



Controlador difuso tipo II aplicado a procesos de control de temperatura

Ávila Villacís, Adrián Alejandro

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia Tecnológica

Centro de Posgrados

Maestría en Electrónica y Automatización Mención Redes Industriales

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Magíster en Electrónica y

Automatización mención Redes Industriales

Ing. Pérez Gutiérrez, Milton Fabricio MSc.

12 de enero del 2022

Latacunga



Reporte de verificación de contenido

Tesis_Adrian Avila 3.docx

Scanned on: 16:38 August 8, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	848
Words with Minor Changes	172
Paraphrased Words	135
Omitted Words	0

Firma:

Ing. Pérez Gutiérrez, Milton Fabricio MSc.

DIRECTOR

C.C.: 180256571-1



Vicerrectorado de investigación, innovación y transferencia de tecnología

Centro de posgrados

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, "**Controlador Difuso Tipo II aplicado a Procesos de Control de Temperatura**" fue realizado por el señor **Ávila Villacís, Adrián Alejandro**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 08 de agosto de 2022

Firma:

.....
Ing. Pérez Gutiérrez, Milton Fabricio MSc.

DIRECTOR

C.C.: 180256571-1



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Vicerrectorado de investigación, innovación y transferencia de tecnología

Centro de posgrados

Responsabilidad de autoría

Yo **Ávila Villacís, Adrián Alejandro**, con cédula de ciudadanía N° 050239914-0, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Controlador difuso tipo II aplicado a procesos de control de temperatura”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 08 de agosto de 2022

Firma:

.....
Ávila Villacís, Adrián Alejandro

C.C.: 050239914-0



Vicerrectorado de investigación, innovación y transferencia de tecnología

Centro de posgrados

Autorización de publicación

Yo **Ávila Villacís, Adrián Alejandro**, con cédula de ciudadanía N° 050239914-0, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**Controlador difuso tipo II aplicado a procesos de control de temperatura**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 08 de agosto de 2022

Firma:

Ávila Villacís, Adrián Alejandro

C.C.: 050239914-0

Dedicatoria

“Cualquier cosa que la mente del hombre puede concebir y creer, puede ser conseguida”

Napoleon Hill.

Al finalizar este trabajo quiero utilizar este espacio para agradecer a mi Padre quien me ha brindado su ejemplo de trabajo, honradez y humildad, a mi Madre (+) quien me enseñó que incluso la tarea más grande se puede lograr si se hace un paso a la vez y sobre todo con amor y desinterés, a mis hermanos por su aliento y apoyo en este proyecto de estudio; y a todas aquellas personas que causalmente fueron aporte y motivación durante el desarrollo del proyecto de tesis y en consecuencia la obtención de mi título profesional.

Adrián Alejandro Ávila Villacís

Agradecimiento

“Si no puedes hacer grandes cosas, haz cosas pequeñas de una gran forma.”

Napoleón Hill

Se dice que la mejor herencia que pueden dejar los padres son los estudios, sin embargo, el legado va más allá de esto me siento muy agradecido, con mi padre que con su ejemplo de constancia, honradez, sencillez y fuerza ha permitido trazar mi camino y caminar con mis propios pies y con mi madre que mientras estuvo a mi lado me regalo el mejor recuerdo de amor, sencillez, lucha y superación; sin olvidarme de mis hermanos y sobrinos que me han llenado de amor y apoyo.

A mis profesores, amigos y compañeros quienes a través de sus conocimientos y asistencia en el proceso de mi formación.

Adrián Alejandro Ávila Villacís

Índice de contenidos

Carátula	1
Reporte de verificación de contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de contenidos	8
Índice de tablas	11
Índice de figuras	12
Resumen	14
Abstract.....	15
Capítulo I: Contenidos Generales.....	16
Antecedentes.....	16
Planteamiento del problema	17
Objetivos	18
<i>Objetivo general del proyecto</i>	18
<i>Objetivos específicos del proyecto</i>	18
Justificación, importancia y alcance del proyecto	18
Hipótesis de investigación.....	19
Categorización de las variables de investigación	19
Capítulo II: Marco teórico referencial	21
Marco Legal	21
Marco conceptual.....	21
<i>Modelamiento Matemático</i>	21
<i>Sistemas de Control</i>	23
Controladores.....	23
Controlador PID.....	24
<i>Métodos de sintonización de controladores PID</i>	25
<i>Métodos de lazo abierto</i>	25
<i>Métodos de lazo cerrado</i>	26
Lógica Difusa.....	28

