilización, [s]
20	77,1638	4,8261	20,9652	1094,9
30	115,3462	2,5227	30,7568	423,9779
40	153,2609	1,3769	40,5507	236,4913
60	229,4787	1,1096	60,6657	324,8418

Autoría propia.

La Fig. 3.24 describe el efecto de la inclusión del *setpoint weight* al lazo de control PID, mientras que la Tabla 3.11 presenta la caracterización dinámica respectiva.

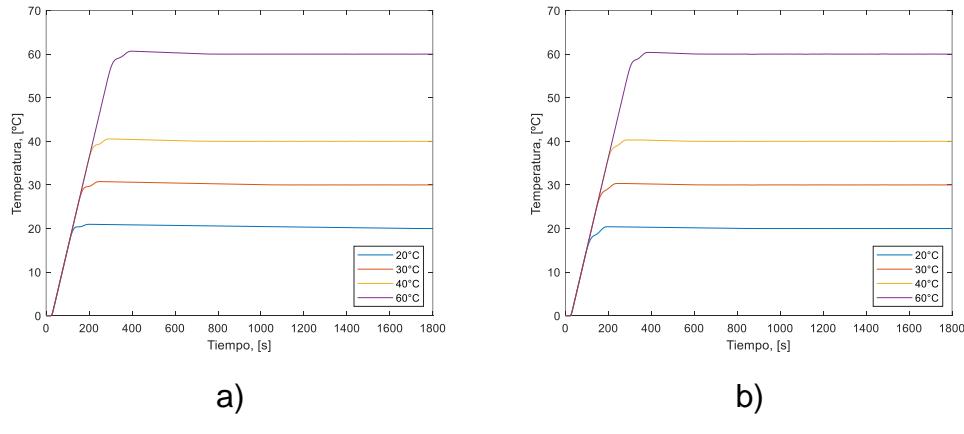


Fig. 3.24. Efecto del *setpoint weight* sobre la dinámica del lazo según el método de Arrieta, Vilanova y Visioli con *anti-windup*: a) con *setpoint weight* y b) sin *setpoint weight*.

Finalmente, la Tabla 3.12 presenta y contrasta los cálculos teóricos de energía consumida por el calentador de agua eléctrico durante la primera hora de operación según los distintos diseños propuestos del controlador.

Tabla 3.11. *Efecto del setpoint weight sobre las respuestas dinámicas para un controlador PID sintonizado por el método de Arrieta, Vilanova y Visoli con anti-windup*

	Cambio del <i>setpoint</i>	Tiempo de elevación, [s]	Sobrepasso, [%]	Pico máximo, [°C]	Tiempo de estabilización, [s]
Sin weight	20	77,1638	4,8261	20,9652	1093,0
	30	115,3462	2,5227	30,7568	423,9779
	40	153,2609	1,3769	40,5507	236,4913
	60	229,4787	1,1096	60,6657	324,8418
Con weight	20	87,6953	2,0518	20,4104	219,7129
	30	118,0840	1,1369	30,3411	205,8295
	40	153,7562	0,7956	40,3182	248,3359
	60	229,4526	0,6492	60,3895	333,0887

Autoría propia.

Tabla 3.12. *Energía consumida (kJ) por el calentador durante la primera hora de su funcionamiento*

Cambio de <i>setpoint</i>	Método 1	Método 2			Método 3	Método 4	Método 5
		ISE	ITSE	ISTE			
20	203,57	195,93	195,08	195,40	197,26	196,08	195,51
30	294,88	292,01	291,65	293,44	294,71	292,93	294,17
40	391,67	392,32	390,14	391,18	395,66	390,74	392,38
60	586,06	584,59	584,37	581,62	587,31	585,87	588,30

Autoría propia.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Modelado Teórico y Fenomenología

En primer lugar, se discuten las presunciones establecidas en la etapa de conceptualización. La primera considera despreciable un flujo de salida de vapor de agua debido a la ebullición subenfriada (Cengel, 2007, pp. 562-563). El agua de vaporiza y se dispersa en el aire circundante. Esta condición también se reportó implícitamente otros trabajos (Romagnoli, Palazoglu y Whitaker, 2001, p. 46; Murray *et al.*, 2016, p. 236; Madugu, 2018, p. 15).

Debido a la formación caótica de patrones de flujo relacionados con la ebullición subenfriada del agua, es de esperarse la formación de un gradiente tridimensional de la temperatura. Debido a ello, se presumió que la temperatura del líquido era independiente de su posición. Es decir, se

admitió la presencia imaginaria de un agitador mecánico, el cual garantizaba el mezclado ideal. Esta condición podría justificarse con la cantidad pequeña de agua procesada (1,7 kg). Análogamente, Murray *et al.* (2016, p. 236) y Madugu (2018, p. 16) sometieron su análisis a tal condición, aunque implícitamente en el último.

La tercera presunción se caracterizó por ser intuitivamente fácil de definir. Si bien un hervidor eléctrico se constituye de diversos materiales, se consideró que la transferencia de calor se efectúa a través de un medio de composición definida y constante. Asimismo, presumir que las propiedades físicas de este material son independientes de la temperatura, justificó el considerar un coeficiente global de transferencia de calor constante en el tiempo.

Aunque en realidad la transferencia de calor desde la base del hervidor al seno del líquido es unidireccional, la falacia de establecer un caso especial de transferencia de calor homogénea simplemente reforzaría la segunda presunción referente a un mezclado ideal.

En lo que respecta a la última presunción, esta se sustentó en un cambio de la temperatura del ambiente despreciable, si es que se considera un tiempo de funcionamiento razonable del aparato. Si bien el hervidor se ha diseñado con el fin de facilitar agua caliente a una temperatura constante y regulada adecuadamente, no se espera que su operación se prolongue por más de una hora. En otras palabras, aún sería necesaria la intervención de un usuario.

A continuación, se evaluaron los resultados obtenidos en la etapa del modelado. La ecuación 3.17 representó un modelo dinámico del tipo FOPDT, asimismo denotó un proceso con una constante del tiempo dominante. Esto último era de esperarse, porque el proceso de calentamiento de agua es relativamente lento.

A pesar de que matemáticamente el modelo de función de transferencia obtenido es coherente, no es correcto si se pretende correlacionar lo derivado según la estadística y la fenomenología. Al ser un modelo FOPDT, se le otorga una característica “autorreguladora” al proceso. Aunque esto último sea una verdad parcial, no describe la condición del límite del proceso de calentamiento: la ebullición.

Supóngase que en lugar de una entrada de escalón igual a 1.850 W (la potencia entregada por diseño del hervidor eléctrico), ingresa una potencia equivalente a 1 W (escalón unitario). Según la ecuación (3.10), la temperatura del sistema se incrementa en un valor de 3,70°C cuando se alcanza la nueva condición estable. Matemáticamente, esto último sería correcto y físicamente, aunque poco probable de verificar: se debería esperar aproximadamente nueve horas para que la desviación de la temperatura del agua sea igual a un 63% del incremento total para este nuevo estado estacionario. A continuación, se analiza la condición de trabajo original: una entrada de potencia igual a 1850 W. En este caso, el modelo FOPDT predice un incremento de la temperatura del agua igual a 6845°C, el cual es una respuesta correcta desde una perspectiva matemática, pero también denota una situación inexistente para la física. Esto último jamás será llevado a cabo, puesto que una vez que la temperatura del agua alcance un valor de desviación igual a 80°C, esta comenzará a ebullir y la temperatura se mantendrá constante en el tiempo. Esto seguirá así hasta que el agua en su totalidad se vaporice, se disperse en el aire circundante y el recipiente albergue vestigios del fluido vaporizado. En esta condición límite, se desmorona cualquier presunción lógica establecida en la etapa de la conceptualización.

Madugu (2018) modeló su hervidor eléctrico diseñado por su cuenta y obtuvo un modelo FOPDT mediante la aplicación de la segunda técnica de ajuste descrita en Corripio y Smith (2014) y basada en el método original de Ziegler y Nichols (1942) (p. 17). Naturalmente su modelo presentó parámetros diferentes. No obstante, una característica notoria en común fue las magnitudes de las constantes del tiempo. Ambos modelos representaron dinámicas gobernadas por este parámetro. El modelado de Madugu (2018) se sustentó en el método de ajuste más simple según un modelo FOPDT. Aunque sencillo, resultó siendo un procedimiento demasiado dudoso: no logró explicar la fenomenología del proceso a condiciones inferiores de la ebullición.

En síntesis, la perspectiva del presente trabajo considera lo opuesto a lo descrito por Madugu (2018). Se presentó un modelo dinámico que logre explicar el comportamiento del hervidor cuando el líquido es subenfriado

sin importar la magnitud de la entrada de potencia del hervidor, mas no la condición de ebullición. Por el contrario, el modelo de Madugu (2018) logra explicar el proceso, tanto la condición subenfriada como la de saturación, solamente para una entrada equivalente a la máxima potencia del aparato (1850 W). Además, se debe considerar que, en este caso, el modelo FOPDT de Madugu (2018) pierde exactitud conforme se llega a la temperatura de ebullición.

Con un propósito comparativo, se llevó a cabo el modelado del hervidor eléctrico según un modelo FOPDT. Para ello, se emplearon las técnicas de ajuste de la recta tangente (Corripio y Smith, 2014, pp. 332-333), el método de Smith (1972), el método de Sundaresan y Krishnaswamy (1978) y el método de áreas (Aström y Hägglund, 1995, pp. 24-25). La Fig. 3.5 presenta tales curvas de ajuste. Asimismo, nótese una curva de reacción basada en los parámetros promedio derivados del ajuste por mínimos cuadrados.

Considerándose la posibilidad de que Madugu (2018) haya trabajo con un modelo FOPDT debido a lo tedioso que sería la aplicación de un ajuste por mínimos cuadrados (no se conoce el valor de esa hipotética ganancia estacionaria), su enfoque resultó siendo menos agresivo. Obsérvese en la Tabla 3.1 que cuanto más reproducible sea el método de ajuste, el modelo FOPDT resulta con menor dominio de la constante del tiempo. Si bien es cierto que el método de la tangente (Corripio y Smith, 2014, pp. 332-333) es el que provee la mayor constante del tiempo, no se puede evitar perder exactitud a una desviación estándar mayor de 20°C.

4.2. Propuesta Tecnológica

El sistema de control PID descrito, ver Fig. 3.6, se basa principalmente en el prototipo propuesto y descrito por Shah *et al.* (2019, p. 1685). No obstante, se propusieron ciertas modificaciones para una futura implementación.

- a) Se sugirió utilizar un *encoder* rotatorio, en lugar de un potenciómetro $10\text{ k}\Omega$, debido a que este último al permitir la entrada de una señal analógica, es sensible ante el ruido electrónico.

- b) Se propuso acoplar un disipador de calor al relé en estado sólido, debido a que la carga soportada por este es elevada (Llamas, 2021). Asimismo, convendría usar pasta térmica como adhesivo entre ambos elementos.
- c) Se sugirió utilizar un Lcd x I2C para la visualización de la temperatura del sistema y la de consigna. La conexión de este a la placa Arduino Uno y a la placa de inserción es más sencilla que la de cualquier otro *display*. Asimismo, permitiría mostrar las temperaturas del hervidor y del *setpoint* en una misma pantalla.

Quizás lo más llamativo en el diseño propuesto sea el acoplamiento de un relé en estado sólido (SSR) a un controlador PID. Si bien un SSR opera mediante señales discretas, dado que es análogo a un *switch (on-off)*, la señal de salida del controlador PID es convertida a una señal de modulación por ancho de pulsos (PWM). La señal PWM se suministraría al SSR desde el algoritmo PID y se actualizaría en el intervalo de tiempo predefinido especificado en la interrupción cíclica (Gajjar, Patel y Singh, 2015). Por su parte, Shah *et al.* (2019) sugirieron utilizar una frecuencia baja del PWM, debido a la dinámica lenta del proceso, siendo esta igual a 1000 microsegundos (p. 1684).

4.3. Rendimiento del Controlador PID

A pesar de la adición de un *setpoint weight* y la aplicación de un esquema *anti-windup*, la sintonización basada en el método de Ziegler y Nichols proporcionó las respuestas dinámicas con los mayores sobrepasos. Cabe resaltar que la magnitud de cada sobrepaso disminuía conforme aumentaba la magnitud del cambio de *setpoint*. Teóricamente, se esperaba que Ziegler y Nichols fuera el método con menor eficiencia, debido a que no fue formulado específicamente para afrontar problemas de un cambio del *setpoint* (Alfaro, 2005, p. 41).

En teoría, la sintonización de un controlador PID según el criterio de mínimo ISTE es el más conveniente para modelos de planta IPDT, dado que provee los menores sobrepasos y tiempos de estabilización (Visioli, 2001, p. 181). Este primer aspecto se comprobó con los resultados para cambios del *setpoint* de 20°C, 30°C y 40°C (ver Tablas 3.4, 3.5 y 3.6), donde se observaron los mínimos sobrepasos. Para un cambio del

setpoint de 60°C, el criterio de mínimo ISE proveyó la respuesta con menor sobrepasso. Fue el segundo aspecto de esta conclusión por Visioli (2001, p. 182), un objeto a discutir en esta etapa del análisis. Los resultados demostraron que, en general, el criterio de mínimo ISE ofrecieron las respuestas con los menores tiempos de estabilización. La única excepción fue para un cambio del *setpoint* de 30°C. En esto último, el criterio de mínimo ITSE satisfizo dicha condición. Observándose la tendencia para los tiempos de elevación, se determinó que el criterio de mínimo ISTE brindó los mayores valores. Esto último concuerda fehacientemente con uno de los resultados del análisis de Visioli (2001, p. 182).

Referente al método de síntesis directa, ver la Fig. 3.16 y la Tabla 3.7, se registraron, como era de esperarse, respuestas dinámicas con mayores sobrepassos y tiempos de estabilización, comparándose con los resultados según Visioli. No obstante, un aspecto interesante a abordar fue el efecto de la selección del parámetro λ sobre la determinación de los parámetros de sintonización. Basándose en la Fig. 3.18, conforme se aumentó el valor del factor λ , se incrementaron tanto los sobrepassos de las respuestas como sus tiempos de estabilización, sin importar la magnitud del cambio del *setpoint*.

Las respuestas de lazo basadas en el método de Ali y Majhi, Fig. 3.19 y Tabla 3.8, se caracterizaron por presentar los mínimos sobrepassos para un control PID. Asimismo, se observaron tiempos de estabilización relativamente bajos. Sin embargo, su principal ventaja fue que no necesitó de la adición de un *setpoint weight*. Cabe resaltar que la ganancia integral calculada fue la menor de todas. Esto sería la principal causa de un menor efecto *windup* en la dinámica del proceso. Obsérvese en la Fig. 3.21 y la Tabla 3.9 que, efectivamente, la inclusión de un filtro derivativo en el controlador PID ejerce un efecto sobre su desempeño. En lo que respecta al sobrepasso, la ausencia de un filtro derivativo es eficaz, excepto para un cambio del *setpoint* de 20°C o inferior. Análogamente, al evaluarse los tiempos de estabilización, la presencia de un filtro derivativo es contraproducente para cualquier cambio de *setpoint*. Cabe resaltar que el filtro derivativo utilizado en el trabajo original de Ali y Majhi (2010) fue igual

a 0,1 (p. 71), un valor que se posiciona dentro del rango establecido por Corripio y Smith (2014) (0,01 a 0,2) para un efecto relativamente insignificante del filtro sobre el desempeño del controlador PID (p. 254).

Las respuestas de lazo basadas en el método de Arrieta, Vilanova y Visioli, Fig. 3.22 y Tabla 3.10, se caracterizaron por presentar elevados sobrepasos y tiempos de estabilización, aunque inferiores a los determinados por el método basado en Ziegler y Nichols (1942). A continuación, se discutió el efecto de la adición de un *setpoint weight* al lazo de control PID, ver Fig. 3.24 y Tabla 3.11. Obsérvese que la inclusión de un *setpoint weight* proporcionó una reducción aproximada del 50% de sobrepaso. Asimismo, se redujeron los tiempos de estabilización: aproximadamente un 80% para el menor cambio del *setpoint*. Teóricamente, este último método debería proveer un mejor desempeño del lazo de control si es que se toma en cuenta el tiempo de su publicación. Es relevante recordar que este método, aunado al de Ali y Majhi, ofrecen enfoques unificadores, es decir, son propuestas que no se orientan exclusivamente a un cambio del *setpoint*, como Visioli (2001). Sin embargo, se presume que tal desbalance de rendimiento en el trabajo de Ali y Majhi (2010) se orienta, en un grado mayor, a problemas de cambio del *setpoint* con relación al de esta última metodología. En otras palabras, es probable que el factor de balance en el método de Ali y Majhi sea inferior a 0,25.

Habiéndose cumplido las metodologías propuestas en la presente investigación, y dada la naturaleza poco uniforme de los resultados obtenidos, se aplicó un criterio final para discernir aquel método que provee la sintonización óptima de los demás propuestos. Esto consistió en el cálculo de la energía consumida por el calentador durante la primera hora de su funcionamiento. Obsérvese en la Tabla 3.12 que son los métodos de sintonización basados en la minimización de los índices ISE e ISTE, aquellos que garantizaron los menores consumos de energía eléctrica. A la metodología basada en Ziegler y Nichols se le atribuye los mayores consumos. Finalmente, de los métodos más actualizados, son las respuestas dinámicas de Ali y Majhi y Arrieta, Vilanova y Visioli con

anti-windup, las que se caracterizaron por un consumo eficiente de la energía.

V. CONCLUSIONES

Los resultados demostraron que:

1. La simulación de un calentador de agua eléctrico, basado en el acoplamiento de un sistema de control PID a un hervidor de agua casero, garantiza un control eficiente de la temperatura del líquido, así como un consumo responsable de la energía eléctrica.
2. Teóricamente, el modelo matemático de un hervidor de agua eléctrico obedece una dinámica de primer orden con tiempo muerto (FOPDT). Experimentalmente, se demuestra que este es un proceso con dominio de su constante de tiempo y que es factible su ajuste a modelos integrantes con tiempo muerto (IPDT e IFOPDT).
3. Es factible proponer la construcción de un calentador de agua eléctrico mediante el acoplamiento de un circuito de control PID de temperatura, basado en una placa Arduino Uno, a un hervidor de agua casero.
4. La metodología basada en las fórmulas de sintonización de Ali y Majhi sin filtro derivativo y la integración de un lazo *anti-windup* provee el diseño de un controlador PID con el mejor desempeño, dado que sus respuestas de salida se caracterizan por presentar bajos sobrepasos y tiempos de estabilización, así como un consumo eficiente de energía eléctrica.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se sugiere realizar la prueba de escalón unitario con una potencia de entrada inferior a la máxima establecida por el diseño del hervidor de agua casero, dado que la exactitud del modelo de ajuste depende radicalmente de la determinación de sus parámetros.

2. Se recomienda profundizar en el modelado del lazo de control PID, en lo que respecta a determinar la dinámica del controlador y sus elementos complementarios. Esto proporcionaría una simulación con resultados más exactos.

3. Se sugiere continuar con la labor del presente trabajo mediante la exploración teórica y la contrastación de otras metodologías de diseño de controladores PID orientados a procesos integrantes.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, V. (2005). Actualización del método de sintonización de controladores de Ziegler y Nichols. *Ingeniería*, 15, 39-52. doi: 10.15517/ring.v15i1-2.7739.
- Ali, A. y Majhi, S. (2010). PID controller tuning for integrating processes. *ISA Transactions*, 49(1), 70-78. doi: 10.1016/j.isatra.2009.09.001
- Amazon. (2021). *Fellow Stagg EKG - hervidor eléctrico para café y té, control de temperatura variable, calentamiento rápido de 1200 W, cronómetro integrado, Negro mate*. Wasington, EU: Amazon. Recuperado de <https://www.amazon.com/-/es/Fellow-Stagg-EKG-calentamiento-1200/dp/B077JBQZPX>
- Amazon (2021). *Termostato de control de temperatura de la parte superior de la base del hervidor de agua eléctrico*. Recuperado de <https://www.amazon.com/Thermostat-Temperature-Control-Kettle-Electric/dp/B07T4YS9PR>
- Arrieta, O., Vilanova, R., & Visioli, A. (2011). Proportional-integral-derivative tuning for servo/regulation control operation for unstable and integrating processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(6), 3327-3334. doi: 10.1021/ie101012z
- Aström, K. J. y Hägglund, T. (1995). *PID controllers: theory, design and tuning*. NC, EU: ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society.

- Aström, K. J. y Hägglund, T. (2004). Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control. *Journal of Process Control*, 14(6), 635-650. doi: 10.1016/j.jprocont.2004.01.00
- Aström, K. J. y Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. NC, EU: ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society.
- Ayu, H. M. y Rosdi, D. (2008). *Design and Analysis for the Improvement of Electric Kettle Performance*.
- Bakshi, U. A. y Bakshi, V. U. (2009). *Electrical technology*. Pune, India: Technical Publications Pune.
- Billingsley, J. (2010). *Essentials of control techniques and theory*. NY, EU: CRC Press.
- Bird, J. O. y Ross, C. T. F. (2012). *Mechanical engineering principles*. NY, EU: Elsevier.
- Bolton, W. (2004). *Instrumentation and control systems*. NY, EU: Elsevier Science & Technology Books.
- Chen-Ching, Y. (2006). *Autotuning of PID Controllers. A Relay Feedback Approach*. Alemania: Springer-Verlag London.
- Chen, X. y Liu, Y. (2015). *Finite element modeling and simulation with Ansys Workbench*. Boca Raton, Estados Unidos de América: CRC Press.
- Chidambaram, M. (2000). Set point weighting PI/PID controller for integrating plus dead time processes. En P. Kanagasabapathy y R. Muthu (Eds.). *Proceedings of the National Symposium on Intell. Measurement & Control* (pp. 324). Madras, India.
- Corripio, C. A. y Smith, A. B. (2014). *Control automático de procesos. Teoría y práctica*. México, D.F., México: Limusa, S.A. de C.V.
- del Valle, L. (2021). DS18B20 sensor de temperatura. Programarfacil. Recuperado de <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/ds18b20-sensor-temperatura-arduino/>
- Daful, A. G. (2018) "Comparative study of PID tuning methods for processes with large & small delay times," 2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). doi: 10.1109/ICASET.2018.8376915.

- Datta, A., Ho M-T y Bhattacharyya, S. P. (2000). *Structure and synthesis of PID controllers (Advances in industrial control)*. Londres, RU: Springer-Verlag London.
- David, I. (2021). How Does an Electric Kettle Work? Recuperado de <https://www.hunker.com/13408995/how-does-an-electric-kettle-work>
- Dey, C., Mudi, R. K. y Simhachalam, D. (2014). A simple nonlinear PD controller for integrating processes. *ISA Transactions*, 53(1), 162-172. doi: 10.1016/j.isatra.2013.09.011
- Dincer, I. (2021). *Thermodynamics: A smart approach*. Sussex Occidental, Reino Unido: John Wiley & Sons, Inc.
- Doebelin, E. O. (1985). *Control system principles and design*. NY, EU: John Wiley & Sons, Inc.
- Erham, E., Markus, Surjanto, A. y Rukmana, J. (2018). Design of a new PID controller based on Arduino Uno R3 with application to household refrigerator. *MATEC Web of Conferences*. 154. 01044. doi: 10.1051/matecconf/201815401044.
- El Mogahzy, Y.E. (2009). Textile product design conceptualization: basic elements and tools. doi: 10.1533/9781845695415.1.82
- Felder, R. M. y Rousseau, R. W. (2005). *Elementary Principles of Chemical Processes*. NJ, EU: John Wiley & Sons, Inc.
- Fertik, H. A., and C. W. Ross (1967). Direct digital control algorithms with anti-windup feature. *I.S.A. Trans., 22nd annual conf. and exhibit.*, Chicago, 4, 317-328.
- Fezari, M. y Al Dahoud, A. (2019). *Exploring One-wire temperature sensor "DS18B20" with microcontrollers*.
- Gajjar, A. G., Patel, A. I. y Singh, R. G. (2017). Real time implementation of MPC in bottle washer machine for small scale beverage industry. *International Conference on Computer Applications in Electrical Engineering-Recent Advances (CERA) - Roorkee, India (2017.10.5-2017.10.7)] 2017 6th International Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances (CERA)*, 509–514. doi:10.1109/CERA.2017.8343382

- Hassaan, G. A. (2014). Temperature control system and its control using PID controller. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(2), 145-147.
- Hemanth, J., Yigit, T., Patrut, B. y Angelopoulou, A. (2021). *Trends in data engineering methods for intelligent systems. Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering (ICAIAME 2020)*. Cham, Suiza: Springer Nature Switzerland AG.
- Hondianto, T., Susanto, E. y Wibowo, A. (2016). Model Driven PID Controller in Water Heater System. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 6, 1673-1680. doi: 10.11591/ijece.v6i4.9652
- Imaco. (2021). *Hervidor eléctrico KE1712*. Lima, Perú: Imaco. Recuperado de <http://www.imacosa.com/productos/hervidor-electrico-ke1712/>
- Ingenia online. (2019). *How does that work – Kettle switch-off*. Londres, Reino Unido. Recuperado de <https://www.ingenia.org.uk/Ingenia/Articles/24531842-e997-4adb-b023-f19733793727>
- Irshad, M., y Ali, A. (2020). Robust PI-PD controller design for integrating and unstable processes. *IFAC-PapersOnLine*, 53(1), 135-140. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.06.023
- Jalil, M. H. A., Marzaki, M. H., Kasuan, N., Taib, M. N. y Rahiman, M. H. F. (2013). Implementation of anti windup scheme on PID controller for regulating temperature of glycerin bleaching process. *2013 IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology*, 2013, 113-117, doi: 10.1109/ICSEngT.2013.6650154
- Johnson, M. A. y Moradi, M. H. (2005). *PID control: new identification and design methods*. NY, EU: Springer-Verlag London.
- Jugo, J. M. (2020). *Ofertas de electrodomésticos en Navidad no serán tan agresivas como en años anteriores*. Lima, Perú: Gestión. Recuperado de <https://gestion.pe/economia/ofertas-de-electrodomesticos-en-navidad-no-seran-tan-agresivas-como-en-anos-anteriores-estima-la-ccl-noticia/>

- Kavita, T., Parvathi, B.N., Lavanya, M. y Arivalagan, M. (2015). Temperature control water bath system using PID controller. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(4), 3443-3446.
- Liu, T., Cai, Y.Z., Gu, D.Y. y Zhang, W. D. (2005). New modified Smith predictor scheme for integrating and unstable processes with time delay. *Control Theory and Applications. IEE Proceedings*, 152(2), 238-246. doi: 10.1049/ip-cta:20041232.
- Llamas, L. (2001). Conmutar cargas con arduino y relé de estado sólido. Recuperado de <https://www.luisllamas.es/arduino-rele-estado-solido-ssr/>
- Lu, X., Yang, Y.-S., Wang, Q.-G., y Zheng, W.-X. (2005). A double two-degree-of-freedom control scheme for improved control of unstable delay processes. *Journal of Process Control*, 15(5), 605-614. doi: 10.1016/j.jprocont.2004.09.00
- Marcinkowski, A. y Zych, K. (2007). Environmental performance of kettle production: product life cycle assessment. *Management Systems in Production Engineering*, 25(4), 255-261.
- Madugu, J. S. (2018). Modeling and simulation of proportional-integral-derivative (PID) temperature controller for an electric kettle. *International Journal of Engineering, Science and Mathematics*, 7(9), 15-20.
- Madugu, J. S. y Vasira, P. G. (2018). Modeling and performance evaluation of P, PI, PD and PID temperature controller for water bath. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Sciences (ASRJETS)*, 47(1), 186-200.
- Miller, J. (2018). *What's the point of a PID controller in a electric kettle?* Recuperado de <https://fellowproducts.com/blogs/learn/what-s-the-point-of-a-pid-controller-in-an-electric-kettle>
- Ministerio de Energía y Minas. (2010). *Un electrodoméstico barato no siempre es económico*. Recuperado de <http://www.minem.gob.pe/descripcion.php?idSector=6&idTitular=2460>

- Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Guía de orientación del uso eficiente de la energía y de diagnóstico energético*. Recuperado de
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Guia%20Sector%20Residencial.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Recomiendan utilizar la energía eléctrica de forma eficiente*. Lima, Perú: Plataforma digital única del Estado Peruano. Recuperado de
<http://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/187179-recomiendan-utilizar-la-energia-electrica-en-forma-eficiente>
- Moreano, G. V., Arregui, C., Tenesaca, C. G. y Pilco, H. J. (2019). Rendimiento y eficiencia de distintas técnicas de control en un calefón eléctrico. *Ingenius: Revista de Ciencia y Tecnología*, (22), 90-99. doi: 10.17163/ings.n22.2019.09
- Müller, W., Hörnemann, E., Hübscher, H., Jagla, D., Larisch, J. y Pauly, V. (1994). *Electrotecnia de potencia: Curso superior*. Barcelona, España: Reverté, S.A.
- Murray, D.M., Liao, J., Stankovic, L. y Stankovic, V. (2016). Understanding usage patterns of electric kettle and energy saving potential. *Applied Energy*, 171(), 231–242. doi:10.1016/j.apenergy.2016.03.038
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
- Pinto, N. (2020). *Conoce los productos que quizás no sabías que puedes encontrar por aplicativo para sorprender en Navidad*. Lima, Perú: Press Perú. Recuperado de <https://pressperu.com/conoce-los-productos-que-quizas-no-sabias-que-puedes-encontrar-por-aplicativo-para-sorprender-en-navidad/>
- Redacción EC. (2020). *Coronavirus en Perú: Sector electrodomésticos pierde S/.600 millones por estado de emergencia*. Lima, Perú: El Comercio. Recuperado de
<https://elcomercio.pe/economia/coronavirus-en-peru-sector-electrodomesticos-pierde-s600-millones-por-estado-de-emergencia-nnbc-noticia/>

- Redacción El Peruano. (2020). *Cuarentena: ¿Qué aparatos consumen más energía en el hogar?* Lima Perú: El Peruano. Recuperado de <https://elperuano.pe/noticia/93631-cuarentena-que-aparatos-consumen-mas-energia-en-el-hogar>
- Redacción Gestión. (2018). *¿Qué artefactos electrónicos consumen más energía?* Lima, Perú: Gestión. Recuperado de <https://gestion.pe/economia/artefactos-electronicos-consumen-energia-237358-noticia/?ref=gesr>
- Redacción Radio Nacional. (2020). *MINEM lanza campaña informativa para el buen uso de electricidad durante la cuarentena.* Lima, Perú: Radio Nacional. Recuperado de <https://www.radionacional.com.pe/noticias/actualidad/minem-lanza-campana-informativa-para-el-buen-uso-de-electricidad-durante-la-cuarentena>
- Ryniecki, A., Wawrzyniak, J. y Pilarska, A. A. (2015). Basics of process control: the on-off control system. *PRZEMYSŁ SPOŻYWCZY*, 1(69) 28-31. doi: 10.15199/65.2015.11.6
- Romagnoli, J. A., Palazoglu, A. y Whitaker, S. (2001). Dynamics of a stirred-tank heater. Intuition and analysis. *Chemical Engineering education*, (35), 46-49.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A. y Doyle III, F. J. (2011). *Process dynamics and control.* NJ, EU: John Wiley & Sons, Inc.
- Segura, H. (2019). Termodinámica de procesos químicos. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.
- Seshagiri, R. A., Rao, V. S. R. y Chidambaram, M. (2009). Direct synthesis-based controller design for integrating processes with time delay. *Journal of the Franklin Institute*, 346(1), 38-56. doi: 10.1016/j.jfranklin.2008.06.0
- Shah, M. B. N., Zailan, N., Abidin, A. F. Z., Halim, M. F., Annuar, K. A., Azahar, A. H.,..., Yaakub, M. F. (2019). PID-based temperature control device for electric kettle. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 9(3), 1683-1693.
- Singh, Y. K., Kumar, J., Pandey, Rohit K. y Bhargav, A. (2016). Temperature Control System and its Control using PID Controller.

- International Journal of Engineering Research & Technology*
(IJERT) CMRAES-2016 Conference Proceedings, 4(2), 1-3.
- Skogestad, S. (2003). Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*, 13(4), 291-309. doi: 10.1016/s0959-1524(02)00062-8
- Smith, C. L. (1972). *Digital Computer Process Control*: Intext Educational Publishers.
- Soedira, D. M., Lintanghati, D. K., Koestoeer, R. A. y Dhelika, R. (2020). Development of a low-cost prototype of an extruder for plastic waste. *AIP Conference Proceedings*. 2227. doi: 10.1063/5.0000936
- Sundaresan, K. R. y Krishnaswamy, P. R. (1978). Estimation of Time Delay Time Constant Parameters in Time, Frequency, and Laplace Domains, *Can. J. Chem. Eng.*, 56, 257-262. doi: 10.1002/cjce.5450560215
- Škultéty, E. y Pivarciova, E. y Karrach, L. (2018). The comparing of the selected temperature sensors compatible with the arduino platform. *Management Systems in Production Engineering*, 26, 168-171. doi: 10.1515/mspe-2018-0027
- Tan, H. y Yan, Q. (2017). Design of water temperature control system based on single chip microcomputer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 247, 012146.
- Tensa, M., Edmonds, K., Ferrero, V., Mikes, A., Soria, N., Stone, R. y DuPont, B. (2019) Toward Automated Functional Modeling: An Association Rules Approach for Mining the Relationship between Product Components and Function, en *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*, Delft, Países Bajos, del 5 al 8 de agosto de 2019.
doi:10.1017/dsi.2019.177
- Torstensson, E. (2013). Comparison of Schemes for Windup Protection (tesis de maestría). Recuperado de
<https://core.ac.uk/download/pdf/289952713.pdf>

- Visioli, A. (2001). Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 148(2), 180-184. doi: 10.1049/ip-cta:20010197
- Visioli, A. (2006). *Practical PID control*. Londres, Reino Unido: Springer. doi: 10.1007/1-84628-586-0
- Waygood, A. (2013). *An introduction to electrical science*. Nueva York, Estados Unidos de América: Routledge.
- Watson, R. (2018). *Use an Arduino UNO and the DS18B20 waterproof temperature sensor to create your own thermometer!* Recuperado de <https://maker.pro/arduino/projects/how-to-build-a-thermometer-with-arduino-uno-and-the-ds18b20-waterproof-sensor>
- Wibowo, A. S. y Susanto, E. (2018). Performance improvement of water temperature control using anti-windup proportional integral derivative. Iontar komputer. *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi*, 81. doi: doi:10.24843/lkjiti.2018.v09.i02
- Ziegler, J. G. y Nichols, N. B. (1942). Optimum Settings for Automatic Controllers. *ASME Transactions*, 64.

ANEXOS

ANEXO A

Código de Arduino IDE 1.8.15 para la medición de la temperatura

```
// Include the libraries we need
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Data wire is plugged into port 8 on the Arduino
#define ONE_WIRE_BUS 8

// Setup a oneWire instance to communicate with any OneWire devices
// (not just Maxim/Dallas temperature ICs)
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);

// Pass our oneWire reference to Dallas Temperature.
DallasTemperature sensors(&oneWire);

void setup(){
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("Dallas Temperature IC Control Library Demo");

    sensors.begin();
    Serial.println("CLEARDATA");
    Serial.println("LABEL,Hora,Tiempo,tempC");
}

void loop(){
    sensors.requestTemperatures(); // Send the command to get
temperatures
    float tempC = sensors.getTempCByIndex(0);
    Serial.print("DATA,TIME,TIMER,");
    Serial.println(tempC);
    delay(500);
}
```

ANEXO B
Datos experimentales de temperatura vs tiempo

Tabla B.1

Primer grupo de datos experimentales de temperatura vs tiempo^a

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
8:15:02 p. m.	0.00	19.44	8:15:48 p. m.	46.51	22.94
8:15:03 p. m.	1.00	19.44	8:15:49 p. m.	47.52	23.06
8:15:04 p. m.	2.11	19.44	8:15:50 p. m.	48.53	23.25
8:15:05 p. m.	3.12	19.44	8:15:51 p. m.	49.54	23.44
8:15:06 p. m.	4.13	19.44	8:15:52 p. m.	50.55	23.69
8:15:07 p. m.	5.13	19.37	8:15:53 p. m.	51.55	24.00
8:15:08 p. m.	6.15	19.44	8:15:54 p. m.	52.56	24.19
8:15:09 p. m.	7.16	19.44	8:15:55 p. m.	53.58	24.44
8:15:10 p. m.	8.16	19.44	8:15:56 p. m.	54.59	24.69
8:15:11 p. m.	9.17	19.44	8:15:57 p. m.	55.59	24.87
8:15:12 p. m.	10.18	19.44	8:15:58 p. m.	56.60	25.06
8:15:13 p. m.	11.19	19.37	8:15:59 p. m.	57.61	25.31
8:15:14 p. m.	12.20	19.44	8:16:00 p. m.	58.63	25.50
8:15:15 p. m.	13.21	19.44	8:16:01 p. m.	59.63	25.75
8:15:16 p. m.	14.22	19.44	8:16:02 p. m.	60.64	25.94
8:15:17 p. m.	15.23	19.44	8:16:03 p. m.	61.65	26.12
8:15:18 p. m.	16.23	19.37	8:16:04 p. m.	62.66	26.31
8:15:19 p. m.	17.24	19.44	8:16:06 p. m.	63.67	26.50
8:15:20 p. m.	18.25	19.56	8:16:07 p. m.	64.68	26.69
8:15:21 p. m.	19.27	19.62	8:16:08 p. m.	65.69	26.94
8:15:22 p. m.	20.27	19.75	8:16:09 p. m.	66.70	27.12
8:15:23 p. m.	21.28	19.94	8:16:10 p. m.	67.71	27.37
8:15:24 p. m.	22.29	20.12	8:16:11 p. m.	68.72	27.62
8:15:25 p. m.	23.30	20.25	8:16:12 p. m.	69.73	27.81
8:15:26 p. m.	24.30	20.37	8:16:13 p. m.	70.73	28.00
8:15:27 p. m.	25.32	20.44	8:16:14 p. m.	71.74	28.25
8:15:28 p. m.	26.33	20.62	8:16:15 p. m.	72.76	28.44
8:15:29 p. m.	27.34	20.62	8:16:16 p. m.	73.77	28.62
8:15:30 p. m.	28.34	20.75	8:16:17 p. m.	74.77	28.81
8:15:31 p. m.	29.35	20.81	8:16:18 p. m.	75.78	28.94
8:15:32 p. m.	30.37	20.94	8:16:19 p. m.	76.80	29.12
8:15:33 p. m.	31.38	21.00	8:16:20 p. m.	77.80	29.37
8:15:34 p. m.	32.39	21.06	8:16:21 p. m.	78.81	29.62
8:15:35 p. m.	33.39	21.25	8:16:22 p. m.	79.82	29.81
8:15:36 p. m.	34.40	21.44	8:16:23 p. m.	80.84	30.06
8:15:37 p. m.	35.41	21.62	8:16:24 p. m.	81.84	30.25
8:15:38 p. m.	36.42	21.69	8:16:25 p. m.	82.85	30.50
8:15:39 p. m.	37.43	21.81	8:16:26 p. m.	83.86	30.81
8:15:40 p. m.	38.44	21.87	8:16:27 p. m.	84.88	31.00
8:15:41 p. m.	39.45	21.87	8:16:28 p. m.	85.88	31.19
8:15:42 p. m.	40.45	22.00	8:16:29 p. m.	86.89	31.44
8:15:43 p. m.	41.46	22.06	8:16:30 p. m.	87.90	31.62
8:15:44 p. m.	42.48	22.31	8:16:31 p. m.	88.91	31.87
8:15:45 p. m.	43.48	22.44	8:16:32 p. m.	89.92	32.06
8:15:46 p. m.	44.49	22.62	8:16:33 p. m.	90.93	32.25
8:15:47 p. m.	45.50	22.75	8:16:34 p. m.	91.95	32.44

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
8:16:35 p. m.	92.95	32.69	8:17:27 p. m.	145.53	44.13
8:16:36 p. m.	93.98	32.88	8:17:28 p. m.	146.55	44.31
8:16:37 p. m.	94.98	33.00	8:17:29 p. m.	147.56	44.56
8:16:38 p. m.	95.98	33.13	8:17:30 p. m.	148.57	44.88
8:16:39 p. m.	97.00	33.31	8:17:31 p. m.	149.59	45.13
8:16:40 p. m.	98.01	33.50	8:17:32 p. m.	150.60	45.31
8:16:41 p. m.	99.02	33.69	8:17:33 p. m.	151.62	45.50
8:16:42 p. m.	100.03	33.88	8:17:34 p. m.	152.63	45.69
8:16:43 p. m.	101.04	34.06	8:17:35 p. m.	153.64	45.81
8:16:44 p. m.	102.05	34.19	8:17:36 p. m.	154.65	45.94
8:16:45 p. m.	103.05	34.50	8:17:37 p. m.	155.66	46.06
8:16:46 p. m.	104.07	34.63	8:17:39 p. m.	156.68	46.25
8:16:47 p. m.	105.08	34.88	8:17:40 p. m.	157.69	46.44
8:16:48 p. m.	106.09	35.06	8:17:41 p. m.	158.70	46.69
8:16:49 p. m.	107.10	35.31	8:17:42 p. m.	159.72	47.00
8:16:50 p. m.	108.11	35.44	8:17:43 p. m.	160.73	47.19
8:16:51 p. m.	109.12	35.69	8:17:44 p. m.	161.74	47.50
8:16:52 p. m.	110.13	35.81	8:17:45 p. m.	162.76	47.81
8:16:53 p. m.	111.14	36.00	8:17:46 p. m.	163.77	48.00
8:16:54 p. m.	112.16	36.19	8:17:47 p. m.	164.78	48.25
8:16:55 p. m.	113.16	36.44	8:17:48 p. m.	165.80	48.56
8:16:56 p. m.	114.18	36.63	8:17:49 p. m.	166.81	48.81
8:16:57 p. m.	115.19	36.81	8:17:50 p. m.	167.83	49.06
8:16:58 p. m.	116.20	37.06	8:17:51 p. m.	168.85	49.25
8:16:59 p. m.	117.21	37.31	8:17:52 p. m.	169.85	49.50
8:17:00 p. m.	118.22	37.56	8:17:53 p. m.	170.87	49.69
8:17:01 p. m.	119.23	37.81	8:17:54 p. m.	171.88	49.94
8:17:02 p. m.	120.25	38.06	8:17:55 p. m.	172.91	50.13
8:17:03 p. m.	121.25	38.31	8:17:56 p. m.	173.91	50.31
8:17:04 p. m.	122.27	38.50	8:17:57 p. m.	174.92	50.50
8:17:05 p. m.	123.27	38.81	8:17:58 p. m.	175.94	50.69
8:17:06 p. m.	124.28	39.13	8:17:59 p. m.	176.95	50.88
8:17:07 p. m.	125.30	39.44	8:18:00 p. m.	177.96	51.00
8:17:08 p. m.	126.31	39.69	8:18:01 p. m.	178.98	51.25
8:17:09 p. m.	127.32	39.94	8:18:02 p. m.	179.99	51.44
8:17:10 p. m.	128.34	40.13	8:18:03 p. m.	181.01	51.69
8:17:11 p. m.	129.34	40.31	8:18:04 p. m.	182.02	51.94
8:17:12 p. m.	130.37	40.56	8:18:05 p. m.	183.03	52.13
8:17:13 p. m.	131.37	40.81	8:18:06 p. m.	184.05	52.38
8:17:14 p. m.	132.38	41.00	8:18:07 p. m.	185.06	52.56
8:17:15 p. m.	133.39	41.25	8:18:08 p. m.	186.08	52.81
8:17:16 p. m.	134.41	41.44	8:18:09 p. m.	187.09	53.06
8:17:17 p. m.	135.41	41.56	8:18:10 p. m.	188.11	53.25
8:17:18 p. m.	136.43	41.75	8:18:11 p. m.	189.13	53.50
8:17:19 p. m.	137.44	41.94	8:18:12 p. m.	190.14	53.69
8:17:20 p. m.	138.45	42.19	8:18:13 p. m.	191.16	53.88
8:17:21 p. m.	139.46	42.44	8:18:14 p. m.	192.17	54.13
8:17:22 p. m.	140.48	42.75	8:18:15 p. m.	193.20	54.31
8:17:23 p. m.	141.48	43.00	8:18:16 p. m.	194.20	54.50
8:17:24 p. m.	142.50	43.31	8:18:17 p. m.	195.22	54.75
8:17:25 p. m.	143.52	43.63	8:18:18 p. m.	196.23	54.94
8:17:26 p. m.	144.52	43.88	8:18:19 p. m.	197.25	55.13