<i>Control Difuso</i>	29
<i>Control Difuso Tipo II</i>	29
<i>Conjuntos Difusos Tipo II</i>	30
<i>Incertidumbre y clasificación</i>	32
<i>Huella de Incertidumbre</i>	32
<i>Simulación</i>	33
<i>Control de Temperatura</i>	34
<i>Transferencia de Calor</i>	35
<i>Horno Eléctrico</i>	35
<i>Clasificación de Hornos Eléctricos</i>	36
<i>Por su Tipo de Operación</i>	36
<i>Por su Uso</i>	37
<i>Por el Tipo de calentamiento</i>	37
<i>Por el Tipo de Cocción</i>	38
<i>Por la ubicación en una cocina</i>	38
<i>Recursos</i>	38
<i>Software Matlab</i>	39
<i>Herramienta Simulink</i>	40
<i>Herramienta Fuzzy Logic Designer</i>	41
<i>Herramienta Fuzzy Logic Designer Tipo II</i>	42
Capítulo III: Metodología de la Investigación	43
Diseño de la Investigación	43
Trabajos relacionados	43
Modelo matemático de horno eléctrico convencional	44
Controlador PID	46
Sintonización de Lazo PID	47
Instalación de Herramienta Fuzzy Type 2 en Matlab	47
Diseño Controlador Difuso Tipo II	50
Creación de Variables en la Herramienta FT2 de Matlab	51
Creación de Reglas	58
Guardar el modelo difuso diseñado	60
Capitulo IV: Resultados de la simulación	62
Análisis del controlador PID	62
PID por el método de lazo cerrado de Ziegler-Nichols	62
Sintonización automática del lazo PID de Matlab	65

Análisis del controlador difuso tipo 2	67
Comparación entre controlador PID y controlador Difuso tipo 2	69
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones.....	71
Conclusiones.....	71
Recomendaciones	73
Bibliografía	74
Anexos	77

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Operacionalización de las Variables</i>	20
Tabla 2 <i>Trabajos Relacionados</i>	44
Tabla 3 <i>Variables de sintonización PID</i>	47
Tabla 4 <i>Variables del Controlador Difuso Tipo II</i>	51
Tabla 5 <i>Análisis comparativo entre el controlador PID y Control difuso tipo 2</i>	69

Índice de figuras

Figura 1 Esquema básico de un sistema de control proporcional integral derivativo	25
Figura 2 Descripción gráfica de un conjunto difuso	28
Figura 3 Diagrama de bloques de un sistema de control difuso clásico (Tipo I)	29
Figura 4 Diagrama de bloques de componentes de un sistema de control difuso de segundo orden	30
Figura 5 Representación de los conjuntos de un sistema de control difuso de segundo orden (Tipo II)	31
Figura 6 Conjunto difuso Tipo-2 de intervalo (A^{\sim})	33
Figura 7 Diagrama de bloques del modelo de simulación por computadora	34
Figura 8 Diagrama de proceso de un control de temperatura	34
Figura 9 Esquema gráfico de un horno eléctrico industrial	36
Figura 10 Entorno gráfico de Matlab.	39
Figura 11 Entorno gráfico de Simulink de Matlab.	40
Figura 12 Entorno gráfico de Toolbox Fuzzy Tipo 1 de Matlab.	41
Figura 13 Entorno gráfico de Toolbox Fuzzy Tipo 2 de Matlab.	42
Figura 14 Horno convencional de resistencias eléctricas	45
Figura 15 Diagrama de bloques del Lazo de control PID en Simulink.	46
Figura 16 Ejecución del comando pathtool en Matlab	48
Figura 17 Ventana para agregar la librería IT2-FLS	49
Figura 18 Ventana de búsqueda para insertar la librería IT2-FLS	49
Figura 19 Ejecución del Toolbox para Fuzzy Logic-Type 2	50
Figura 20 Agregar variables de entrada y salida en la herramienta fuzzyt2	51
Figura 21 Modificar variables de entrada y salida en la herramienta fuzzyt2	52
Figura 22 Ventana para cambiar el rango y tipo de las Funciones de Membresía de las variables	53
Figura 23 Modificar el tipo de las Funciones de Membresía de las variables	54
Figura 24 Modificar el rango de las Funciones de Membresía de las variables	54
Figura 25 Modificar el nombre y rango de las Funciones de Membresía UMF y LMF de las variables de entrada	55
Figura 26 Variables de entrada definidos nombres y rangos de MFs	56
Figura 27 Variable de salida definida su nombre	57
Figura 28 Mensaje de advertencia en la definición de rangos de las MFs	58
Figura 29 Ventana principal para acceso al editor de reglas	59