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
8:18:20 p. m.	198.26	55.38	8:19:13 p. m.	251.17	66.50
8:18:21 p. m.	199.27	55.63	8:19:14 p. m.	252.18	66.69
8:18:22 p. m.	200.30	55.88	8:19:15 p. m.	253.20	66.87
8:18:23 p. m.	201.31	56.13	8:19:16 p. m.	254.22	67.12
8:18:24 p. m.	202.33	56.38	8:19:17 p. m.	255.24	67.31
8:18:25 p. m.	203.34	56.63	8:19:18 p. m.	256.26	67.50
8:18:26 p. m.	204.36	56.81	8:19:19 p. m.	257.28	67.75
8:18:27 p. m.	205.38	57.06	8:19:20 p. m.	258.30	67.94
8:18:28 p. m.	206.39	57.25	8:19:21 p. m.	259.32	68.12
8:18:29 p. m.	207.41	57.50	8:19:22 p. m.	260.34	68.37
8:18:30 p. m.	208.42	57.69	8:19:23 p. m.	261.36	68.56
8:18:31 p. m.	209.44	57.94	8:19:24 p. m.	262.38	68.81
8:18:32 p. m.	210.45	58.13	8:19:25 p. m.	263.40	69.00
8:18:33 p. m.	211.47	58.31	8:19:26 p. m.	264.42	69.19
8:18:34 p. m.	212.49	58.50	8:19:27 p. m.	265.44	69.44
8:18:35 p. m.	213.50	58.75	8:19:28 p. m.	266.46	69.69
8:18:36 p. m.	214.52	58.94	8:19:29 p. m.	267.48	69.94
8:18:37 p. m.	215.54	59.13	8:19:30 p. m.	268.50	70.19
8:18:38 p. m.	216.55	59.38	8:19:31 p. m.	269.52	70.37
8:18:39 p. m.	217.57	59.56	8:19:32 p. m.	270.55	70.62
8:18:40 p. m.	218.59	59.75	8:19:33 p. m.	271.56	70.81
8:18:41 p. m.	219.60	60.00	8:19:34 p. m.	272.59	71.00
8:18:42 p. m.	220.62	60.25	8:19:35 p. m.	273.60	71.19
8:18:43 p. m.	221.63	60.44	8:19:36 p. m.	274.63	71.37
8:18:44 p. m.	222.66	60.63	8:19:37 p. m.	275.65	71.56
8:18:46 p. m.	223.67	60.81	8:19:39 p. m.	276.67	71.81
8:18:47 p. m.	224.69	61.00	8:19:40 p. m.	277.69	72.00
8:18:48 p. m.	225.71	61.25	8:19:41 p. m.	278.71	72.19
8:18:49 p. m.	226.73	61.50	8:19:42 p. m.	279.73	72.37
8:18:50 p. m.	227.74	61.75	8:19:43 p. m.	280.75	72.56
8:18:51 p. m.	228.77	62.00	8:19:44 p. m.	281.78	72.75
8:18:52 p. m.	229.77	62.25	8:19:45 p. m.	282.80	72.94
8:18:53 p. m.	230.80	62.50	8:19:46 p. m.	283.82	73.12
8:18:54 p. m.	231.81	62.69	8:19:47 p. m.	284.84	73.31
8:18:55 p. m.	232.83	62.88	8:19:48 p. m.	285.87	73.56
8:18:56 p. m.	233.84	63.00	8:19:49 p. m.	286.88	73.81
8:18:57 p. m.	234.87	63.19	8:19:50 p. m.	287.91	74.00
8:18:58 p. m.	235.88	63.38	8:19:51 p. m.	288.93	74.25
8:18:59 p. m.	236.91	63.56	8:19:52 p. m.	289.95	74.44
8:19:00 p. m.	237.92	63.69	8:19:53 p. m.	290.98	74.69
8:19:01 p. m.	238.94	63.88	8:19:54 p. m.	292.00	74.94
8:19:02 p. m.	239.95	64.06	8:19:55 p. m.	293.02	75.12
8:19:03 p. m.	240.98	64.31	8:19:56 p. m.	294.05	75.37
8:19:04 p. m.	241.99	64.50	8:19:57 p. m.	295.06	75.56
8:19:05 p. m.	243.01	64.69	8:19:58 p. m.	296.09	75.75
8:19:06 p. m.	244.13	64.87	8:19:59 p. m.	297.11	76.00
8:19:07 p. m.	245.06	65.12	8:20:00 p. m.	298.13	76.19
8:19:08 p. m.	246.07	65.37	8:20:01 p. m.	299.16	76.37
8:19:09 p. m.	247.10	65.56	8:20:02 p. m.	300.18	76.56
8:19:10 p. m.	248.11	65.75	8:20:03 p. m.	301.20	76.81
8:19:11 p. m.	249.13	66.00	8:20:04 p. m.	302.23	77.00
8:19:12 p. m.	250.14	66.19	8:20:05 p. m.	303.25	77.25

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
8:20:06 p. m.	304.27	77.44	8:20:59 p. m.	357.63	88.69
8:20:07 p. m.	305.30	77.62	8:21:00 p. m.	358.65	88.87
8:20:08 p. m.	306.32	77.81	8:21:02 p. m.	359.68	89.12
8:20:09 p. m.	307.34	78.00	8:21:03 p. m.	360.71	89.37
8:20:10 p. m.	308.37	78.19	8:21:04 p. m.	361.73	89.62
8:20:11 p. m.	309.39	78.44	8:21:05 p. m.	362.77	89.81
8:20:12 p. m.	310.41	78.69	8:21:06 p. m.	363.80	90.06
8:20:13 p. m.	311.44	78.87	8:21:07 p. m.	364.83	90.31
8:20:14 p. m.	312.48	79.12	8:21:08 p. m.	365.85	90.56
8:20:15 p. m.	313.50	79.31	8:21:09 p. m.	366.88	90.81
8:20:16 p. m.	314.52	79.50	8:21:10 p. m.	367.91	91.06
8:20:17 p. m.	315.54	79.75	8:21:11 p. m.	368.94	91.31
8:20:18 p. m.	316.56	80.00	8:21:12 p. m.	369.98	91.56
8:20:19 p. m.	317.59	80.19	8:21:13 p. m.	371.00	91.75
8:20:20 p. m.	318.61	80.44	8:21:14 p. m.	372.03	92.00
8:20:21 p. m.	319.64	80.62	8:21:15 p. m.	373.06	92.25
8:20:22 p. m.	320.66	80.81	8:21:16 p. m.	374.10	92.50
8:20:24 p. m.	321.69	81.06	8:21:17 p. m.	375.13	92.75
8:20:25 p. m.	322.71	81.25	8:21:18 p. m.	376.16	93.00
8:20:26 p. m.	323.74	81.44	8:21:19 p. m.	377.19	93.25
8:20:27 p. m.	324.77	81.62	8:21:20 p. m.	378.23	93.44
8:20:28 p. m.	325.79	81.81	8:21:21 p. m.	379.24	93.69
8:20:29 p. m.	326.81	82.06	8:21:22 p. m.	380.28	93.94
8:20:30 p. m.	327.85	82.25	8:21:23 p. m.	381.31	94.19
8:20:31 p. m.	328.87	82.44	8:21:24 p. m.	382.34	94.44
8:20:32 p. m.	329.89	82.69	8:21:25 p. m.	383.37	94.69
8:20:33 p. m.	330.91	82.87	8:21:26 p. m.	384.40	94.87
8:20:34 p. m.	331.95	83.06	8:21:27 p. m.	385.43	95.12
8:20:35 p. m.	332.97	83.31	8:21:28 p. m.	386.47	95.37
8:20:36 p. m.	333.99	83.50	8:21:29 p. m.	387.49	95.62
8:20:37 p. m.	335.02	83.69	8:21:30 p. m.	388.52	95.81
8:20:38 p. m.	336.05	83.94	8:21:31 p. m.	389.56	96.06
8:20:39 p. m.	337.07	84.12	8:21:32 p. m.	390.59	96.25
8:20:40 p. m.	338.10	84.31	8:21:33 p. m.	391.63	96.50
8:20:41 p. m.	339.13	84.56	8:21:34 p. m.	392.66	96.69
8:20:42 p. m.	340.15	84.81	8:21:36 p. m.	393.69	96.87
8:20:43 p. m.	341.18	85.06	8:21:37 p. m.	394.72	97.12
8:20:44 p. m.	342.21	85.25	8:21:38 p. m.	395.77	97.31
8:20:45 p. m.	343.23	85.44	8:21:39 p. m.	396.79	97.44
8:20:46 p. m.	344.26	85.62	8:21:40 p. m.	397.82	97.62
8:20:47 p. m.	345.29	85.87	8:21:41 p. m.	398.85	97.81
8:20:48 p. m.	346.31	86.06	8:21:42 p. m.	399.89	98.00
8:20:49 p. m.	347.34	86.31	8:21:43 p. m.	400.92	98.12
8:20:50 p. m.	348.37	86.62	8:21:44 p. m.	401.95	98.25
8:20:51 p. m.	349.40	86.81	8:21:45 p. m.	402.98	98.44
8:20:52 p. m.	350.43	87.06	8:21:46 p. m.	404.02	98.56
8:20:53 p. m.	351.45	87.25	8:21:47 p. m.	405.05	98.69
8:20:54 p. m.	352.48	87.50	8:21:48 p. m.	406.09	98.75
8:20:55 p. m.	353.51	87.75	8:21:49 p. m.	407.12	98.87
8:20:56 p. m.	354.54	88.00	8:21:50 p. m.	408.16	98.94
8:20:57 p. m.	355.57	88.19	8:21:51 p. m.	409.19	99.00
8:20:58 p. m.	356.59	88.37	8:21:52 p. m.	410.22	99.06

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
8:21:53 p. m.	411.27	99.12
8:21:54 p. m.	412.29	99.19
8:21:55 p. m.	413.32	99.25
8:21:56 p. m.	414.35	99.25
8:21:57 p. m.	415.39	99.31
8:21:58 p. m.	416.42	99.31
8:21:59 p. m.	417.45	99.37
8:22:00 p. m.	418.49	99.37
8:22:01 p. m.	419.52	99.44
8:22:02 p. m.	420.55	99.44
8:22:03 p. m.	421.59	99.50
8:22:04 p. m.	422.63	99.50
8:22:05 p. m.	423.66	99.50
8:22:07 p. m.	424.69	99.56
8:22:08 p. m.	425.73	99.56
8:22:09 p. m.	426.76	99.62
8:22:10 p. m.	427.80	99.56
8:22:11 p. m.	428.83	99.62
8:22:12 p. m.	429.86	99.62
8:22:13 p. m.	430.90	99.62
8:22:14 p. m.	431.93	99.62
8:22:15 p. m.	432.97	99.62
8:22:16 p. m.	433.99	99.62
8:22:17 p. m.	435.02	99.62
8:22:18 p. m.	436.06	99.62
8:22:19 p. m.	437.09	99.62
8:22:20 p. m.	438.13	99.62
8:22:21 p. m.	439.16	99.62
8:22:22 p. m.	440.20	99.62
8:22:23 p. m.	441.23	99.62
8:22:24 p. m.	442.27	99.62
8:22:25 p. m.	443.30	99.62
8:22:26 p. m.	444.33	99.56
8:22:27 p. m.	445.37	99.56
8:22:28 p. m.	446.40	99.56
8:22:29 p. m.	447.43	99.56
8:22:30 p. m.	448.48	99.56
8:22:31 p. m.	449.50	99.56
8:22:32 p. m.	450.53	99.56
8:22:33 p. m.	451.57	99.56
8:22:34 p. m.	452.60	99.56
8:22:35 p. m.	453.65	99.56
8:22:36 p. m.	454.67	99.50
8:22:38 p. m.	455.70	99.50

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
8:22:39 p. m.	456.73	99.44
8:22:40 p. m.	457.77	99.44
8:22:41 p. m.	458.80	99.44
8:22:42 p. m.	459.85	99.44
8:22:43 p. m.	460.87	99.44
8:22:44 p. m.	461.91	99.37
8:22:45 p. m.	462.94	99.37
8:22:46 p. m.	463.97	99.37
8:22:47 p. m.	465.01	99.31
8:22:48 p. m.	466.04	99.31
8:22:49 p. m.	467.07	99.31
8:22:50 p. m.	468.11	99.31
8:22:51 p. m.	469.14	99.31
8:22:52 p. m.	470.17	99.31
8:22:53 p. m.	471.20	99.31
8:22:54 p. m.	472.24	99.31
8:22:55 p. m.	473.27	99.31
8:22:56 p. m.	474.30	99.31
8:22:57 p. m.	475.34	99.31
8:22:58 p. m.	476.38	99.25
8:22:59 p. m.	477.41	99.25
8:23:00 p. m.	478.45	99.25
8:23:01 p. m.	479.48	99.25
8:23:02 p. m.	480.53	99.25
8:23:03 p. m.	481.54	99.19
8:23:04 p. m.	482.57	99.19
8:23:05 p. m.	483.61	99.19
8:23:06 p. m.	484.64	99.12
8:23:08 p. m.	485.68	99.12
8:23:09 p. m.	486.71	99.12
8:23:10 p. m.	487.74	99.12
8:23:11 p. m.	488.77	99.12
8:23:12 p. m.	489.82	99.12
8:23:13 p. m.	490.84	99.19
8:23:14 p. m.	491.88	99.12
8:23:15 p. m.	492.91	99.12
8:23:16 p. m.	493.95	99.12
8:23:17 p. m.	494.98	99.12
8:23:18 p. m.	496.01	99.12
8:23:19 p. m.	497.05	99.12
8:23:20 p. m.	498.08	99.12
8:23:21 p. m.	499.12	99.06
8:23:22 p. m.	500.15	99.06
8:23:23 p. m.	501.19	99.06

^aDatos tomados el 24 de junio de 2021.

Tabla B.2

Segundo grupo de datos experimentales de temperatura vs tiempo^b

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
9:15:00 p. m.	0.00	19.31	9:15:48 p. m.	48.33	23.81
9:15:01 p. m.	0.90	19.31	9:15:49 p. m.	49.34	24.00
9:15:02 p. m.	1.91	19.31	9:15:50 p. m.	50.35	24.19
9:15:03 p. m.	2.91	19.31	9:15:51 p. m.	51.36	24.37
9:15:04 p. m.	3.92	19.31	9:15:52 p. m.	52.37	24.56
9:15:05 p. m.	4.94	19.31	9:15:53 p. m.	53.38	24.87
9:15:06 p. m.	5.95	19.25	9:15:54 p. m.	54.38	25.12
9:15:07 p. m.	6.95	19.31	9:15:55 p. m.	55.40	25.37
9:15:08 p. m.	7.97	19.31	9:15:56 p. m.	56.41	25.69
9:15:09 p. m.	8.98	19.31	9:15:57 p. m.	57.42	25.87
9:15:10 p. m.	9.98	19.31	9:15:58 p. m.	58.43	26.19
9:15:11 p. m.	10.99	19.31	9:15:59 p. m.	59.44	26.37
9:15:12 p. m.	12.00	19.31	9:16:00 p. m.	60.45	26.62
9:15:13 p. m.	13.01	19.31	9:16:01 p. m.	61.45	26.81
9:15:14 p. m.	14.02	19.31	9:16:02 p. m.	62.47	27.00
9:15:15 p. m.	15.02	19.31	9:16:03 p. m.	63.48	27.12
9:15:16 p. m.	16.04	19.25	9:16:04 p. m.	64.48	27.31
9:15:17 p. m.	17.05	19.25	9:16:05 p. m.	65.49	27.56
9:15:18 p. m.	18.05	19.31	9:16:06 p. m.	66.51	27.69
9:15:19 p. m.	19.07	19.31	9:16:07 p. m.	67.52	27.94
9:15:20 p. m.	20.08	19.31	9:16:08 p. m.	68.52	28.19
9:15:21 p. m.	21.09	19.31	9:16:09 p. m.	69.53	28.44
9:15:22 p. m.	22.09	19.31	9:16:10 p. m.	70.54	28.69
9:15:23 p. m.	23.10	19.37	9:16:11 p. m.	71.55	28.87
9:15:24 p. m.	24.11	19.50	9:16:12 p. m.	72.56	29.06
9:15:25 p. m.	25.12	19.62	9:16:13 p. m.	73.57	29.31
9:15:26 p. m.	26.13	19.81	9:16:15 p. m.	74.59	29.56
9:15:27 p. m.	27.13	20.00	9:16:16 p. m.	75.59	29.81
9:15:28 p. m.	28.15	20.19	9:16:17 p. m.	76.60	30.06
9:15:29 p. m.	29.16	20.37	9:16:18 p. m.	77.61	30.31
9:15:30 p. m.	30.16	20.50	9:16:19 p. m.	78.63	30.56
9:15:31 p. m.	31.18	20.69	9:16:20 p. m.	79.63	30.75
9:15:32 p. m.	32.18	20.94	9:16:21 p. m.	80.64	30.94
9:15:33 p. m.	33.20	21.06	9:16:22 p. m.	81.65	31.12
9:15:34 p. m.	34.20	21.25	9:16:23 p. m.	82.66	31.31
9:15:35 p. m.	35.21	21.37	9:16:24 p. m.	83.67	31.50
9:15:36 p. m.	36.23	21.50	9:16:25 p. m.	84.68	31.75
9:15:37 p. m.	37.23	21.62	9:16:26 p. m.	85.69	31.94
9:15:38 p. m.	38.24	21.75	9:16:27 p. m.	86.70	32.19
9:15:39 p. m.	39.25	21.94	9:16:28 p. m.	87.71	32.44
9:15:40 p. m.	40.26	22.12	9:16:29 p. m.	88.72	32.69
9:15:41 p. m.	41.27	22.31	9:16:30 p. m.	89.73	32.94
9:15:42 p. m.	42.27	22.50	9:16:31 p. m.	90.74	33.13
9:15:43 p. m.	43.28	22.75	9:16:32 p. m.	91.77	33.31
9:15:44 p. m.	44.30	22.94	9:16:33 p. m.	92.77	33.56
9:15:45 p. m.	45.30	23.19	9:16:34 p. m.	93.77	33.75
9:15:46 p. m.	46.31	23.37	9:16:35 p. m.	94.78	33.88
9:15:47 p. m.	47.32	23.56	9:16:36 p. m.	95.80	34.13

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
9:16:37 p. m.	96.80	34.38	9:17:29 p. m.	149.41	45.44
9:16:38 p. m.	97.81	34.56	9:17:30 p. m.	150.41	45.69
9:16:39 p. m.	98.82	34.75	9:17:31 p. m.	151.43	45.88
9:16:40 p. m.	99.84	35.00	9:17:32 p. m.	152.45	46.06
9:16:41 p. m.	100.85	35.19	9:17:33 p. m.	153.45	46.31
9:16:42 p. m.	101.86	35.31	9:17:34 p. m.	154.47	46.50
9:16:43 p. m.	102.87	35.56	9:17:35 p. m.	155.49	46.69
9:16:44 p. m.	103.88	35.81	9:17:36 p. m.	156.50	46.94
9:16:45 p. m.	104.89	35.94	9:17:37 p. m.	157.52	47.13
9:16:46 p. m.	105.90	36.00	9:17:38 p. m.	158.53	47.31
9:16:47 p. m.	106.92	36.19	9:17:39 p. m.	159.54	47.50
9:16:48 p. m.	107.92	36.38	9:17:40 p. m.	160.55	47.69
9:16:49 p. m.	108.94	36.56	9:17:41 p. m.	161.57	47.88
9:16:50 p. m.	109.95	36.81	9:17:43 p. m.	162.58	48.06
9:16:51 p. m.	110.95	37.06	9:17:44 p. m.	163.59	48.25
9:16:52 p. m.	111.97	37.31	9:17:45 p. m.	164.61	48.50
9:16:53 p. m.	112.98	37.56	9:17:46 p. m.	165.62	48.69
9:16:54 p. m.	113.98	37.81	9:17:47 p. m.	166.63	48.94
9:16:55 p. m.	115.05	38.06	9:17:48 p. m.	167.65	49.13
9:16:56 p. m.	116.01	38.31	9:17:49 p. m.	168.66	49.31
9:16:57 p. m.	117.02	38.50	9:17:50 p. m.	169.67	49.50
9:16:58 p. m.	118.03	38.75	9:17:51 p. m.	170.69	49.75
9:16:59 p. m.	119.04	38.94	9:17:52 p. m.	171.70	49.94
9:17:00 p. m.	120.05	39.13	9:17:53 p. m.	172.72	50.13
9:17:01 p. m.	121.06	39.38	9:17:54 p. m.	173.73	50.31
9:17:02 p. m.	122.08	39.56	9:17:55 p. m.	174.75	50.50
9:17:03 p. m.	123.09	39.81	9:17:56 p. m.	175.76	50.75
9:17:04 p. m.	124.10	40.00	9:17:57 p. m.	176.77	50.94
9:17:05 p. m.	125.11	40.25	9:17:58 p. m.	177.79	51.13
9:17:06 p. m.	126.13	40.44	9:17:59 p. m.	178.80	51.38
9:17:07 p. m.	127.13	40.69	9:18:00 p. m.	179.82	51.56
9:17:08 p. m.	128.14	40.88	9:18:01 p. m.	180.83	51.81
9:17:09 p. m.	129.16	41.06	9:18:02 p. m.	181.84	52.00
9:17:10 p. m.	130.16	41.31	9:18:03 p. m.	182.86	52.25
9:17:11 p. m.	131.18	41.56	9:18:04 p. m.	183.88	52.50
9:17:12 p. m.	132.19	41.75	9:18:05 p. m.	184.89	52.69
9:17:13 p. m.	133.20	42.00	9:18:06 p. m.	185.91	52.94
9:17:14 p. m.	134.22	42.25	9:18:07 p. m.	186.91	53.13
9:17:15 p. m.	135.23	42.44	9:18:08 p. m.	187.94	53.38
9:17:16 p. m.	136.24	42.63	9:18:09 p. m.	188.95	53.63
9:17:17 p. m.	137.25	42.81	9:18:10 p. m.	189.97	53.81
9:17:18 p. m.	138.27	43.00	9:18:11 p. m.	190.98	54.06
9:17:19 p. m.	139.27	43.25	9:18:12 p. m.	191.99	54.25
9:17:20 p. m.	140.29	43.44	9:18:13 p. m.	193.01	54.44
9:17:21 p. m.	141.30	43.69	9:18:14 p. m.	194.02	54.63
9:17:22 p. m.	142.31	43.94	9:18:15 p. m.	195.04	54.81
9:17:23 p. m.	143.33	44.13	9:18:16 p. m.	196.05	55.00
9:17:24 p. m.	144.34	44.31	9:18:17 p. m.	197.07	55.25
9:17:25 p. m.	145.35	44.50	9:18:18 p. m.	198.09	55.44
9:17:26 p. m.	146.37	44.75	9:18:19 p. m.	199.10	55.63
9:17:27 p. m.	147.38	45.00	9:18:20 p. m.	200.12	55.81
9:17:28 p. m.	148.39	45.19	9:18:21 p. m.	201.13	56.00