Figura 30 Ventana del editor de reglas	59
Figura 31 Guardar modelo diseñado en la herramienta fuzzyt2.....	60
Figura 32 Cargar el modelo fuzzy tipo 2 en Simulink.....	61
Figura 33 Obtención de la ganancia límite K_u	62
Figura 34 Gráfica de respuesta oscilatoria para la obtención P_u	63
Figura 35 Sintonización PID con ingreso de variables calculadas	64
Figura 36 Respuesta de la sintonización PID con ingreso de variables calculadas	64
Figura 37 Sintonización automática del lazo PID.....	65
Figura 38 Gráfica de simulación por sintonización automática del lazo PID.....	66
Figura 39 Parámetros de simulación por sintonización automática del lazo PID.....	66
Figura 40 Diseño del controlador difuso Tipo 2.....	67
Figura 41 Diseño del controlador en lazo cerrado en Simulink	68
Figura 42 Gráfica de respuesta simulación de los controladores PID y Difuso Tipo 2	68

Resumen

El diseñar o implementar nuevos sistemas de control tanto en el ámbito educativo como industrial, ha creado la necesidad de investigar y ensayar diversos tipos de control ya sea en un banco de pruebas, en un proceso de producción o bajo simulación. En la actualidad existen muchos procesos en los que se requiere implementar un controlador, ya que sin ellos las líneas de producción y su estudio se retrasarían en relación al avance de la industria y la educación. Los controladores con lógica difusa y sus variaciones han brindado una nueva opción para el estudio y su implementación en procesos industriales, y específicamente para el objeto de estudio el control difuso tipo II de Takagi-Sugeno-Kang adaptado a alguno de los algoritmos ya existentes. En base a la necesidad de experimentar el controlador difuso tipo II esta investigación plantea el diseño e implementación de un control de temperatura bajo el software de simulación Simulink de Matlab con la herramienta IT2FLS desarrollada por el profesor Kumbasar, T. en el 2015, empleado para el diseño de un horno eléctrico de resistencias convencional de temperatura orientado a un laboratorio virtual en la cual se experimentará el comportamiento del sistema difuso tipo II con presencia de perturbaciones.

Palabras Clave: Control Difuso, Control Difuso Tipo II, Temperatura, Simulación, Sistemas de Control.

Abstract

The design or implementation of new control systems both in the educational and industrial field, has created the need to investigate and test various types of control either on a test bench, in a production process or under simulation. Currently there are many processes in which it is required to implement a controller, because without them the production lines and their study would be delayed in relation to the advancement of industry and education. The fuzzy logic controllers and their variations have provided a new option for the study and its implementation in industrial processes, and specifically for the object of study the Takagi-Sugeno-Kang type II fuzzy control adapted to some of the existing algorithms. Based on the need to experiment with the type II fuzzy controller, this research proposes the design and implementation of a temperature control under Matlab's Simulink simulation software with the IT2FLS tool developed by Professor Kumbasar, T. in 2015, used for the design of a conventional temperature resistance electric furnace oriented to a virtual laboratory in which the behavior of the type II diffuse system with the presence of disturbances will be experimented.

Keywords: Fuzzy Control, Fuzzy Control Type II, Temperature, Simulation, Control Systems.

Capítulo I:

Contenidos Generales

Antecedentes

Los controladores han ido evolucionando en gran medida pues su estudio e implementación se han profundizado cada vez más por la existente necesidad de controlar procesos ya sea desde el más sencillo hasta el más complejo de estos.

En la actualidad se requiere generar controles inteligentes a través de la unión de especialidades como son el sistema de control y la inteligencia artificial, en forma específica la parte de lógica difusa que permiten integrar en un mismo sistema las decisiones adecuadas para que su control sea más eficiente.

Los sistemas difusos se utilizan para crear aplicaciones de ingeniería, principalmente en las áreas de automática y robótica. Los conjuntos de la lógica difusa fueron introducidos con el propósito de procesar datos de incertidumbre no probabilística (Zadeh, 1965). Según Farfán, Ruz y Rullan, (2014) los sistemas difusos tipo 2 pueden manejar este tipo de incertidumbres y además tienen la capacidad de modelar sistemas complejos no lineales, logrando un mejor desempeño de los controladores diseñados bajo este enfoque.