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
9:18:22 p. m.	202.15	56.19	9:19:15 p. m.	256.38	67.31
9:18:23 p. m.	203.16	56.44	9:19:16 p. m.	257.16	67.56
9:18:24 p. m.	204.18	56.63	9:19:17 p. m.	257.17	67.75
9:18:25 p. m.	205.20	56.88	9:19:18 p. m.	258.25	67.94
9:18:26 p. m.	206.21	57.06	9:19:19 p. m.	259.15	68.19
9:18:27 p. m.	207.23	57.31	9:19:20 p. m.	260.19	68.37
9:18:28 p. m.	208.24	57.56	9:19:21 p. m.	261.20	68.56
9:18:29 p. m.	209.26	57.75	9:19:22 p. m.	262.22	68.75
9:18:30 p. m.	210.28	58.00	9:19:23 p. m.	263.23	68.94
9:18:31 p. m.	211.30	58.25	9:19:24 p. m.	264.25	69.12
9:18:32 p. m.	212.31	58.44	9:19:25 p. m.	265.27	69.37
9:18:33 p. m.	213.33	58.63	9:19:26 p. m.	266.29	69.56
9:18:34 p. m.	214.34	58.88	9:19:27 p. m.	267.30	69.81
9:18:35 p. m.	215.36	59.06	9:19:28 p. m.	268.33	70.06
9:18:36 p. m.	216.38	59.31	9:19:29 p. m.	269.34	70.25
9:18:37 p. m.	217.40	59.50	9:19:30 p. m.	270.37	70.44
9:18:38 p. m.	218.41	59.69	9:19:31 p. m.	271.39	70.69
9:18:39 p. m.	219.43	59.94	9:19:32 p. m.	272.41	70.81
9:18:40 p. m.	220.45	60.13	9:19:33 p. m.	273.43	71.06
9:18:41 p. m.	221.46	60.31	9:19:34 p. m.	274.45	71.25
9:18:42 p. m.	222.48	60.50	9:19:35 p. m.	275.48	71.50
9:18:43 p. m.	223.49	60.69	9:19:36 p. m.	276.50	71.69
9:18:44 p. m.	224.52	60.88	9:19:37 p. m.	277.52	71.87
9:18:45 p. m.	225.53	61.06	9:19:38 p. m.	278.54	72.12
9:18:46 p. m.	226.55	61.25	9:19:39 p. m.	279.56	72.31
9:18:47 p. m.	227.56	61.56	9:19:41 p. m.	280.59	72.56
9:18:49 p. m.	228.59	61.75	9:19:42 p. m.	281.60	72.75
9:18:50 p. m.	229.60	61.94	9:19:43 p. m.	282.63	73.00
9:18:51 p. m.	230.62	62.19	9:19:44 p. m.	283.65	73.19
9:18:52 p. m.	231.63	62.38	9:19:45 p. m.	284.66	73.37
9:18:53 p. m.	232.66	62.63	9:19:46 p. m.	285.69	73.56
9:18:54 p. m.	233.67	62.81	9:19:47 p. m.	286.71	73.75
9:18:55 p. m.	234.69	63.06	9:19:48 p. m.	287.73	74.00
9:18:56 p. m.	235.70	63.31	9:19:49 p. m.	288.76	74.19
9:18:57 p. m.	236.73	63.50	9:19:50 p. m.	289.77	74.44
9:18:58 p. m.	237.74	63.63	9:19:51 p. m.	290.81	74.62
9:18:59 p. m.	238.77	63.81	9:19:52 p. m.	291.82	74.81
9:19:00 p. m.	239.78	64.00	9:19:53 p. m.	292.85	75.06
9:19:01 p. m.	241.00	64.25	9:19:54 p. m.	293.87	75.25
9:19:02 p. m.	241.83	64.44	9:19:55 p. m.	294.89	75.44
9:19:03 p. m.	242.84	64.69	9:19:56 p. m.	295.91	75.69
9:19:04 p. m.	243.73	64.87	9:19:57 p. m.	296.94	75.94
9:19:05 p. m.	244.66	65.12	9:19:58 p. m.	297.95	76.12
9:19:06 p. m.	245.58	65.37	9:19:59 p. m.	298.98	76.31
9:19:07 p. m.	246.50	65.62	9:20:00 p. m.	300.02	76.56
9:19:08 p. m.	248.00	65.81	9:20:01 p. m.	301.03	76.75
9:19:09 p. m.	249.11	66.06	9:20:02 p. m.	302.05	77.00
9:19:10 p. m.	250.33	66.25	9:20:03 p. m.	303.07	77.19
9:19:11 p. m.	251.54	66.50	9:20:04 p. m.	304.09	77.44
9:19:12 p. m.	252.75	66.69	9:20:05 p. m.	305.13	77.69
9:19:13 p. m.	253.96	66.94	9:20:06 p. m.	306.15	77.87
9:19:14 p. m.	255.17	67.12	9:20:07 p. m.	307.17	78.12

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
9:20:08 p. m.	308.20	78.31	9:21:01 p. m.	361.56	89.50
9:20:09 p. m.	309.22	78.50	9:21:03 p. m.	362.59	89.75
9:20:10 p. m.	310.25	78.75	9:21:04 p. m.	363.63	89.94
9:20:11 p. m.	311.28	78.94	9:21:05 p. m.	364.66	90.19
9:20:12 p. m.	312.29	79.12	9:21:06 p. m.	365.68	90.44
9:20:13 p. m.	313.31	79.37	9:21:07 p. m.	366.71	90.62
9:20:14 p. m.	314.34	79.56	9:21:08 p. m.	367.74	90.87
9:20:15 p. m.	315.37	79.81	9:21:09 p. m.	368.78	91.12
9:20:16 p. m.	316.38	80.00	9:21:10 p. m.	369.80	91.31
9:20:17 p. m.	317.41	80.25	9:21:11 p. m.	370.83	91.56
9:20:18 p. m.	318.44	80.50	9:21:12 p. m.	371.86	91.75
9:20:19 p. m.	319.47	80.69	9:21:13 p. m.	372.88	92.00
9:20:20 p. m.	320.49	80.87	9:21:14 p. m.	373.91	92.25
9:20:21 p. m.	321.52	81.06	9:21:15 p. m.	374.95	92.44
9:20:22 p. m.	322.54	81.31	9:21:16 p. m.	375.98	92.62
9:20:23 p. m.	323.56	81.50	9:21:17 p. m.	377.01	92.87
9:20:25 p. m.	324.59	81.75	9:21:18 p. m.	378.04	93.12
9:20:26 p. m.	325.61	81.94	9:21:19 p. m.	379.07	93.31
9:20:27 p. m.	326.64	82.12	9:21:20 p. m.	380.10	93.56
9:20:28 p. m.	327.66	82.31	9:21:21 p. m.	381.13	93.81
9:20:29 p. m.	328.69	82.56	9:21:22 p. m.	382.16	94.00
9:20:30 p. m.	329.72	82.75	9:21:23 p. m.	383.20	94.25
9:20:31 p. m.	330.76	83.00	9:21:24 p. m.	384.23	94.44
9:20:32 p. m.	331.81	83.19	9:21:25 p. m.	385.26	94.69
9:20:33 p. m.	332.80	83.37	9:21:26 p. m.	386.29	94.94
9:20:34 p. m.	333.83	83.62	9:21:27 p. m.	387.32	95.12
9:20:35 p. m.	334.84	83.87	9:21:28 p. m.	388.35	95.37
9:20:36 p. m.	335.88	84.06	9:21:29 p. m.	389.38	95.62
9:20:37 p. m.	336.90	84.31	9:21:30 p. m.	390.41	95.81
9:20:38 p. m.	337.92	84.50	9:21:31 p. m.	391.45	96.00
9:20:39 p. m.	338.95	84.75	9:21:32 p. m.	392.48	96.25
9:20:40 p. m.	339.98	84.94	9:21:33 p. m.	393.52	96.44
9:20:41 p. m.	341.02	85.12	9:21:34 p. m.	394.55	96.62
9:20:42 p. m.	342.03	85.37	9:21:36 p. m.	395.58	96.81
9:20:43 p. m.	343.06	85.56	9:21:37 p. m.	396.61	97.00
9:20:44 p. m.	344.09	85.81	9:21:38 p. m.	397.64	97.19
9:20:45 p. m.	345.12	86.00	9:21:39 p. m.	398.67	97.37
9:20:46 p. m.	346.14	86.19	9:21:40 p. m.	399.70	97.56
9:20:47 p. m.	347.17	86.44	9:21:41 p. m.	400.74	97.75
9:20:48 p. m.	348.20	86.62	9:21:42 p. m.	401.77	97.87
9:20:49 p. m.	349.23	86.87	9:21:43 p. m.	402.80	98.06
9:20:50 p. m.	350.25	87.06	9:21:44 p. m.	403.84	98.19
9:20:51 p. m.	351.29	87.31	9:21:45 p. m.	404.88	98.37
9:20:52 p. m.	352.30	87.56	9:21:46 p. m.	405.91	98.50
9:20:53 p. m.	353.34	87.75	9:21:47 p. m.	406.94	98.62
9:20:54 p. m.	354.36	88.00	9:21:48 p. m.	407.97	98.69
9:20:55 p. m.	355.39	88.19	9:21:49 p. m.	409.01	98.81
9:20:56 p. m.	356.42	88.44	9:21:50 p. m.	410.04	98.87
9:20:57 p. m.	357.45	88.62	9:21:51 p. m.	411.07	98.94
9:20:58 p. m.	358.48	88.87	9:21:52 p. m.	412.10	99.00
9:20:59 p. m.	359.51	89.12	9:21:53 p. m.	413.13	99.12
9:21:00 p. m.	360.54	89.31	9:21:54 p. m.	414.96	99.19

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
9:21:55 p. m.	415.20	99.19	9:22:39 p. m.	458.62	99.44
9:21:56 p. m.	416.23	99.25	9:22:40 p. m.	459.65	99.44
9:21:57 p. m.	417.29	99.31	9:22:41 p. m.	460.69	99.44
9:21:58 p. m.	418.30	99.31	9:22:42 p. m.	461.72	99.44
9:21:59 p. m.	419.34	99.31	9:22:43 p. m.	462.76	99.44
9:22:00 p. m.	420.38	99.37	9:22:44 p. m.	463.79	99.37
9:22:01 p. m.	421.41	99.37	9:22:45 p. m.	464.82	99.37
9:22:02 p. m.	422.44	99.44	9:22:46 p. m.	465.85	99.37
9:22:03 p. m.	423.48	99.44	9:22:47 p. m.	466.89	99.37
9:22:04 p. m.	424.51	99.44	9:22:48 p. m.	467.92	99.31
9:22:05 p. m.	425.54	99.50	9:22:49 p. m.	468.95	99.31
9:22:06 p. m.	426.58	99.50	9:22:50 p. m.	469.98	99.31
9:22:08 p. m.	427.61	99.50	9:22:51 p. m.	471.02	99.31
9:22:09 p. m.	428.64	99.56	9:22:52 p. m.	472.05	99.31
9:22:10 p. m.	429.68	99.56	9:22:53 p. m.	473.09	99.25
9:22:11 p. m.	430.71	99.56	9:22:54 p. m.	474.13	99.25
9:22:12 p. m.	431.74	99.56	9:22:55 p. m.	475.16	99.25
9:22:13 p. m.	432.77	99.56	9:22:56 p. m.	476.19	99.25
9:22:14 p. m.	433.81	99.62	9:22:57 p. m.	477.22	99.19
9:22:15 p. m.	434.84	99.62	9:22:58 p. m.	478.26	99.19
9:22:16 p. m.	435.88	99.62	9:22:59 p. m.	479.29	99.19
9:22:17 p. m.	436.91	99.62	9:23:00 p. m.	480.32	99.12
9:22:18 p. m.	437.95	99.56	9:23:01 p. m.	481.36	99.12
9:22:19 p. m.	438.98	99.62	9:23:02 p. m.	482.39	99.12
9:22:20 p. m.	440.02	99.62	9:23:03 p. m.	483.42	99.12
9:22:21 p. m.	441.05	99.62	9:23:04 p. m.	484.45	99.06
9:22:22 p. m.	442.08	99.62	9:23:05 p. m.	485.49	99.06
9:22:23 p. m.	443.12	99.62	9:23:06 p. m.	486.52	99.06
9:22:24 p. m.	444.15	99.56	9:23:07 p. m.	487.55	99.06
9:22:25 p. m.	445.18	99.56	9:23:09 p. m.	488.59	99.06
9:22:26 p. m.	446.21	99.62	9:23:10 p. m.	489.63	99.12
9:22:27 p. m.	447.25	99.62	9:23:11 p. m.	490.66	99.06
9:22:28 p. m.	448.28	99.62	9:23:12 p. m.	491.70	99.06
9:22:29 p. m.	449.31	99.62	9:23:13 p. m.	492.73	99.12
9:22:30 p. m.	450.34	99.56	9:23:14 p. m.	493.77	99.06
9:22:31 p. m.	451.38	99.56	9:23:15 p. m.	494.79	99.06
9:22:32 p. m.	452.41	99.56	9:23:16 p. m.	495.83	99.06
9:22:33 p. m.	453.45	99.56	9:23:17 p. m.	496.86	99.06
9:22:34 p. m.	454.48	99.50	9:23:18 p. m.	497.90	99.00
9:22:35 p. m.	455.52	99.50	9:23:19 p. m.	498.92	99.06
9:22:36 p. m.	456.55	99.44	9:23:20 p. m.	499.96	99.00
9:22:38 p. m.	457.59	99.50	9:23:21 p. m.	500.99	99.00

^bDatos tomados el 24 de junio de 2021.

Tabla B.3

Tercer grupo de datos experimentales de temperatura vs tiempo^c

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
10:15:00 a. m.	0.00	19.87	10:15:49 a. m.	48.44	24.56
10:15:01 a. m.	1.00	19.87	10:15:50 a. m.	49.44	24.81
10:15:02 a. m.	2.02	19.87	10:15:51 a. m.	50.46	25.00
10:15:03 a. m.	3.02	19.87	10:15:52 a. m.	51.46	25.25
10:15:04 a. m.	4.03	19.81	10:15:53 a. m.	52.48	25.44
10:15:05 a. m.	5.03	19.81	10:15:54 a. m.	53.49	25.69
10:15:06 a. m.	6.05	19.87	10:15:55 a. m.	54.49	25.94
10:15:07 a. m.	7.06	19.87	10:15:56 a. m.	55.51	26.12
10:15:08 a. m.	8.06	19.81	10:15:57 a. m.	56.51	26.31
10:15:09 a. m.	9.08	19.87	10:15:58 a. m.	57.52	26.50
10:15:10 a. m.	10.08	19.87	10:15:59 a. m.	58.52	26.75
10:15:11 a. m.	11.09	19.87	10:16:00 a. m.	59.54	26.94
10:15:12 a. m.	12.11	19.87	10:16:01 a. m.	60.56	27.12
10:15:13 a. m.	13.11	19.87	10:16:02 a. m.	61.56	27.37
10:15:14 a. m.	14.13	19.81	10:16:03 a. m.	62.57	27.62
10:15:15 a. m.	15.14	19.87	10:16:04 a. m.	63.57	27.81
10:15:16 a. m.	16.14	19.87	10:16:05 a. m.	64.59	28.06
10:15:17 a. m.	17.16	19.81	10:16:06 a. m.	65.61	28.31
10:15:18 a. m.	18.16	19.87	10:16:07 a. m.	66.61	28.56
10:15:19 a. m.	19.17	19.81	10:16:08 a. m.	67.62	28.75
10:15:20 a. m.	20.18	19.87	10:16:09 a. m.	68.62	29.00
10:15:21 a. m.	21.18	19.81	10:16:10 a. m.	69.64	29.19
10:15:22 a. m.	22.20	19.87	10:16:11 a. m.	70.66	29.37
10:15:23 a. m.	23.20	19.87	10:16:12 a. m.	71.66	29.56
10:15:24 a. m.	24.21	19.87	10:16:13 a. m.	72.68	29.75
10:15:25 a. m.	25.22	19.94	10:16:14 a. m.	73.68	29.94
10:15:26 a. m.	26.24	20.06	10:16:15 a. m.	74.69	30.12
10:15:27 a. m.	27.25	20.25	10:16:16 a. m.	75.71	30.31
10:15:28 a. m.	28.25	20.50	10:16:17 a. m.	76.71	30.56
10:15:30 a. m.	29.26	20.69	10:16:18 a. m.	77.72	30.81
10:15:31 a. m.	30.28	20.81	10:16:19 a. m.	78.73	30.94
10:15:32 a. m.	31.28	21.00	10:16:20 a. m.	79.73	31.19
10:15:33 a. m.	32.29	21.12	10:16:21 a. m.	80.75	31.44
10:15:34 a. m.	33.29	21.37	10:16:22 a. m.	81.75	31.62
10:15:35 a. m.	34.31	21.50	10:16:23 a. m.	82.77	31.87
10:15:36 a. m.	35.32	21.69	10:16:24 a. m.	83.78	32.13
10:15:37 a. m.	36.32	21.81	10:16:25 a. m.	84.79	32.31
10:15:38 a. m.	37.34	22.00	10:16:26 a. m.	85.80	32.56
10:15:39 a. m.	38.34	22.19	10:16:27 a. m.	86.81	32.75
10:15:40 a. m.	39.36	22.37	10:16:28 a. m.	87.82	32.94
10:15:41 a. m.	40.37	22.56	10:16:29 a. m.	88.83	33.19
10:15:42 a. m.	41.37	22.81	10:16:30 a. m.	89.84	33.31
10:15:43 a. m.	42.37	23.00	10:16:31 a. m.	90.85	33.56
10:15:44 a. m.	43.39	23.25	10:16:32 a. m.	91.86	33.75
10:15:45 a. m.	44.39	23.50	10:16:33 a. m.	92.87	33.94
10:15:46 a. m.	45.41	23.81	10:16:34 a. m.	93.87	34.19
10:15:47 a. m.	46.41	24.06	10:16:35 a. m.	94.89	34.38
10:15:48 a. m.	47.43	24.31	10:16:36 a. m.	95.90	34.63

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
10:16:37 a. m.	96.91	34.81	10:17:30 a. m.	149.52	45.38
10:16:38 a. m.	97.93	35.00	10:17:31 a. m.	150.52	45.56
10:16:39 a. m.	98.94	35.19	10:17:32 a. m.	151.54	45.75
10:16:40 a. m.	99.95	35.38	10:17:33 a. m.	152.55	46.00
10:16:41 a. m.	100.95	35.50	10:17:34 a. m.	153.57	46.25
10:16:42 a. m.	101.96	35.69	10:17:35 a. m.	154.58	46.44
10:16:43 a. m.	102.98	35.88	10:17:36 a. m.	155.60	46.69
10:16:44 a. m.	103.98	36.06	10:17:37 a. m.	156.61	46.88
10:16:45 a. m.	105.00	36.31	10:17:38 a. m.	157.62	47.06
10:16:46 a. m.	106.00	36.50	10:17:39 a. m.	158.62	47.25
10:16:47 a. m.	107.02	36.69	10:17:40 a. m.	159.64	47.50
10:16:48 a. m.	108.03	36.94	10:17:41 a. m.	160.65	47.75
10:16:49 a. m.	109.04	37.13	10:17:42 a. m.	161.67	47.94
10:16:50 a. m.	110.05	37.31	10:17:43 a. m.	162.69	48.19
10:16:51 a. m.	111.07	37.50	10:17:44 a. m.	163.70	48.44
10:16:52 a. m.	112.07	37.69	10:17:45 a. m.	164.72	48.63
10:16:53 a. m.	113.08	37.94	10:17:46 a. m.	165.72	48.81
10:16:54 a. m.	114.09	38.13	10:17:47 a. m.	166.73	49.06
10:16:55 a. m.	115.11	38.38	10:17:48 a. m.	167.75	49.25
10:16:56 a. m.	116.12	38.56	10:17:49 a. m.	168.77	49.44
10:16:57 a. m.	117.13	38.81	10:17:50 a. m.	169.79	49.63
10:16:58 a. m.	118.14	39.00	10:17:51 a. m.	170.80	49.88
10:16:59 a. m.	119.15	39.25	10:17:52 a. m.	171.80	50.13
10:17:00 a. m.	120.17	39.44	10:17:53 a. m.	172.82	50.31
10:17:01 a. m.	121.17	39.63	10:17:54 a. m.	173.84	50.56
10:17:02 a. m.	122.19	39.81	10:17:55 a. m.	174.85	50.75
10:17:03 a. m.	123.20	40.00	10:17:56 a. m.	175.86	51.00
10:17:04 a. m.	124.21	40.19	10:17:57 a. m.	176.88	51.19
10:17:05 a. m.	125.22	40.44	10:17:58 a. m.	177.90	51.44
10:17:06 a. m.	126.24	40.63	10:17:59 a. m.	178.91	51.63
10:17:07 a. m.	127.24	40.88	10:18:00 a. m.	179.92	51.88
10:17:09 a. m.	128.25	41.06	10:18:01 a. m.	180.94	52.06
10:17:10 a. m.	129.27	41.25	10:18:02 a. m.	181.95	52.25
10:17:11 a. m.	130.27	41.50	10:18:03 a. m.	182.97	52.44
10:17:12 a. m.	131.29	41.63	10:18:04 a. m.	183.98	52.69
10:17:13 a. m.	132.31	41.88	10:18:05 a. m.	185.00	52.88
10:17:14 a. m.	133.32	42.13	10:18:06 a. m.	186.02	53.13
10:17:15 a. m.	134.32	42.31	10:18:07 a. m.	187.02	53.31
10:17:16 a. m.	135.34	42.50	10:18:08 a. m.	188.04	53.50
10:17:17 a. m.	136.36	42.69	10:18:09 a. m.	189.06	53.75
10:17:18 a. m.	137.37	42.88	10:18:10 a. m.	190.19	53.94
10:17:19 a. m.	138.38	43.19	10:18:11 a. m.	191.08	54.13
10:17:20 a. m.	139.39	43.38	10:18:12 a. m.	192.10	54.31
10:17:21 a. m.	140.39	43.56	10:18:13 a. m.	193.11	54.56
10:17:22 a. m.	141.41	43.75	10:18:14 a. m.	194.13	54.75
10:17:23 a. m.	142.43	43.94	10:18:15 a. m.	195.14	54.94
10:17:24 a. m.	143.45	44.19	10:18:16 a. m.	196.16	55.13
10:17:25 a. m.	144.45	44.38	10:18:17 a. m.	197.17	55.31
10:17:26 a. m.	145.46	44.56	10:18:18 a. m.	198.20	55.56
10:17:27 a. m.	146.48	44.75	10:18:19 a. m.	199.21	55.75
10:17:28 a. m.	147.49	44.94	10:18:20 a. m.	200.23	56.00
10:17:29 a. m.	148.51	45.13	10:18:21 a. m.	201.24	56.19

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
10:18:23 a. m.	202.26	56.44	10:19:15 a. m.	255.17	67.50
10:18:24 a. m.	203.27	56.69	10:19:16 a. m.	256.19	67.69
10:18:25 a. m.	204.29	56.88	10:19:17 a. m.	257.22	67.87
10:18:26 a. m.	205.31	57.13	10:19:18 a. m.	258.24	68.12
10:18:27 a. m.	206.32	57.25	10:19:19 a. m.	259.26	68.31
10:18:28 a. m.	207.34	57.50	10:19:21 a. m.	260.27	68.56
10:18:29 a. m.	208.36	57.75	10:19:22 a. m.	261.30	68.75
10:18:30 a. m.	209.37	57.94	10:19:23 a. m.	262.32	69.00
10:18:31 a. m.	210.39	58.19	10:19:24 a. m.	263.33	69.19
10:18:32 a. m.	211.41	58.38	10:19:25 a. m.	264.36	69.44
10:18:33 a. m.	212.42	58.56	10:19:26 a. m.	265.38	69.69
10:18:34 a. m.	213.44	58.81	10:19:27 a. m.	266.39	69.87
10:18:35 a. m.	214.45	59.06	10:19:28 a. m.	267.42	70.12
10:18:36 a. m.	215.47	59.31	10:19:29 a. m.	268.43	70.31
10:18:37 a. m.	216.48	59.50	10:19:30 a. m.	269.46	70.56
10:18:38 a. m.	217.49	59.69	10:19:31 a. m.	270.48	70.75
10:18:39 a. m.	218.51	59.94	10:19:32 a. m.	271.51	71.00
10:18:40 a. m.	219.54	60.13	10:19:33 a. m.	272.51	71.19
10:18:41 a. m.	220.55	60.38	10:19:34 a. m.	273.54	71.44
10:18:42 a. m.	221.57	60.56	10:19:35 a. m.	274.56	71.62
10:18:43 a. m.	222.59	60.75	10:19:36 a. m.	275.59	71.81
10:18:44 a. m.	223.60	61.00	10:19:37 a. m.	276.61	72.06
10:18:45 a. m.	224.62	61.25	10:19:38 a. m.	277.63	72.25
10:18:46 a. m.	225.63	61.44	10:19:39 a. m.	278.64	72.44
10:18:47 a. m.	226.65	61.69	10:19:40 a. m.	279.67	72.69
10:18:48 a. m.	227.66	61.88	10:19:41 a. m.	280.69	72.81
10:18:49 a. m.	228.70	62.06	10:19:42 a. m.	281.71	73.06
10:18:50 a. m.	229.71	62.31	10:19:43 a. m.	282.73	73.25
10:18:51 a. m.	230.73	62.50	10:19:44 a. m.	283.76	73.50
10:18:52 a. m.	231.74	62.75	10:19:45 a. m.	284.78	73.69
10:18:53 a. m.	232.76	62.88	10:19:46 a. m.	285.79	73.87
10:18:54 a. m.	233.77	63.13	10:19:47 a. m.	286.82	74.06
10:18:55 a. m.	234.80	63.31	10:19:48 a. m.	287.84	74.31
10:18:56 a. m.	235.82	63.56	10:19:49 a. m.	288.87	74.50
10:18:57 a. m.	236.84	63.75	10:19:50 a. m.	289.89	74.75
10:18:58 a. m.	237.85	64.00	10:19:51 a. m.	290.92	75.00
10:18:59 a. m.	238.87	64.19	10:19:52 a. m.	291.94	75.19
10:19:00 a. m.	239.88	64.37	10:19:53 a. m.	292.95	75.44
10:19:01 a. m.	240.91	64.62	10:19:54 a. m.	293.98	75.62
10:19:02 a. m.	241.93	64.81	10:19:55 a. m.	295.00	75.81
10:19:03 a. m.	242.95	65.00	10:19:56 a. m.	296.03	76.00
10:19:04 a. m.	243.96	65.25	10:19:57 a. m.	297.05	76.19
10:19:05 a. m.	244.98	65.44	10:19:58 a. m.	298.08	76.44
10:19:06 a. m.	246.01	65.62	10:19:59 a. m.	299.09	76.62
10:19:07 a. m.	247.02	65.81	10:20:00 a. m.	300.13	76.87
10:19:08 a. m.	248.04	66.06	10:20:01 a. m.	301.14	77.12
10:19:09 a. m.	249.05	66.25	10:20:02 a. m.	302.17	77.37
10:19:10 a. m.	250.09	66.50	10:20:03 a. m.	303.19	77.56
10:19:11 a. m.	251.10	66.69	10:20:04 a. m.	304.22	77.81
10:19:12 a. m.	252.12	66.87	10:20:05 a. m.	305.24	78.00
10:19:13 a. m.	253.13	67.06	10:20:07 a. m.	306.25	78.25
10:19:14 a. m.	254.16	67.31	10:20:08 a. m.	307.29	78.44

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
10:20:09 a. m.	308.31	78.69	10:21:02 a. m.	361.68	89.81
10:20:10 a. m.	309.33	78.87	10:21:03 a. m.	362.71	90.06
10:20:11 a. m.	310.36	79.12	10:21:04 a. m.	363.74	90.25
10:20:12 a. m.	311.39	79.31	10:21:05 a. m.	364.77	90.44
10:20:13 a. m.	312.41	79.50	10:21:06 a. m.	365.80	90.62
10:20:14 a. m.	313.43	79.69	10:21:07 a. m.	366.84	90.81
10:20:15 a. m.	314.46	79.94	10:21:08 a. m.	367.87	91.00
10:20:16 a. m.	315.48	80.12	10:21:09 a. m.	368.90	91.25
10:20:17 a. m.	316.50	80.31	10:21:10 a. m.	369.93	91.50
10:20:18 a. m.	317.53	80.50	10:21:11 a. m.	370.95	91.69
10:20:19 a. m.	318.56	80.75	10:21:12 a. m.	371.98	91.87
10:20:20 a. m.	319.58	80.94	10:21:13 a. m.	373.01	92.06
10:20:21 a. m.	320.61	81.19	10:21:14 a. m.	374.04	92.31
10:20:22 a. m.	321.63	81.37	10:21:15 a. m.	375.07	92.56
10:20:23 a. m.	322.66	81.56	10:21:16 a. m.	376.10	92.81
10:20:24 a. m.	323.67	81.81	10:21:17 a. m.	377.14	93.06
10:20:25 a. m.	324.70	82.00	10:21:18 a. m.	378.16	93.25
10:20:26 a. m.	325.73	82.19	10:21:19 a. m.	379.19	93.50
10:20:27 a. m.	326.75	82.37	10:21:20 a. m.	380.22	93.69
10:20:28 a. m.	327.79	82.62	10:21:22 a. m.	381.25	93.94
10:20:29 a. m.	328.80	82.81	10:21:23 a. m.	382.28	94.19
10:20:30 a. m.	329.83	83.00	10:21:24 a. m.	383.31	94.37
10:20:31 a. m.	330.86	83.19	10:21:25 a. m.	384.34	94.56
10:20:32 a. m.	331.89	83.44	10:21:26 a. m.	385.38	94.87
10:20:33 a. m.	332.91	83.62	10:21:27 a. m.	386.41	95.12
10:20:34 a. m.	333.94	83.81	10:21:28 a. m.	387.44	95.31
10:20:35 a. m.	334.96	84.06	10:21:29 a. m.	388.47	95.56
10:20:36 a. m.	335.99	84.31	10:21:30 a. m.	389.50	95.75
10:20:37 a. m.	337.02	84.50	10:21:31 a. m.	390.53	95.94
10:20:38 a. m.	338.05	84.81	10:21:32 a. m.	391.56	96.19
10:20:39 a. m.	339.07	85.00	10:21:33 a. m.	392.59	96.37
10:20:40 a. m.	340.10	85.19	10:21:34 a. m.	393.64	96.56
10:20:41 a. m.	341.13	85.37	10:21:35 a. m.	394.66	96.81
10:20:42 a. m.	342.14	85.62	10:21:36 a. m.	395.70	97.00
10:20:43 a. m.	343.18	85.81	10:21:37 a. m.	396.73	97.19
10:20:44 a. m.	344.21	86.00	10:21:38 a. m.	397.77	97.37
10:20:45 a. m.	345.23	86.25	10:21:39 a. m.	398.80	97.56
10:20:47 a. m.	346.26	86.44	10:21:40 a. m.	399.84	97.69
10:20:48 a. m.	347.30	86.69	10:21:41 a. m.	400.87	97.87
10:20:49 a. m.	348.31	86.87	10:21:42 a. m.	401.90	98.06
10:20:50 a. m.	349.34	87.12	10:21:43 a. m.	402.93	98.19
10:20:51 a. m.	350.38	87.37	10:21:44 a. m.	403.95	98.31
10:20:52 a. m.	351.39	87.56	10:21:45 a. m.	404.99	98.50
10:20:53 a. m.	352.42	87.81	10:21:46 a. m.	406.03	98.56
10:20:54 a. m.	353.45	88.06	10:21:47 a. m.	407.06	98.69
10:20:55 a. m.	354.48	88.25	10:21:48 a. m.	408.09	98.81
10:20:56 a. m.	355.50	88.50	10:21:49 a. m.	409.13	98.87
10:20:57 a. m.	356.55	88.75	10:21:50 a. m.	410.16	98.94
10:20:58 a. m.	357.57	88.94	10:21:51 a. m.	411.19	99.00
10:20:59 a. m.	358.60	89.19	10:21:52 a. m.	412.23	99.12
10:21:00 a. m.	359.63	89.44	10:21:54 a. m.	413.27	99.12
10:21:01 a. m.	360.66	89.62	10:21:55 a. m.	414.30	99.19

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
10:21:56 a. m.	415.33	99.25	10:22:39 a. m.	458.74	99.44
10:21:57 a. m.	416.37	99.25	10:22:40 a. m.	459.77	99.44
10:21:58 a. m.	417.39	99.31	10:22:41 a. m.	460.80	99.44
10:21:59 a. m.	418.43	99.37	10:22:42 a. m.	461.84	99.37
10:22:00 a. m.	419.47	99.37	10:22:43 a. m.	462.88	99.44
10:22:01 a. m.	420.50	99.44	10:22:44 a. m.	463.91	99.37
10:22:02 a. m.	421.54	99.44	10:22:45 a. m.	464.95	99.37
10:22:03 a. m.	422.57	99.50	10:22:46 a. m.	465.98	99.37
10:22:04 a. m.	423.60	99.50	10:22:47 a. m.	467.02	99.31
10:22:05 a. m.	424.63	99.50	10:22:48 a. m.	468.04	99.31
10:22:06 a. m.	425.68	99.56	10:22:49 a. m.	469.08	99.31
10:22:07 a. m.	426.71	99.56	10:22:50 a. m.	470.11	99.31
10:22:08 a. m.	427.74	99.56	10:22:51 a. m.	471.14	99.25
10:22:09 a. m.	428.77	99.56	10:22:52 a. m.	472.18	99.25
10:22:10 a. m.	429.80	99.56	10:22:53 a. m.	473.21	99.25
10:22:11 a. m.	430.83	99.62	10:22:54 a. m.	474.25	99.25
10:22:12 a. m.	431.86	99.62	10:22:56 a. m.	475.28	99.25
10:22:13 a. m.	432.91	99.69	10:22:57 a. m.	476.31	99.25
10:22:14 a. m.	433.94	99.69	10:22:58 a. m.	477.36	99.19
10:22:15 a. m.	434.97	99.69	10:22:59 a. m.	478.39	99.19
10:22:16 a. m.	436.00	99.69	10:23:00 a. m.	479.42	99.19
10:22:17 a. m.	437.04	99.69	10:23:01 a. m.	480.45	99.19
10:22:18 a. m.	438.07	99.69	10:23:02 a. m.	481.48	99.19
10:22:19 a. m.	439.10	99.69	10:23:03 a. m.	482.52	99.12
10:22:20 a. m.	440.14	99.69	10:23:04 a. m.	483.54	99.12
10:22:21 a. m.	441.17	99.69	10:23:05 a. m.	484.59	99.12
10:22:22 a. m.	442.20	99.62	10:23:06 a. m.	485.61	99.12
10:22:23 a. m.	443.23	99.62	10:23:07 a. m.	486.65	99.06
10:22:25 a. m.	444.28	99.62	10:23:08 a. m.	487.68	99.06
10:22:26 a. m.	445.31	99.62	10:23:09 a. m.	488.72	99.06
10:22:27 a. m.	446.34	99.62	10:23:10 a. m.	489.75	99.06
10:22:28 a. m.	447.38	99.62	10:23:11 a. m.	490.79	99.06
10:22:29 a. m.	448.41	99.62	10:23:12 a. m.	491.82	99.06
10:22:30 a. m.	449.44	99.62	10:23:13 a. m.	492.85	99.06
10:22:31 a. m.	450.48	99.62	10:23:14 a. m.	493.88	99.06
10:22:32 a. m.	451.51	99.62	10:23:15 a. m.	494.93	99.06
10:22:33 a. m.	452.54	99.62	10:23:16 a. m.	495.96	99.00
10:22:34 a. m.	453.57	99.56	10:23:17 a. m.	496.99	99.00
10:22:35 a. m.	454.62	99.56	10:23:18 a. m.	498.02	99.00
10:22:36 a. m.	455.65	99.50	10:23:19 a. m.	499.05	99.00
10:22:37 a. m.	456.68	99.50	10:23:20 a. m.	500.08	98.94
10:22:38 a. m.	457.71	99.50	10:23:21 a. m.	501.11	98.94

^cDatos tomados el 25 de junio de 2021.

Tabla B.4

Cuarto grupo de datos experimentales de temperatura vs tiempo^d

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
3:15:00 p. m.	0.03	19.37	3:15:51 p. m.	50.48	24.44
3:15:01 p. m.	1.03	19.37	3:15:52 p. m.	51.50	24.62
3:15:02 p. m.	2.05	19.37	3:15:53 p. m.	52.50	24.81
3:15:03 p. m.	3.06	19.37	3:15:54 p. m.	53.52	25.00
3:15:04 p. m.	4.06	19.37	3:15:55 p. m.	54.52	25.19
3:15:05 p. m.	5.08	19.37	3:15:56 p. m.	55.54	25.31
3:15:06 p. m.	6.09	19.37	3:15:57 p. m.	56.55	25.56
3:15:07 p. m.	7.09	19.37	3:15:58 p. m.	57.55	25.75
3:15:08 p. m.	8.11	19.37	3:15:59 p. m.	58.78	26.00
3:15:09 p. m.	9.11	19.37	3:16:00 p. m.	59.57	26.25
3:15:10 p. m.	10.12	19.37	3:16:01 p. m.	60.59	26.50
3:15:11 p. m.	11.14	19.37	3:16:02 p. m.	61.59	26.75
3:15:12 p. m.	12.14	19.37	3:16:03 p. m.	62.61	26.94
3:15:13 p. m.	13.15	19.37	3:16:04 p. m.	63.61	27.25
3:15:14 p. m.	14.15	19.37	3:16:05 p. m.	64.62	27.50
3:15:15 p. m.	15.16	19.31	3:16:06 p. m.	65.64	27.75
3:15:16 p. m.	16.18	19.37	3:16:07 p. m.	66.64	28.00
3:15:17 p. m.	17.18	19.37	3:16:08 p. m.	67.72	28.25
3:15:18 p. m.	18.20	19.37	3:16:09 p. m.	68.66	28.44
3:15:19 p. m.	19.20	19.37	3:16:10 p. m.	69.67	28.62
3:15:20 p. m.	20.21	19.37	3:16:11 p. m.	70.69	28.87
3:15:21 p. m.	21.21	19.37	3:16:12 p. m.	71.69	29.06
3:15:22 p. m.	22.23	19.37	3:16:13 p. m.	72.70	29.25
3:15:23 p. m.	23.25	19.37	3:16:14 p. m.	73.70	29.50
3:15:26 p. m.	26.26	19.69	3:16:15 p. m.	74.72	29.75
3:15:27 p. m.	27.28	19.87	3:16:16 p. m.	75.73	30.00
3:15:28 p. m.	28.29	20.06	3:16:17 p. m.	76.75	30.25
3:15:29 p. m.	29.29	20.25	3:16:18 p. m.	77.75	30.44
3:15:30 p. m.	30.30	20.44	3:16:19 p. m.	78.77	30.62
3:15:31 p. m.	31.32	20.62	3:16:20 p. m.	79.77	30.87
3:15:33 p. m.	32.32	20.81	3:16:21 p. m.	80.79	31.06
3:15:34 p. m.	33.33	21.00	3:16:22 p. m.	81.79	31.25
3:15:35 p. m.	34.35	21.19	3:16:23 p. m.	82.80	31.50
3:15:36 p. m.	35.35	21.37	3:16:24 p. m.	83.81	31.69
3:15:37 p. m.	36.37	21.56	3:16:25 p. m.	84.82	31.87
3:15:38 p. m.	37.37	21.81	3:16:26 p. m.	85.84	32.06
3:15:39 p. m.	38.38	21.94	3:16:27 p. m.	86.84	32.31
3:15:40 p. m.	39.38	22.19	3:16:28 p. m.	87.84	32.44
3:15:41 p. m.	40.40	22.37	3:16:29 p. m.	88.86	32.63
3:15:42 p. m.	41.40	22.56	3:16:30 p. m.	89.88	32.88
3:15:43 p. m.	42.41	22.81	3:16:31 p. m.	90.89	33.06
3:15:44 p. m.	43.43	22.94	3:16:32 p. m.	91.89	33.25
3:15:45 p. m.	44.44	23.19	3:16:33 p. m.	92.91	33.44
3:15:46 p. m.	45.45	23.44	3:16:34 p. m.	93.91	33.63
3:15:47 p. m.	46.45	23.62	3:16:35 p. m.	94.92	33.88
3:15:48 p. m.	47.46	23.81	3:16:36 p. m.	96.29	34.13
3:15:49 p. m.	48.46	24.06	3:16:37 p. m.	97.41	34.31
3:15:50 p. m.	49.48	24.19	3:16:38 p. m.	98.29	34.50

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
3:16:39 p. m.	98.96	34.69	3:17:32 p. m.	151.79	45.63
3:16:40 p. m.	99.98	34.94	3:17:33 p. m.	152.59	45.88
3:16:41 p. m.	100.98	35.13	3:17:34 p. m.	153.75	46.13
3:16:42 p. m.	102.00	35.38	3:17:35 p. m.	154.73	46.38
3:16:43 p. m.	103.01	35.56	3:17:36 p. m.	155.62	46.56
3:16:44 p. m.	104.02	35.75	3:17:37 p. m.	156.64	46.75
3:16:45 p. m.	105.02	36.00	3:17:38 p. m.	157.65	46.94
3:16:46 p. m.	106.04	36.19	3:17:39 p. m.	158.66	47.13
3:16:47 p. m.	107.05	36.44	3:17:40 p. m.	159.68	47.31
3:16:48 p. m.	108.13	36.63	3:17:41 p. m.	160.70	47.56
3:16:49 p. m.	109.07	36.88	3:17:42 p. m.	161.70	47.75
3:16:50 p. m.	110.09	37.00	3:17:43 p. m.	162.71	47.94
3:16:51 p. m.	111.10	37.19	3:17:44 p. m.	163.73	48.13
3:16:53 p. m.	112.57	37.44	3:17:45 p. m.	164.75	48.38
3:16:53 p. m.	113.12	37.63	3:17:46 p. m.	165.77	48.56
3:16:54 p. m.	114.12	37.94	3:17:47 p. m.	166.77	48.81
3:16:55 p. m.	115.14	38.13	3:17:48 p. m.	167.78	49.06
3:16:56 p. m.	116.15	38.38	3:17:49 p. m.	168.80	49.25
3:16:57 p. m.	117.15	38.63	3:17:50 p. m.	169.81	49.44
3:16:58 p. m.	118.17	38.88	3:17:51 p. m.	170.83	49.63
3:16:59 p. m.	119.18	39.13	3:17:52 p. m.	171.84	49.81
3:17:00 p. m.	120.20	39.31	3:17:53 p. m.	172.86	50.00
3:17:01 p. m.	121.20	39.50	3:17:54 p. m.	173.87	50.19
3:17:02 p. m.	122.21	39.75	3:17:55 p. m.	174.88	50.44
3:17:03 p. m.	123.23	39.94	3:17:56 p. m.	176.15	50.63
3:17:04 p. m.	124.25	40.13	3:17:57 p. m.	176.91	50.81
3:17:05 p. m.	125.25	40.25	3:17:58 p. m.	177.93	51.06
3:17:06 p. m.	126.27	40.44	3:17:59 p. m.	178.95	51.25
3:17:07 p. m.	127.27	40.63	3:18:00 p. m.	179.95	51.44
3:17:08 p. m.	128.29	40.81	3:18:01 p. m.	180.96	51.63
3:17:09 p. m.	129.30	41.00	3:18:02 p. m.	181.98	51.81
3:17:10 p. m.	130.30	41.19	3:18:03 p. m.	182.99	52.00
3:17:12 p. m.	131.32	41.44	3:18:04 p. m.	184.01	52.25
3:17:13 p. m.	132.33	41.63	3:18:05 p. m.	185.03	52.44
3:17:14 p. m.	133.35	41.88	3:18:06 p. m.	186.05	52.63
3:17:15 p. m.	134.35	42.06	3:18:07 p. m.	187.05	52.81
3:17:16 p. m.	135.38	42.25	3:18:08 p. m.	188.07	53.06
3:17:17 p. m.	136.39	42.50	3:18:09 p. m.	189.08	53.31
3:17:18 p. m.	137.40	42.69	3:18:10 p. m.	190.10	53.56
3:17:19 p. m.	138.41	42.94	3:18:11 p. m.	191.11	53.75
3:17:20 p. m.	139.43	43.19	3:18:12 p. m.	192.13	54.00
3:17:21 p. m.	140.44	43.38	3:18:13 p. m.	193.14	54.25
3:17:22 p. m.	141.50	43.63	3:18:14 p. m.	194.16	54.44
3:17:23 p. m.	142.46	43.88	3:18:15 p. m.	195.18	54.69
3:17:24 p. m.	143.48	44.06	3:18:16 p. m.	196.18	54.88
3:17:25 p. m.	144.48	44.31	3:18:17 p. m.	197.20	55.13
3:17:26 p. m.	145.50	44.50	3:18:18 p. m.	198.21	55.38
3:17:27 p. m.	146.51	44.75	3:18:19 p. m.	199.23	55.63
3:17:28 p. m.	147.53	44.94	3:18:20 p. m.	200.25	55.81
3:17:29 p. m.	148.54	45.06	3:18:21 p. m.	201.28	56.00
3:17:30 p. m.	149.54	45.25	3:18:22 p. m.	202.29	56.25
3:17:31 p. m.	150.56	45.44	3:18:23 p. m.	203.31	56.44

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
3:18:25 p. m.	204.32	56.69	3:19:17 p. m.	257.25	67.75
3:18:26 p. m.	205.34	56.88	3:19:18 p. m.	258.27	67.94
3:18:27 p. m.	206.35	57.13	3:19:19 p. m.	259.29	68.12
3:18:28 p. m.	207.37	57.38	3:19:20 p. m.	260.31	68.31
3:18:29 p. m.	208.39	57.56	3:19:22 p. m.	261.33	68.56
3:18:30 p. m.	209.41	57.75	3:19:23 p. m.	262.35	68.81
3:18:31 p. m.	210.42	57.94	3:19:24 p. m.	263.37	69.00
3:18:32 p. m.	211.43	58.13	3:19:25 p. m.	264.39	69.19
3:18:33 p. m.	212.45	58.38	3:19:26 p. m.	265.40	69.44
3:18:34 p. m.	213.45	58.56	3:19:27 p. m.	266.42	69.69
3:18:35 p. m.	214.49	58.75	3:19:28 p. m.	267.45	69.87
3:18:36 p. m.	215.50	59.00	3:19:29 p. m.	268.46	70.12
3:18:37 p. m.	216.51	59.19	3:19:30 p. m.	269.48	70.31
3:18:38 p. m.	217.54	59.44	3:19:31 p. m.	270.51	70.56
3:18:39 p. m.	218.66	59.63	3:19:32 p. m.	271.53	70.81
3:18:40 p. m.	219.56	59.81	3:19:33 p. m.	272.54	71.00
3:18:41 p. m.	220.59	60.06	3:19:34 p. m.	273.56	71.19
3:18:42 p. m.	221.59	60.31	3:19:35 p. m.	274.59	71.37
3:18:43 p. m.	222.62	60.50	3:19:36 p. m.	275.61	71.56
3:18:44 p. m.	223.63	60.69	3:19:37 p. m.	276.63	71.81
3:18:45 p. m.	224.65	60.94	3:19:38 p. m.	277.65	72.06
3:18:46 p. m.	225.66	61.13	3:19:39 p. m.	278.68	72.25
3:18:47 p. m.	226.68	61.31	3:19:40 p. m.	279.70	72.50
3:18:48 p. m.	227.70	61.56	3:19:41 p. m.	280.71	72.75
3:18:49 p. m.	228.71	61.75	3:19:42 p. m.	281.74	72.94
3:18:50 p. m.	229.75	62.00	3:19:43 p. m.	282.84	73.12
3:18:51 p. m.	230.75	62.19	3:19:44 p. m.	283.77	73.31
3:18:52 p. m.	231.77	62.38	3:19:45 p. m.	284.81	73.50
3:18:53 p. m.	232.79	62.56	3:19:46 p. m.	285.82	73.75
3:18:54 p. m.	233.82	62.81	3:19:47 p. m.	286.84	73.94
3:18:55 p. m.	234.83	63.00	3:19:48 p. m.	287.87	74.12
3:18:56 p. m.	235.85	63.25	3:19:49 p. m.	288.88	74.37
3:18:57 p. m.	236.86	63.50	3:19:50 p. m.	289.91	74.56
3:18:58 p. m.	237.88	63.69	3:19:51 p. m.	290.93	74.75
3:18:59 p. m.	238.89	63.94	3:19:52 p. m.	291.95	75.00
3:19:00 p. m.	239.92	64.12	3:19:53 p. m.	292.98	75.19
3:19:01 p. m.	240.93	64.37	3:19:54 p. m.	294.00	75.44
3:19:02 p. m.	241.95	64.62	3:19:55 p. m.	295.03	75.62
3:19:03 p. m.	242.96	64.81	3:19:56 p. m.	296.04	75.81
3:19:04 p. m.	244.00	65.00	3:19:57 p. m.	297.07	76.06
3:19:05 p. m.	245.02	65.19	3:19:58 p. m.	298.09	76.25
3:19:06 p. m.	246.02	65.37	3:19:59 p. m.	299.12	76.44
3:19:07 p. m.	247.05	65.62	3:20:00 p. m.	300.14	76.69
3:19:08 p. m.	248.06	65.87	3:20:01 p. m.	301.17	76.94
3:19:09 p. m.	249.08	66.06	3:20:02 p. m.	302.19	77.12
3:19:10 p. m.	250.11	66.31	3:20:03 p. m.	303.21	77.37
3:19:11 p. m.	251.13	66.50	3:20:04 p. m.	304.23	77.56
3:19:12 p. m.	252.14	66.69	3:20:05 p. m.	305.27	77.75
3:19:13 p. m.	253.16	66.94	3:20:06 p. m.	306.28	78.00
3:19:14 p. m.	254.17	67.12	3:20:07 p. m.	307.30	78.19
3:19:15 p. m.	255.21	67.31	3:20:09 p. m.	308.33	78.44
3:19:16 p. m.	256.23	67.50	3:20:10 p. m.	309.36	78.62

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
3:20:11 p. m.	310.38	78.87	3:21:04 p. m.	363.75	90.25
3:20:12 p. m.	311.41	79.06	3:21:05 p. m.	364.79	90.44
3:20:13 p. m.	312.43	79.31	3:21:06 p. m.	365.82	90.69
3:20:14 p. m.	313.46	79.50	3:21:07 p. m.	366.84	90.94
3:20:15 p. m.	314.47	79.75	3:21:08 p. m.	367.88	91.12
3:20:16 p. m.	315.50	79.94	3:21:09 p. m.	368.91	91.37
3:20:17 p. m.	316.52	80.19	3:21:10 p. m.	369.94	91.62
3:20:18 p. m.	317.57	80.37	3:21:11 p. m.	370.97	91.81
3:20:19 p. m.	318.58	80.56	3:21:12 p. m.	372.00	92.06
3:20:20 p. m.	319.60	80.81	3:21:13 p. m.	373.03	92.31
3:20:21 p. m.	320.63	81.00	3:21:14 p. m.	374.06	92.56
3:20:22 p. m.	321.66	81.25	3:21:15 p. m.	375.09	92.81
3:20:23 p. m.	322.67	81.50	3:21:16 p. m.	376.12	93.00
3:20:24 p. m.	323.70	81.62	3:21:17 p. m.	377.15	93.25
3:20:25 p. m.	324.73	81.87	3:21:18 p. m.	378.19	93.50
3:20:26 p. m.	325.75	82.12	3:21:19 p. m.	379.22	93.75
3:20:27 p. m.	326.79	82.31	3:21:20 p. m.	380.25	93.94
3:20:28 p. m.	327.80	82.50	3:21:21 p. m.	381.28	94.19
3:20:29 p. m.	328.83	82.69	3:21:22 p. m.	382.31	94.44
3:20:30 p. m.	329.85	82.94	3:21:24 p. m.	383.34	94.69
3:20:31 p. m.	330.88	83.12	3:21:25 p. m.	384.37	94.87
3:20:32 p. m.	331.91	83.31	3:21:26 p. m.	385.41	95.06
3:20:33 p. m.	332.93	83.56	3:21:27 p. m.	386.42	95.31
3:20:34 p. m.	333.96	83.81	3:21:28 p. m.	387.46	95.56
3:20:35 p. m.	334.99	84.00	3:21:29 p. m.	388.50	95.81
3:20:36 p. m.	336.02	84.25	3:21:30 p. m.	389.54	96.00
3:20:37 p. m.	337.04	84.44	3:21:31 p. m.	390.57	96.25
3:20:38 p. m.	338.07	84.69	3:21:32 p. m.	391.60	96.44
3:20:39 p. m.	339.09	84.94	3:21:33 p. m.	392.63	96.62
3:20:40 p. m.	340.13	85.12	3:21:34 p. m.	393.66	96.81
3:20:41 p. m.	341.14	85.37	3:21:35 p. m.	394.69	97.00
3:20:42 p. m.	342.17	85.56	3:21:36 p. m.	395.72	97.19
3:20:43 p. m.	343.21	85.75	3:21:37 p. m.	396.76	97.37
3:20:44 p. m.	344.22	86.00	3:21:38 p. m.	397.79	97.56
3:20:45 p. m.	345.25	86.19	3:21:39 p. m.	398.82	97.75
3:20:46 p. m.	346.29	86.37	3:21:40 p. m.	399.85	97.94
3:20:47 p. m.	347.32	86.62	3:21:41 p. m.	400.89	98.06
3:20:49 p. m.	348.35	86.87	3:21:42 p. m.	401.93	98.25
3:20:50 p. m.	349.38	87.06	3:21:43 p. m.	402.95	98.37
3:20:51 p. m.	350.39	87.31	3:21:44 p. m.	403.99	98.50
3:20:52 p. m.	351.42	87.50	3:21:45 p. m.	405.02	98.56
3:20:53 p. m.	352.45	87.75	3:21:46 p. m.	406.05	98.69
3:20:54 p. m.	353.48	87.87	3:21:47 p. m.	407.08	98.81
3:20:55 p. m.	354.50	88.12	3:21:48 p. m.	408.11	98.87
3:20:56 p. m.	355.53	88.37	3:21:49 p. m.	409.16	98.94
3:20:57 p. m.	356.56	88.62	3:21:50 p. m.	410.19	99.00
3:20:58 p. m.	357.59	88.87	3:21:51 p. m.	411.21	99.06
3:20:59 p. m.	358.62	89.12	3:21:52 p. m.	412.25	99.12
3:21:00 p. m.	359.64	89.31	3:21:53 p. m.	413.29	99.12
3:21:01 p. m.	360.67	89.50	3:21:55 p. m.	414.32	99.19
3:21:02 p. m.	361.71	89.81	3:21:56 p. m.	415.34	99.25
3:21:03 p. m.	362.74	90.00	3:21:57 p. m.	416.39	99.31

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
3:21:58 p. m.	417.42	99.31	3:22:41 p. m.	460.85	99.44
3:21:59 p. m.	418.46	99.37	3:22:42 p. m.	461.86	99.44
3:22:00 p. m.	419.48	99.37	3:22:43 p. m.	462.91	99.37
3:22:01 p. m.	420.52	99.37	3:22:44 p. m.	463.94	99.37
3:22:02 p. m.	421.55	99.37	3:22:45 p. m.	464.97	99.37
3:22:03 p. m.	422.59	99.44	3:22:46 p. m.	466.01	99.37
3:22:04 p. m.	423.62	99.44	3:22:47 p. m.	467.04	99.37
3:22:05 p. m.	424.65	99.44	3:22:48 p. m.	468.07	99.37
3:22:06 p. m.	425.70	99.50	3:22:49 p. m.	469.11	99.31
3:22:07 p. m.	426.72	99.44	3:22:50 p. m.	470.13	99.31
3:22:08 p. m.	427.75	99.50	3:22:51 p. m.	471.16	99.31
3:22:09 p. m.	428.80	99.50	3:22:52 p. m.	472.20	99.25
3:22:10 p. m.	429.83	99.50	3:22:53 p. m.	473.23	99.25
3:22:11 p. m.	430.86	99.50	3:22:54 p. m.	474.28	99.25
3:22:12 p. m.	431.89	99.56	3:22:55 p. m.	475.31	99.25
3:22:13 p. m.	432.93	99.56	3:22:57 p. m.	476.34	99.25
3:22:14 p. m.	433.96	99.56	3:22:58 p. m.	477.37	99.25
3:22:15 p. m.	435.00	99.56	3:22:59 p. m.	478.40	99.25
3:22:16 p. m.	436.03	99.56	3:23:00 p. m.	479.43	99.25
3:22:17 p. m.	437.06	99.56	3:23:01 p. m.	480.47	99.19
3:22:18 p. m.	438.09	99.56	3:23:02 p. m.	481.50	99.19
3:22:19 p. m.	439.13	99.56	3:23:03 p. m.	482.54	99.19
3:22:20 p. m.	440.16	99.56	3:23:04 p. m.	483.57	99.19
3:22:21 p. m.	441.19	99.56	3:23:05 p. m.	484.60	99.19
3:22:22 p. m.	442.22	99.56	3:23:06 p. m.	485.65	99.12
3:22:23 p. m.	443.25	99.50	3:23:07 p. m.	486.68	99.12
3:22:24 p. m.	444.30	99.50	3:23:08 p. m.	487.71	99.12
3:22:26 p. m.	445.33	99.56	3:23:09 p. m.	488.74	99.12
3:22:27 p. m.	446.36	99.50	3:23:10 p. m.	489.77	99.12
3:22:28 p. m.	447.39	99.50	3:23:11 p. m.	490.80	99.12
3:22:29 p. m.	448.43	99.50	3:23:12 p. m.	491.85	99.12
3:22:30 p. m.	449.47	99.44	3:23:13 p. m.	492.88	99.12
3:22:31 p. m.	450.50	99.44	3:23:14 p. m.	493.91	99.12
3:22:32 p. m.	451.54	99.44	3:23:15 p. m.	494.95	99.06
3:22:33 p. m.	452.57	99.44	3:23:16 p. m.	495.98	99.06
3:22:34 p. m.	453.60	99.44	3:23:17 p. m.	497.01	99.06
3:22:35 p. m.	454.64	99.44	3:23:18 p. m.	498.05	99.06
3:22:36 p. m.	455.67	99.44	3:23:19 p. m.	499.08	99.06
3:22:37 p. m.	456.70	99.44	3:23:20 p. m.	500.11	99.00
3:22:38 p. m.	457.73	99.37	3:23:21 p. m.	501.14	99.00
3:22:39 p. m.	458.77	99.37	3:23:22 p. m.	502.17	98.94
3:22:40 p. m.	459.80	99.37	3:23:23 p. m.	503.20	99.00

^dDatos tomados el 25 de junio de 2021.

Tabla B.5

Quinto grupo de datos experimentales de temperatura vs tiempo^e

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
4:30:01 p. m.	0.24	19.31	4:30:49 p. m.	48.67	24.31
4:30:02 p. m.	1.24	19.31	4:30:50 p. m.	49.68	24.56
4:30:03 p. m.	2.25	19.37	4:30:51 p. m.	50.70	24.75
4:30:04 p. m.	3.25	19.37	4:30:52 p. m.	51.70	24.94
4:30:05 p. m.	4.27	19.31	4:30:53 p. m.	52.71	25.12
4:30:06 p. m.	5.28	19.31	4:30:54 p. m.	53.71	25.37
4:30:07 p. m.	6.28	19.31	4:30:55 p. m.	54.73	25.62
4:30:08 p. m.	7.30	19.31	4:30:56 p. m.	55.75	25.87
4:30:09 p. m.	8.30	19.31	4:30:57 p. m.	56.75	26.06
4:30:10 p. m.	9.31	19.31	4:30:58 p. m.	57.76	26.25
4:30:11 p. m.	10.32	19.31	4:30:59 p. m.	58.77	26.44
4:30:12 p. m.	11.33	19.31	4:31:00 p. m.	59.78	26.62
4:30:13 p. m.	12.34	19.37	4:31:01 p. m.	60.78	26.87
4:30:14 p. m.	13.34	19.37	4:31:02 p. m.	61.79	27.12
4:30:15 p. m.	14.36	19.31	4:31:03 p. m.	62.81	27.31
4:30:16 p. m.	15.37	19.37	4:31:04 p. m.	63.81	27.50
4:30:17 p. m.	16.38	19.31	4:31:05 p. m.	64.83	27.69
4:30:18 p. m.	17.38	19.31	4:31:06 p. m.	65.83	27.87
4:30:19 p. m.	18.41	19.31	4:31:07 p. m.	66.84	28.06
4:30:20 p. m.	19.41	19.37	4:31:08 p. m.	67.86	28.25
4:30:21 p. m.	20.42	19.37	4:31:09 p. m.	68.86	28.50
4:30:22 p. m.	21.42	19.37	4:31:10 p. m.	69.88	28.75
4:30:23 p. m.	22.44	19.31	4:31:11 p. m.	70.88	28.94
4:30:24 p. m.	23.44	19.37	4:31:12 p. m.	71.89	29.19
4:30:25 p. m.	24.45	19.44	4:31:13 p. m.	72.91	29.37
4:30:26 p. m.	25.46	19.56	4:31:14 p. m.	73.91	29.62
4:30:27 p. m.	26.46	19.69	4:31:15 p. m.	74.93	29.81
4:30:28 p. m.	27.48	19.87	4:31:16 p. m.	75.94	30.00
4:30:29 p. m.	28.50	20.00	4:31:17 p. m.	76.95	30.25
4:30:30 p. m.	29.49	20.19	4:31:18 p. m.	77.96	30.44
4:30:31 p. m.	30.51	20.31	4:31:19 p. m.	78.96	30.62
4:30:32 p. m.	31.52	20.50	4:31:20 p. m.	79.98	30.87
4:30:33 p. m.	32.52	20.62	4:31:21 p. m.	80.98	31.06
4:30:34 p. m.	33.54	20.87	4:31:22 p. m.	82.00	31.25
4:30:35 p. m.	34.54	21.12	4:31:23 p. m.	83.01	31.44
4:30:36 p. m.	35.55	21.37	4:31:24 p. m.	84.02	31.69
4:30:37 p. m.	36.57	21.56	4:31:25 p. m.	85.03	31.87
4:30:38 p. m.	37.57	21.81	4:31:26 p. m.	86.04	32.06
4:30:39 p. m.	38.59	22.06	4:31:27 p. m.	87.05	32.31
4:30:40 p. m.	39.59	22.31	4:31:28 p. m.	88.05	32.50
4:30:41 p. m.	40.60	22.44	4:31:29 p. m.	89.06	32.63
4:30:42 p. m.	41.62	22.69	4:31:30 p. m.	90.06	32.81
4:30:43 p. m.	42.62	22.94	4:31:31 p. m.	91.07	33.06
4:30:44 p. m.	43.63	23.19	4:31:32 p. m.	92.09	33.25
4:30:45 p. m.	44.63	23.44	4:31:33 p. m.	93.09	33.38
4:30:46 p. m.	45.65	23.69	4:31:34 p. m.	94.11	33.63
4:30:47 p. m.	46.65	23.87	4:31:35 p. m.	95.13	33.88
4:30:48 p. m.	47.67	24.06	4:31:36 p. m.	96.13	34.06

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
4:31:37 p. m.	97.14	34.25	4:32:30 p. m.	149.74	45.13
4:31:38 p. m.	98.16	34.44	4:32:31 p. m.	150.76	45.31
4:31:39 p. m.	99.16	34.63	4:32:32 p. m.	151.77	45.56
4:31:40 p. m.	100.18	34.88	4:32:33 p. m.	152.77	45.75
4:31:41 p. m.	101.19	35.06	4:32:34 p. m.	153.79	45.94
4:31:42 p. m.	102.19	35.25	4:32:35 p. m.	154.80	46.13
4:31:43 p. m.	103.21	35.44	4:32:36 p. m.	155.82	46.31
4:31:44 p. m.	104.21	35.63	4:32:37 p. m.	156.82	46.56
4:31:46 p. m.	105.23	35.81	4:32:38 p. m.	157.84	46.75
4:31:47 p. m.	106.24	36.00	4:32:39 p. m.	158.86	47.00
4:31:48 p. m.	107.25	36.31	4:32:40 p. m.	159.88	47.19
4:31:49 p. m.	108.25	36.50	4:32:41 p. m.	160.88	47.44
4:31:50 p. m.	109.27	36.75	4:32:42 p. m.	161.89	47.69
4:31:51 p. m.	110.28	37.00	4:32:43 p. m.	162.91	47.88
4:31:52 p. m.	111.29	37.25	4:32:44 p. m.	163.92	48.06
4:31:53 p. m.	112.29	37.38	4:32:45 p. m.	164.94	48.31
4:31:54 p. m.	113.31	37.63	4:32:46 p. m.	165.94	48.50
4:31:55 p. m.	114.32	37.81	4:32:47 p. m.	166.96	48.75
4:31:56 p. m.	115.34	38.00	4:32:48 p. m.	167.97	48.94
4:31:57 p. m.	116.34	38.25	4:32:49 p. m.	168.99	49.13
4:31:58 p. m.	117.36	38.44	4:32:50 p. m.	170.00	49.31
4:31:59 p. m.	118.37	38.63	4:32:51 p. m.	171.01	49.50
4:32:00 p. m.	119.39	38.88	4:32:52 p. m.	172.03	49.75
4:32:01 p. m.	120.39	39.06	4:32:53 p. m.	173.04	50.00
4:32:02 p. m.	121.39	39.25	4:32:54 p. m.	174.06	50.19
4:32:03 p. m.	122.42	39.44	4:32:55 p. m.	175.07	50.38
4:32:04 p. m.	123.43	39.69	4:32:56 p. m.	176.09	50.56
4:32:05 p. m.	124.44	39.88	4:32:57 p. m.	177.11	50.75
4:32:06 p. m.	125.45	40.13	4:32:58 p. m.	178.12	50.94
4:32:07 p. m.	126.46	40.31	4:32:59 p. m.	179.12	51.13
4:32:08 p. m.	127.47	40.56	4:33:00 p. m.	180.14	51.38
4:32:09 p. m.	128.49	40.75	4:33:01 p. m.	181.16	51.56
4:32:10 p. m.	129.49	41.00	4:33:02 p. m.	182.16	51.81
4:32:11 p. m.	130.50	41.19	4:33:03 p. m.	183.19	52.00
4:32:12 p. m.	131.52	41.38	4:33:04 p. m.	184.19	52.25
4:32:13 p. m.	132.54	41.63	4:33:05 p. m.	185.21	52.38
4:32:14 p. m.	133.54	41.81	4:33:07 p. m.	186.23	52.63
4:32:15 p. m.	134.56	42.00	4:33:08 p. m.	187.24	52.81
4:32:16 p. m.	135.58	42.25	4:33:09 p. m.	188.26	53.00
4:32:17 p. m.	136.59	42.44	4:33:10 p. m.	189.29	53.25
4:32:18 p. m.	137.60	42.69	4:33:11 p. m.	190.29	53.44
4:32:19 p. m.	138.61	42.88	4:33:12 p. m.	191.30	53.69
4:32:20 p. m.	139.62	43.06	4:33:13 p. m.	192.32	53.94
4:32:21 p. m.	140.63	43.25	4:33:14 p. m.	193.34	54.19
4:32:22 p. m.	141.64	43.50	4:33:15 p. m.	194.35	54.44
4:32:23 p. m.	142.66	43.69	4:33:16 p. m.	195.37	54.69
4:32:24 p. m.	143.67	43.94	4:33:17 p. m.	196.39	54.88
4:32:25 p. m.	144.68	44.19	4:33:18 p. m.	197.40	55.13
4:32:26 p. m.	145.70	44.38	4:33:19 p. m.	198.41	55.31
4:32:27 p. m.	146.71	44.56	4:33:20 p. m.	199.43	55.56
4:32:28 p. m.	147.71	44.75	4:33:21 p. m.	200.45	55.75
4:32:29 p. m.	148.73	44.94	4:33:22 p. m.	201.46	56.00

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
4:33:23 p. m.	202.48	56.19	4:34:16 p. m.	255.39	67.12
4:33:24 p. m.	203.49	56.44	4:34:17 p. m.	256.40	67.37
4:33:25 p. m.	204.51	56.69	4:34:18 p. m.	257.42	67.56
4:33:26 p. m.	205.53	56.94	4:34:19 p. m.	258.45	67.75
4:33:27 p. m.	206.54	57.13	4:34:20 p. m.	259.46	68.00
4:33:28 p. m.	207.55	57.31	4:34:21 p. m.	260.48	68.19
4:33:29 p. m.	208.56	57.50	4:34:22 p. m.	261.50	68.44
4:33:30 p. m.	209.58	57.75	4:34:23 p. m.	262.52	68.69
4:33:31 p. m.	210.60	57.94	4:34:24 p. m.	263.54	68.81
4:33:32 p. m.	211.62	58.19	4:34:25 p. m.	264.56	69.12
4:33:33 p. m.	212.63	58.38	4:34:26 p. m.	265.58	69.31
4:33:34 p. m.	213.65	58.56	4:34:27 p. m.	266.59	69.50
4:33:35 p. m.	214.67	58.81	4:34:28 p. m.	267.63	69.75
4:33:36 p. m.	215.68	59.00	4:34:29 p. m.	268.64	69.94
4:33:37 p. m.	216.70	59.19	4:34:30 p. m.	269.66	70.12
4:33:38 p. m.	217.71	59.38	4:34:31 p. m.	270.69	70.37
4:33:39 p. m.	218.73	59.56	4:34:32 p. m.	271.70	70.62
4:33:40 p. m.	219.75	59.75	4:34:33 p. m.	272.71	70.81
4:33:41 p. m.	220.76	59.94	4:34:34 p. m.	273.74	71.00
4:33:42 p. m.	221.78	60.19	4:34:35 p. m.	274.75	71.25
4:33:43 p. m.	222.79	60.38	4:34:36 p. m.	275.79	71.44
4:33:44 p. m.	223.81	60.63	4:34:37 p. m.	276.80	71.69
4:33:45 p. m.	224.83	60.81	4:34:38 p. m.	277.82	71.87
4:33:46 p. m.	225.85	61.00	4:34:39 p. m.	278.85	72.06
4:33:47 p. m.	226.87	61.25	4:34:40 p. m.	279.86	72.31
4:33:48 p. m.	227.88	61.44	4:34:41 p. m.	280.88	72.50
4:33:49 p. m.	228.90	61.63	4:34:42 p. m.	281.91	72.69
4:33:50 p. m.	229.91	61.88	4:34:43 p. m.	282.93	72.87
4:33:51 p. m.	230.93	62.06	4:34:44 p. m.	283.96	73.12
4:33:52 p. m.	231.95	62.25	4:34:45 p. m.	284.97	73.37
4:33:53 p. m.	232.96	62.44	4:34:46 p. m.	286.00	73.56
4:33:54 p. m.	234.00	62.63	4:34:47 p. m.	287.01	73.81
4:33:55 p. m.	235.01	62.88	4:34:48 p. m.	288.04	74.06
4:33:56 p. m.	236.03	63.13	4:34:49 p. m.	289.06	74.25
4:33:57 p. m.	237.04	63.31	4:34:50 p. m.	290.07	74.44
4:33:58 p. m.	238.06	63.50	4:34:51 p. m.	291.11	74.69
4:33:59 p. m.	239.07	63.75	4:34:52 p. m.	292.14	74.87
4:34:00 p. m.	240.09	64.00	4:34:53 p. m.	293.15	75.06
4:34:01 p. m.	241.12	64.19	4:34:54 p. m.	294.17	75.31
4:34:02 p. m.	242.13	64.44	4:34:55 p. m.	295.20	75.44
4:34:03 p. m.	243.15	64.62	4:34:56 p. m.	296.21	75.69
4:34:04 p. m.	244.16	64.81	4:34:58 p. m.	297.25	75.87
4:34:05 p. m.	245.19	65.00	4:34:59 p. m.	298.27	76.06
4:34:06 p. m.	246.20	65.25	4:35:00 p. m.	299.28	76.25
4:34:08 p. m.	247.22	65.44	4:35:01 p. m.	300.31	76.44
4:34:09 p. m.	248.25	65.62	4:35:02 p. m.	301.34	76.69
4:34:10 p. m.	249.27	65.87	4:35:03 p. m.	302.35	76.87
4:34:11 p. m.	250.28	66.12	4:35:04 p. m.	303.38	77.06
4:34:12 p. m.	251.30	66.31	4:35:05 p. m.	304.41	77.37
4:34:13 p. m.	252.31	66.50	4:35:06 p. m.	305.43	77.56
4:34:14 p. m.	253.34	66.75	4:35:07 p. m.	306.46	77.75
4:34:15 p. m.	254.36	66.94	4:35:08 p. m.	307.47	78.00

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
4:35:09 p. m.	308.49	78.19	4:36:02 p. m.	361.87	89.50
4:35:10 p. m.	309.52	78.37	4:36:03 p. m.	362.90	89.75
4:35:11 p. m.	310.55	78.56	4:36:04 p. m.	363.91	89.94
4:35:12 p. m.	311.57	78.81	4:36:05 p. m.	364.95	90.12
4:35:13 p. m.	312.60	79.00	4:36:06 p. m.	365.98	90.37
4:35:14 p. m.	313.61	79.25	4:36:07 p. m.	367.01	90.56
4:35:15 p. m.	314.65	79.44	4:36:08 p. m.	368.04	90.81
4:35:16 p. m.	315.67	79.62	4:36:09 p. m.	369.07	91.00
4:35:17 p. m.	316.70	79.87	4:36:10 p. m.	370.10	91.25
4:35:18 p. m.	317.73	80.12	4:36:11 p. m.	371.13	91.44
4:35:19 p. m.	318.75	80.37	4:36:12 p. m.	372.15	91.62
4:35:20 p. m.	319.77	80.62	4:36:13 p. m.	373.18	91.87
4:35:21 p. m.	320.80	80.81	4:36:14 p. m.	374.21	92.12
4:35:22 p. m.	321.82	81.00	4:36:16 p. m.	375.25	92.31
4:35:23 p. m.	322.85	81.25	4:36:17 p. m.	376.29	92.56
4:35:24 p. m.	323.88	81.44	4:36:18 p. m.	377.32	92.81
4:35:25 p. m.	324.90	81.62	4:36:19 p. m.	378.34	93.00
4:35:26 p. m.	325.92	81.87	4:36:20 p. m.	379.38	93.25
4:35:27 p. m.	326.95	82.06	4:36:21 p. m.	380.41	93.44
4:35:28 p. m.	327.96	82.31	4:36:22 p. m.	381.44	93.69
4:35:29 p. m.	329.00	82.50	4:36:23 p. m.	382.47	93.94
4:35:30 p. m.	330.02	82.75	4:36:24 p. m.	383.50	94.12
4:35:31 p. m.	331.04	82.94	4:36:25 p. m.	384.53	94.37
4:35:32 p. m.	332.07	83.12	4:36:26 p. m.	385.56	94.62
4:35:33 p. m.	333.10	83.37	4:36:27 p. m.	386.60	94.81
4:35:34 p. m.	334.12	83.56	4:36:28 p. m.	387.63	95.06
4:35:35 p. m.	335.15	83.75	4:36:29 p. m.	388.66	95.25
4:35:36 p. m.	336.17	83.94	4:36:30 p. m.	389.69	95.50
4:35:37 p. m.	337.20	84.12	4:36:31 p. m.	390.72	95.69
4:35:38 p. m.	338.23	84.37	4:36:32 p. m.	391.74	95.94
4:35:40 p. m.	339.27	84.56	4:36:33 p. m.	392.77	96.12
4:35:41 p. m.	340.28	84.81	4:36:34 p. m.	393.81	96.31
4:35:42 p. m.	341.31	85.06	4:36:35 p. m.	394.85	96.56
4:35:43 p. m.	342.33	85.31	4:36:36 p. m.	395.88	96.75
4:35:44 p. m.	343.36	85.50	4:36:37 p. m.	396.91	96.94
4:35:45 p. m.	344.39	85.69	4:36:38 p. m.	397.95	97.12
4:35:46 p. m.	345.42	85.94	4:36:39 p. m.	398.98	97.37
4:35:47 p. m.	346.44	86.12	4:36:40 p. m.	400.00	97.50
4:35:48 p. m.	347.46	86.37	4:36:41 p. m.	401.03	97.69
4:35:49 p. m.	348.50	86.56	4:36:42 p. m.	402.06	97.87
4:35:50 p. m.	349.53	86.81	4:36:43 p. m.	403.11	98.00
4:35:51 p. m.	350.55	87.06	4:36:44 p. m.	404.13	98.19
4:35:52 p. m.	351.58	87.25	4:36:45 p. m.	405.16	98.31
4:35:53 p. m.	352.61	87.50	4:36:46 p. m.	406.20	98.44
4:35:54 p. m.	353.64	87.69	4:36:48 p. m.	407.23	98.56
4:35:55 p. m.	354.66	87.87	4:36:49 p. m.	408.27	98.62
4:35:56 p. m.	355.69	88.19	4:36:50 p. m.	409.30	98.75
4:35:57 p. m.	356.72	88.37	4:36:51 p. m.	410.33	98.81
4:35:58 p. m.	357.75	88.62	4:36:52 p. m.	411.36	98.94
4:35:59 p. m.	358.78	88.81	4:36:53 p. m.	412.41	98.94
4:36:00 p. m.	359.81	89.06	4:36:54 p. m.	413.45	99.06
4:36:01 p. m.	360.84	89.25	4:36:55 p. m.	414.48	99.06

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
4:36:56 p. m.	415.51	99.12	4:37:39 p. m.	458.92	99.44
4:36:57 p. m.	416.54	99.19	4:37:40 p. m.	459.95	99.44
4:36:58 p. m.	417.57	99.25	4:37:41 p. m.	460.99	99.44
4:36:59 p. m.	418.60	99.25	4:37:42 p. m.	462.02	99.44
4:37:00 p. m.	419.63	99.31	4:37:43 p. m.	463.05	99.44
4:37:01 p. m.	420.68	99.31	4:37:44 p. m.	464.09	99.37
4:37:02 p. m.	421.70	99.37	4:37:45 p. m.	465.12	99.44
4:37:03 p. m.	422.75	99.44	4:37:47 p. m.	466.94	99.44
4:37:04 p. m.	423.78	99.44	4:37:47 p. m.	467.20	99.37
4:37:05 p. m.	424.81	99.44	4:37:48 p. m.	468.23	99.37
4:37:06 p. m.	425.84	99.44	4:37:50 p. m.	469.25	99.37
4:37:07 p. m.	426.88	99.50	4:37:51 p. m.	470.29	99.37
4:37:08 p. m.	427.91	99.50	4:37:52 p. m.	471.32	99.37
4:37:09 p. m.	428.94	99.50	4:37:53 p. m.	472.35	99.37
4:37:10 p. m.	429.97	99.50	4:37:54 p. m.	473.38	99.31
4:37:11 p. m.	431.00	99.50	4:37:55 p. m.	474.43	99.31
4:37:12 p. m.	432.05	99.56	4:37:56 p. m.	475.46	99.31
4:37:13 p. m.	433.08	99.56	4:37:57 p. m.	476.49	99.31
4:37:14 p. m.	434.11	99.56	4:37:58 p. m.	477.52	99.31
4:37:15 p. m.	435.15	99.56	4:37:59 p. m.	478.55	99.31
4:37:16 p. m.	436.18	99.56	4:38:00 p. m.	479.60	99.31
4:37:17 p. m.	437.21	99.56	4:38:01 p. m.	480.62	99.31
4:37:19 p. m.	438.25	99.56	4:38:02 p. m.	481.66	99.31
4:37:20 p. m.	439.29	99.56	4:38:03 p. m.	482.70	99.25
4:37:21 p. m.	440.32	99.56	4:38:04 p. m.	483.73	99.25
4:37:22 p. m.	441.35	99.56	4:38:05 p. m.	484.76	99.25
4:37:23 p. m.	442.39	99.56	4:38:06 p. m.	485.79	99.25
4:37:24 p. m.	443.42	99.56	4:38:07 p. m.	486.82	99.25
4:37:25 p. m.	444.45	99.62	4:38:08 p. m.	487.85	99.19
4:37:26 p. m.	445.49	99.56	4:38:09 p. m.	488.88	99.19
4:37:27 p. m.	446.52	99.56	4:38:10 p. m.	489.92	99.19
4:37:28 p. m.	447.55	99.56	4:38:11 p. m.	490.95	99.19
4:37:29 p. m.	448.58	99.56	4:38:12 p. m.	492.00	99.19
4:37:30 p. m.	449.61	99.56	4:38:13 p. m.	493.03	99.19
4:37:31 p. m.	450.64	99.50	4:38:14 p. m.	494.06	99.12
4:37:32 p. m.	451.68	99.56	4:38:15 p. m.	495.10	99.12
4:37:33 p. m.	452.71	99.50	4:38:16 p. m.	496.13	99.12
4:37:34 p. m.	453.75	99.50	4:38:17 p. m.	497.16	99.12
4:37:35 p. m.	454.78	99.50	4:38:18 p. m.	498.20	99.12
4:37:36 p. m.	455.81	99.50	4:38:20 p. m.	499.23	99.06
4:37:37 p. m.	456.86	99.50	4:38:21 p. m.	500.27	99.06
4:37:38 p. m.	457.89	99.44	4:38:22 p. m.	501.30	99.06

^eDatos tomados el 25 de junio de 2021.

Tabla B.6

Sexto grupo de datos experimentales de temperatura vs tiempo^f

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
11:15:00 a. m.	0.03	19.12	11:15:49 a. m.	48.48	23.75
11:15:01 a. m.	1.03	19.19	11:15:50 a. m.	49.48	23.94
11:15:02 a. m.	2.05	19.19	11:15:51 a. m.	50.50	24.12
11:15:03 a. m.	3.06	19.19	11:15:52 a. m.	51.50	24.37
11:15:04 a. m.	4.07	19.12	11:15:53 a. m.	52.51	24.50
11:15:05 a. m.	5.08	19.19	11:15:54 a. m.	53.53	24.75
11:15:06 a. m.	6.08	19.12	11:15:55 a. m.	54.54	25.00
11:15:07 a. m.	7.10	19.19	11:15:56 a. m.	55.54	25.19
11:15:08 a. m.	8.11	19.12	11:15:57 a. m.	56.54	25.37
11:15:09 a. m.	9.11	19.12	11:15:58 a. m.	57.56	25.56
11:15:10 a. m.	10.13	19.12	11:15:59 a. m.	58.56	25.81
11:15:11 a. m.	11.13	19.12	11:16:00 a. m.	59.58	26.06
11:15:12 a. m.	12.14	19.12	11:16:01 a. m.	60.60	26.25
11:15:13 a. m.	13.15	19.12	11:16:02 a. m.	61.59	26.50
11:15:14 a. m.	14.17	19.12	11:16:03 a. m.	62.61	26.69
11:15:15 a. m.	15.17	19.12	11:16:04 a. m.	63.62	26.87
11:15:16 a. m.	16.18	19.19	11:16:05 a. m.	64.62	27.00
11:15:17 a. m.	17.18	19.12	11:16:06 a. m.	65.63	27.25
11:15:18 a. m.	18.20	19.12	11:16:07 a. m.	66.78	27.44
11:15:19 a. m.	19.21	19.12	11:16:08 a. m.	67.66	27.75
11:15:20 a. m.	20.21	19.12	11:16:09 a. m.	68.66	28.00
11:15:21 a. m.	21.23	19.12	11:16:10 a. m.	69.67	28.19
11:15:22 a. m.	22.23	19.12	11:16:11 a. m.	70.69	28.44
11:15:23 a. m.	23.25	19.19	11:16:12 a. m.	71.69	28.69
11:15:24 a. m.	24.27	19.19	11:16:13 a. m.	72.72	28.87
11:15:25 a. m.	25.27	19.31	11:16:14 a. m.	73.72	29.12
11:15:27 a. m.	26.27	19.44	11:16:15 a. m.	74.72	29.31
11:15:28 a. m.	27.28	19.56	11:16:16 a. m.	75.73	29.56
11:15:29 a. m.	28.28	19.69	11:16:17 a. m.	76.73	29.69
11:15:30 a. m.	29.30	19.87	11:16:18 a. m.	77.77	29.94
11:15:31 a. m.	30.30	20.00	11:16:19 a. m.	78.77	30.19
11:15:32 a. m.	31.32	20.25	11:16:20 a. m.	79.77	30.31
11:15:33 a. m.	32.32	20.44	11:16:21 a. m.	80.78	30.56
11:15:34 a. m.	33.34	20.62	11:16:22 a. m.	81.79	30.75
11:15:35 a. m.	34.35	20.81	11:16:23 a. m.	82.80	30.94
11:15:36 a. m.	35.36	21.00	11:16:24 a. m.	83.80	31.12
11:15:37 a. m.	36.36	21.19	11:16:25 a. m.	84.82	31.37
11:15:38 a. m.	37.38	21.37	11:16:26 a. m.	85.83	31.56
11:15:39 a. m.	38.38	21.62	11:16:27 a. m.	86.84	31.75
11:15:40 a. m.	39.39	21.94	11:16:28 a. m.	87.85	32.00
11:15:41 a. m.	40.41	22.19	11:16:29 a. m.	88.85	32.31
11:15:42 a. m.	41.41	22.44	11:16:30 a. m.	89.87	32.50
11:15:43 a. m.	42.42	22.69	11:16:31 a. m.	90.88	32.69
11:15:44 a. m.	43.43	22.87	11:16:32 a. m.	91.88	32.94
11:15:45 a. m.	44.43	23.06	11:16:33 a. m.	92.90	33.13
11:15:46 a. m.	45.45	23.25	11:16:34 a. m.	93.91	33.31
11:15:47 a. m.	46.45	23.44	11:16:35 a. m.	94.91	33.56
11:15:48 a. m.	47.46	23.62	11:16:36 a. m.	95.93	33.75

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
11:16:37 a. m.	96.95	34.00	11:17:30 a. m.	149.54	44.63
11:16:38 a. m.	97.95	34.13	11:17:31 a. m.	150.55	44.81
11:16:39 a. m.	98.97	34.38	11:17:32 a. m.	151.55	45.00
11:16:40 a. m.	99.97	34.56	11:17:33 a. m.	152.57	45.25
11:16:41 a. m.	100.98	34.75	11:17:34 a. m.	153.59	45.50
11:16:42 a. m.	101.99	35.00	11:17:35 a. m.	154.60	45.69
11:16:43 a. m.	103.00	35.19	11:17:36 a. m.	155.62	45.94
11:16:44 a. m.	104.02	35.38	11:17:37 a. m.	156.63	46.13
11:16:45 a. m.	105.03	35.56	11:17:38 a. m.	157.64	46.38
11:16:46 a. m.	106.03	35.75	11:17:39 a. m.	158.66	46.56
11:16:47 a. m.	107.05	36.00	11:17:40 a. m.	159.67	46.75
11:16:48 a. m.	108.06	36.19	11:17:41 a. m.	160.69	46.94
11:16:49 a. m.	109.06	36.44	11:17:42 a. m.	161.69	47.06
11:16:50 a. m.	110.08	36.63	11:17:43 a. m.	162.70	47.25
11:16:51 a. m.	111.09	36.88	11:17:44 a. m.	163.72	47.44
11:16:52 a. m.	112.11	37.06	11:17:45 a. m.	164.74	47.63
11:16:53 a. m.	113.12	37.25	11:17:46 a. m.	165.75	47.88
11:16:54 a. m.	114.12	37.44	11:17:47 a. m.	166.75	48.06
11:16:55 a. m.	115.13	37.63	11:17:48 a. m.	167.78	48.31
11:16:56 a. m.	116.15	37.88	11:17:49 a. m.	168.79	48.50
11:16:57 a. m.	117.15	38.06	11:17:50 a. m.	169.80	48.75
11:16:58 a. m.	118.16	38.25	11:17:51 a. m.	170.82	49.00
11:16:59 a. m.	119.18	38.44	11:17:52 a. m.	171.83	49.25
11:17:00 a. m.	120.20	38.63	11:17:53 a. m.	172.85	49.44
11:17:01 a. m.	121.20	38.81	11:17:54 a. m.	173.86	49.69
11:17:02 a. m.	122.21	39.00	11:17:55 a. m.	174.88	49.94
11:17:03 a. m.	123.23	39.25	11:17:56 a. m.	175.88	50.19
11:17:04 a. m.	124.25	39.44	11:17:57 a. m.	176.89	50.44
11:17:05 a. m.	125.25	39.63	11:17:58 a. m.	177.92	50.56
11:17:06 a. m.	126.26	39.94	11:17:59 a. m.	178.93	50.75
11:17:08 a. m.	127.27	40.19	11:18:00 a. m.	179.95	50.94
11:17:09 a. m.	128.28	40.38	11:18:01 a. m.	180.96	51.13
11:17:10 a. m.	129.30	40.56	11:18:02 a. m.	181.97	51.38
11:17:11 a. m.	130.30	40.81	11:18:03 a. m.	182.99	51.56
11:17:12 a. m.	131.31	41.06	11:18:04 a. m.	184.00	51.75
11:17:13 a. m.	132.34	41.25	11:18:05 a. m.	185.01	51.94
11:17:14 a. m.	133.34	41.44	11:18:06 a. m.	186.03	52.13
11:17:15 a. m.	134.35	41.63	11:18:07 a. m.	187.04	52.31
11:17:16 a. m.	135.37	41.75	11:18:08 a. m.	188.06	52.56
11:17:17 a. m.	136.38	42.00	11:18:09 a. m.	189.08	52.75
11:17:18 a. m.	137.38	42.25	11:18:10 a. m.	190.08	52.94
11:17:19 a. m.	138.40	42.44	11:18:11 a. m.	191.10	53.19
11:17:20 a. m.	139.41	42.63	11:18:12 a. m.	192.13	53.44
11:17:21 a. m.	140.43	42.81	11:18:13 a. m.	193.13	53.63
11:17:22 a. m.	141.45	43.00	11:18:14 a. m.	194.15	53.81
11:17:23 a. m.	142.45	43.19	11:18:15 a. m.	195.16	54.06
11:17:24 a. m.	143.46	43.44	11:18:16 a. m.	196.18	54.25
11:17:25 a. m.	144.48	43.63	11:18:17 a. m.	197.20	54.50
11:17:26 a. m.	145.49	43.88	11:18:18 a. m.	198.21	54.69
11:17:27 a. m.	146.50	44.06	11:18:19 a. m.	199.23	54.94
11:17:28 a. m.	147.52	44.25	11:18:20 a. m.	200.24	55.19
11:17:29 a. m.	148.53	44.44	11:18:21 a. m.	201.26	55.44

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
11:18:22 a. m.	202.27	55.69	11:19:15 a. m.	255.17	66.75
11:18:24 a. m.	203.28	55.88	11:19:16 a. m.	256.20	66.94
11:18:25 a. m.	204.29	56.06	11:19:17 a. m.	257.21	67.12
11:18:26 a. m.	205.31	56.31	11:19:18 a. m.	258.23	67.37
11:18:27 a. m.	206.33	56.50	11:19:19 a. m.	259.25	67.56
11:18:28 a. m.	207.34	56.75	11:19:21 a. m.	260.27	67.69
11:18:29 a. m.	208.36	56.94	11:19:22 a. m.	261.29	67.94
11:18:30 a. m.	209.38	57.13	11:19:23 a. m.	262.31	68.19
11:18:31 a. m.	210.39	57.38	11:19:24 a. m.	263.33	68.44
11:18:32 a. m.	211.41	57.56	11:19:25 a. m.	264.34	68.69
11:18:33 a. m.	212.44	57.81	11:19:26 a. m.	265.38	68.94
11:18:34 a. m.	213.44	58.00	11:19:27 a. m.	266.39	69.12
11:18:35 a. m.	214.47	58.19	11:19:28 a. m.	267.41	69.31
11:18:36 a. m.	215.48	58.38	11:19:29 a. m.	268.44	69.50
11:18:37 a. m.	216.50	58.56	11:19:30 a. m.	269.44	69.75
11:18:38 a. m.	217.50	58.81	11:19:31 a. m.	270.47	69.94
11:18:39 a. m.	218.52	59.00	11:19:32 a. m.	271.49	70.12
11:18:40 a. m.	219.55	59.19	11:19:33 a. m.	272.52	70.37
11:18:41 a. m.	220.56	59.38	11:19:34 a. m.	273.53	70.50
11:18:42 a. m.	221.57	59.56	11:19:35 a. m.	274.55	70.69
11:18:43 a. m.	222.59	59.81	11:19:36 a. m.	275.58	70.87
11:18:44 a. m.	223.61	60.00	11:19:37 a. m.	276.59	71.12
11:18:45 a. m.	224.62	60.19	11:19:38 a. m.	277.63	71.31
11:18:46 a. m.	225.65	60.44	11:19:39 a. m.	278.64	71.50
11:18:47 a. m.	226.67	60.69	11:19:40 a. m.	279.66	71.81
11:18:48 a. m.	227.68	60.94	11:19:41 a. m.	280.69	72.06
11:18:49 a. m.	228.70	61.13	11:19:42 a. m.	281.71	72.25
11:18:50 a. m.	229.71	61.38	11:19:43 a. m.	282.72	72.56
11:18:51 a. m.	230.73	61.56	11:19:44 a. m.	283.74	72.75
11:18:52 a. m.	231.75	61.81	11:19:45 a. m.	284.77	73.00
11:18:53 a. m.	232.76	62.06	11:19:46 a. m.	285.79	73.19
11:18:54 a. m.	233.78	62.25	11:19:47 a. m.	286.80	73.44
11:18:55 a. m.	234.81	62.50	11:19:48 a. m.	287.84	73.62
11:18:56 a. m.	235.82	62.69	11:19:49 a. m.	288.85	73.81
11:18:57 a. m.	236.84	62.88	11:19:50 a. m.	289.88	74.00
11:18:58 a. m.	237.86	63.13	11:19:51 a. m.	290.90	74.19
11:18:59 a. m.	238.87	63.31	11:19:52 a. m.	291.91	74.37
11:19:00 a. m.	239.89	63.56	11:19:53 a. m.	292.95	74.62
11:19:01 a. m.	240.91	63.81	11:19:54 a. m.	293.96	74.81
11:19:02 a. m.	241.93	64.00	11:19:55 a. m.	294.99	75.06
11:19:03 a. m.	243.16	64.19	11:19:56 a. m.	296.01	75.31
11:19:04 a. m.	243.97	64.44	11:19:57 a. m.	297.04	75.50
11:19:05 a. m.	244.98	64.62	11:19:58 a. m.	298.05	75.75
11:19:06 a. m.	246.00	64.87	11:19:59 a. m.	299.09	75.94
11:19:07 a. m.	247.03	65.12	11:20:00 a. m.	300.10	76.19
11:19:08 a. m.	248.04	65.31	11:20:01 a. m.	301.13	76.37
11:19:09 a. m.	249.06	65.50	11:20:02 a. m.	302.14	76.62
11:19:10 a. m.	250.07	65.69	11:20:03 a. m.	303.17	76.87
11:19:11 a. m.	251.10	65.87	11:20:04 a. m.	304.20	77.00
11:19:12 a. m.	252.11	66.12	11:20:05 a. m.	305.22	77.25
11:19:13 a. m.	253.14	66.37	11:20:06 a. m.	306.23	77.44
11:19:14 a. m.	254.16	66.56	11:20:08 a. m.	307.27	77.62

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
11:20:09 a. m.	308.30	77.81	11:21:02 a. m.	361.65	89.06
11:20:10 a. m.	309.31	78.06	11:21:03 a. m.	362.67	89.31
11:20:11 a. m.	310.34	78.31	11:21:04 a. m.	363.71	89.50
11:20:12 a. m.	311.36	78.44	11:21:05 a. m.	364.73	89.75
11:20:13 a. m.	312.63	78.69	11:21:06 a. m.	365.76	89.94
11:20:14 a. m.	313.41	78.94	11:21:07 a. m.	366.79	90.12
11:20:15 a. m.	314.44	79.12	11:21:08 a. m.	367.82	90.31
11:20:16 a. m.	315.45	79.37	11:21:09 a. m.	368.86	90.56
11:20:17 a. m.	316.48	79.56	11:21:10 a. m.	369.89	90.81
11:20:18 a. m.	317.52	79.81	11:21:11 a. m.	370.90	91.00
11:20:19 a. m.	318.53	80.06	11:21:12 a. m.	371.93	91.25
11:20:20 a. m.	319.56	80.31	11:21:13 a. m.	372.96	91.44
11:20:21 a. m.	320.59	80.50	11:21:14 a. m.	374.00	91.69
11:20:22 a. m.	321.60	80.69	11:21:15 a. m.	375.03	91.94
11:20:23 a. m.	322.63	80.87	11:21:16 a. m.	376.06	92.19
11:20:24 a. m.	323.66	81.06	11:21:17 a. m.	377.09	92.37
11:20:25 a. m.	324.67	81.31	11:21:18 a. m.	378.13	92.56
11:20:26 a. m.	325.70	81.50	11:21:19 a. m.	379.16	92.81
11:20:27 a. m.	326.73	81.75	11:21:20 a. m.	380.19	93.06
11:20:28 a. m.	327.75	82.00	11:21:21 a. m.	381.22	93.31
11:20:29 a. m.	328.78	82.25	11:21:22 a. m.	382.23	93.50
11:20:30 a. m.	329.81	82.44	11:21:24 a. m.	383.27	93.75
11:20:31 a. m.	330.83	82.62	11:21:25 a. m.	384.30	94.00
11:20:32 a. m.	331.86	82.87	11:21:26 a. m.	385.34	94.25
11:20:33 a. m.	332.89	83.06	11:21:27 a. m.	386.37	94.44
11:20:34 a. m.	333.91	83.25	11:21:28 a. m.	387.40	94.69
11:20:35 a. m.	334.94	83.50	11:21:29 a. m.	388.43	94.94
11:20:36 a. m.	335.95	83.75	11:21:30 a. m.	389.45	95.19
11:20:37 a. m.	336.98	83.94	11:21:31 a. m.	390.48	95.37
11:20:38 a. m.	338.02	84.19	11:21:32 a. m.	391.52	95.62
11:20:39 a. m.	339.05	84.37	11:21:33 a. m.	392.56	95.81
11:20:40 a. m.	340.06	84.62	11:21:34 a. m.	393.59	96.00
11:20:41 a. m.	341.09	84.81	11:21:35 a. m.	394.62	96.25
11:20:42 a. m.	342.13	85.00	11:21:36 a. m.	395.66	96.44
11:20:43 a. m.	343.14	85.25	11:21:37 a. m.	396.69	96.69
11:20:44 a. m.	344.17	85.44	11:21:38 a. m.	397.72	96.87
11:20:45 a. m.	345.20	85.69	11:21:39 a. m.	398.75	97.06
11:20:46 a. m.	346.23	85.87	11:21:40 a. m.	399.78	97.25
11:20:47 a. m.	347.26	86.06	11:21:41 a. m.	400.81	97.44
11:20:49 a. m.	348.28	86.31	11:21:42 a. m.	401.84	97.62
11:20:50 a. m.	349.31	86.56	11:21:43 a. m.	402.88	97.81
11:20:51 a. m.	350.34	86.69	11:21:44 a. m.	403.91	98.00
11:20:52 a. m.	351.37	86.94	11:21:45 a. m.	404.94	98.12
11:20:53 a. m.	352.39	87.12	11:21:46 a. m.	405.97	98.31
11:20:54 a. m.	353.42	87.31	11:21:47 a. m.	407.02	98.44
11:20:55 a. m.	354.45	87.56	11:21:48 a. m.	408.05	98.56
11:20:56 a. m.	355.48	87.81	11:21:49 a. m.	409.08	98.69
11:20:57 a. m.	356.51	88.00	11:21:50 a. m.	410.10	98.75
11:20:58 a. m.	357.53	88.19	11:21:51 a. m.	411.15	98.81
11:20:59 a. m.	358.56	88.44	11:21:52 a. m.	412.18	98.94
11:21:00 a. m.	359.59	88.69	11:21:53 a. m.	413.21	99.00
11:21:01 a. m.	360.62	88.87	11:21:54 a. m.	414.24	99.06

Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]	Hora	Tiempo, [s]	Temperatura, [°C]
11:21:56 a. m.	415.27	99.12	11:22:39 a. m.	458.68	99.69
11:21:57 a. m.	416.32	99.19	11:22:40 a. m.	459.73	99.62
11:21:58 a. m.	417.35	99.19	11:22:41 a. m.	460.75	99.62
11:21:59 a. m.	418.38	99.25	11:22:42 a. m.	461.79	99.62
11:22:00 a. m.	419.41	99.31	11:22:43 a. m.	462.83	99.56
11:22:01 a. m.	420.45	99.31	11:22:44 a. m.	463.86	99.62
11:22:02 a. m.	421.48	99.31	11:22:45 a. m.	464.89	99.56
11:22:03 a. m.	422.50	99.37	11:22:46 a. m.	465.93	99.56
11:22:04 a. m.	423.55	99.44	11:22:47 a. m.	466.96	99.56
11:22:05 a. m.	424.58	99.44	11:22:48 a. m.	467.99	99.56
11:22:06 a. m.	425.61	99.44	11:22:49 a. m.	469.02	99.56
11:22:07 a. m.	426.64	99.50	11:22:50 a. m.	470.07	99.56
11:22:08 a. m.	427.67	99.50	11:22:51 a. m.	471.10	99.56
11:22:09 a. m.	428.72	99.56	11:22:53 a. m.	472.33	99.56
11:22:10 a. m.	429.75	99.56	11:22:53 a. m.	473.17	99.50
11:22:11 a. m.	430.79	99.56	11:22:54 a. m.	474.19	99.50
11:22:12 a. m.	431.82	99.62	11:22:55 a. m.	475.22	99.50
11:22:13 a. m.	432.85	99.62	11:22:56 a. m.	476.27	99.44
11:22:14 a. m.	433.88	99.62	11:22:58 a. m.	477.30	99.44
11:22:15 a. m.	434.91	99.62	11:22:59 a. m.	478.34	99.44
11:22:16 a. m.	435.95	99.69	11:23:00 a. m.	479.37	99.37
11:22:17 a. m.	436.98	99.69	11:23:01 a. m.	480.40	99.37
11:22:18 a. m.	438.02	99.69	11:23:02 a. m.	481.43	99.37
11:22:19 a. m.	439.05	99.69	11:23:03 a. m.	482.46	99.37
11:22:20 a. m.	440.08	99.69	11:23:04 a. m.	483.49	99.37
11:22:21 a. m.	441.13	99.69	11:23:05 a. m.	484.53	99.37
11:22:22 a. m.	442.16	99.69	11:23:06 a. m.	485.56	99.31
11:22:23 a. m.	443.19	99.69	11:23:07 a. m.	486.59	99.31
11:22:24 a. m.	444.22	99.69	11:23:08 a. m.	487.64	99.31
11:22:25 a. m.	445.25	99.75	11:23:09 a. m.	488.67	99.31
11:22:27 a. m.	446.28	99.69	11:23:10 a. m.	489.70	99.31
11:22:28 a. m.	447.32	99.69	11:23:11 a. m.	490.73	99.25
11:22:29 a. m.	448.35	99.69	11:23:12 a. m.	491.76	99.25
11:22:30 a. m.	449.38	99.69	11:23:13 a. m.	492.79	99.25
11:22:31 a. m.	450.43	99.69	11:23:14 a. m.	493.84	99.19
11:22:32 a. m.	451.46	99.69	11:23:15 a. m.	494.86	99.25
11:22:33 a. m.	452.49	99.69	11:23:16 a. m.	495.89	99.19
11:22:34 a. m.	453.52	99.69	11:23:17 a. m.	496.94	99.19
11:22:35 a. m.	454.55	99.69	11:23:18 a. m.	497.96	99.19
11:22:36 a. m.	455.58	99.69	11:23:19 a. m.	498.99	99.19
11:22:37 a. m.	456.63	99.69	11:23:20 a. m.	500.03	99.12
11:22:38 a. m.	457.66	99.62	11:23:21 a. m.	501.06	99.12

[†]Datos tomados el 27 de junio de 2021.



CARTA DE AUTORIZACION DE PUBLICACION DE TRABAJO DE INVESTIGACION EN REPOSITORIO DIGITAL RENATI – SUNEDU

Trujillo, 29 de noviembre de 2021

Los AUTORES suscritos del INFORME FINAL DE INVESTIGACION CIENTIFICA

Titulado: **Modelado y simulación de un calentador de agua eléctrico de temperatura variable basado en un controlador proporcional integral derivativo.**

AUTORIZAMOS SU PUBLICACION EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL, REPOSITORIO RENATI – SUNEDU, ALICIA – CONCYTEC, CON EL SIGUIENTE TIPO DE ACCESO:

- A. Acceso abierto B. Acceso restringido (datos del autor y resumen del trabajo) C. No autorizo su Publicación

Si eligió la opción restringida o No autoriza su publicación sírvase justificar

ESTUDIANTES DE PREGRADO: TRABAJO DE INVESTIGACION

ESTUDIANTES DE POSTGRADO: TESIS MAESTRIA

DOCENTES: INFORME DE INVESTIGACION

TESIS

TESIS DOCTORADO

OTROS

Equipo investigador integrado por:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES	FACULTAD	CONDICION (NOMBRADO, CONTRATADO, EMERITO, estudiante, OTROS)	CODIGO DOCENTE Número Matrícula del Estudiante	Autor Coautor Asesor
1	Uceda Pérez, Juan Manuel	Ing. Química	Estudiante (Bachiller)	1451600116	Autor
2	Loyola Carranza, Wilber Alamiro	Ing. Química	Nombrado	2636	Asesor

FIRMA

DNI: 74041732

FIRMA

DNI: 17805579

FIRMA

DNI:

FIRMA

DNI:

Este formato debe ser llenado, firmado, adjuntado en el informe de tesis y/o trabajo de investigación.



Los AUTORES suscritos en el presente documento DECLARAMOS BAJO JURAMENTO que somos los responsables legales de la calidad y originalidad del contenido del Proyecto de Investigación Científica, así como del informe de la Investigación Científica realizado.

TITULO: Modelado y simulación de un calentador de agua eléctrico de temperatura variable basado en un controlador proporcional integral derivativo.

PROYECTO DE INVESTIGACION CIENTIFICA

DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

(PREGRADO) ()

PROYECTO DE TESIS PREGRADO ()

PROYECTO DE TESIS MAESTRIA ()

PROYECTO DE TESIS DOCTORADO ()

Equipo investigador integrado por:

INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA PROY.

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO) ()

TESIS DE PREGRADO (X)

TESIS MAESTRIA ()

TESIS DOCTORADO ()

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES	FACULTAD	DEP. ACADEMICO	CATEGORÍA DOCENTE Asesor	CODIGO DOCENTE asesor Número Matrícula del Estudiante	Autor Coautor Asesor
1	Uceda Pérez, Juan Manuel	Ing. Química	Ing. Química		1451600116	Autor
2	Loyola Carranza, Wilber Alamiro	Ing. Química	Ing. Química	Principal D.E.	2636	Asesor

Trujillo, 29 de noviembre del 2021.

FIRMA

FIRMA

DNI: 74041732

DNI: 17805579

Este formato debe ser llenado, firmado, adjuntado al final del documento del PIC, del informe de tesis.