En (Hassani, 2015), se realiza un controlador difuso tipo II de intervalo óptimo para el control de velocidad de motores de corriente continua bajo perturbaciones de carga y sin perturbaciones, en este trabajo se proporciona la comparación entre los sistemas difusos tipo I y tipo II.

En Yasmine and Marutheeswar (2015), realiza un estudio comparativo del control de temperatura del sistema de un intercambiador de calor utilizando el controlador de lógica difusa tipo II y el controlador PI, utilizando simulaciones basados en un modelo matemático de quinto orden del sistema de intercambiador de calor Double Pipe.

En A. Al-Mahturi, F. Santoso, M. A. Garratt and S. G. Anavatti (2019), se realiza un sistema de control utilizando lógica difusa tipo II y la compara con un controlador clásico PID en presencia de perturbaciones y variación de parámetros aplicado a un péndulo invertido bajo simulación mediante Simulink.

(J. J. Brito, P. Toledo and S. Alayón, 2018) proponen crear laboratorios virtuales para simulación de plantas industriales e insertar este método en la educación de ingeniería y mostrar de una forma interactiva el funcionamiento y control de procesos reales, este trabajo basa su diseño en software de simulación Autodesk Inventor y Simulink (Matlab).

El propósito general de este proyecto de investigación consiste en diseñar un controlador difuso tipo 2 estable para controlar la temperatura de un horno convencional simulado bajo Simulink de Matlab, en presencia de perturbaciones.

Planteamiento del problema

A nivel mundial existen procesos de producción que utilizan hornos dentro de una de sus etapas para la elaboración de un determinado producto, por ejemplo: en el sector alimenticio los lácteos, harinas, pizzerías, panaderías, etc.; o en el ámbito industrial como cementeras, en producción de asfalto, etc.; así como también en el medio artesanal.

En las poblaciones de Ecuador uno de los procesos de producción que mueve la economía es la alimentación. En este contexto la dieta diaria del ecuatoriano se basa en el consumo del pan; el proceso de elaboración y cocción de este comestible en gran medida se realiza de forma artesanal es decir, que una vez preparada la masa se utiliza un horno ya sea que tenga o no una temperatura establecida, la misma que es programada por la experticia del artesano y en muchos de los casos da como resultado un producto que puede estar en condiciones de ser consumido por la población, pero que algunas veces la cocción no es la adecuada lo que produce desperdicios que ya no son aptos para la venta, y representa pérdidas económicas.

En la actualidad existen hornos de control automático de temperatura que utilizan controladores clásicos como el PID, pero aún se mantiene la práctica de monitorear eventualmente el alimento para cuidar su cocción el cual pone como base principal de control la experticia del artesano.

Ante las falencias de este proceso de producción, una de las posibles soluciones que se plantea con este proyecto de investigación es que en el sistema de control para la cocción ya sea de este alimento específico o de otros que usen el mismo procedimiento se pueda implementar un control inteligente difuso tipo II, para mejorar la técnica de elaboración de los alimentos o en otra línea de producción y dejar de lado el constante monitoreo por parte del artesano.

Objetivos

Objetivo general del proyecto

- Diseñar un sistema de control de temperatura utilizando un controlador inteligente difuso tipo II para un horno convencional.

Objetivos específicos del proyecto

- Investigar la bibliografía de lógica difusa tipo II y el uso de la herramienta de software para su simulación.
- Diseñar un controlador difuso tipo II para el control de temperatura de un horno.
- Simular un proceso de temperatura basado en el funcionamiento de hornos convencionales para producción de alimentos.
- Analizar el funcionamiento y comportamiento del controlador difuso tipo II de temperatura.
- Comparar la respuesta de un controlador difuso tipo II y un clásico PID en base a su implementación en el control de temperatura de un horno.

Justificación, importancia y alcance del proyecto

Los sistemas de control permiten asegurar el buen funcionamiento de procesos industriales automáticos, mejorando el monitoreo y control de sus variables permitiendo que las cadenas de producción puedan ofrecer productos elaborados de calidad ideales para el consumo de la población.

En tal razón, investigar acerca de nuevos métodos para controlar procesos sencillos o complejos permite ampliar el campo de acción de la automatización industrial para brindar más y mejores opciones para controlar procesos de producción, y en el ámbito educativo brindar conocimientos más apropiados acorde a la evolución de la tecnología.

En el país existe un sin número de procesos en los que se ha implementado un sistema de control para la automatización de su producción o simplemente para el monitoreo de un proceso de elaboración de algún producto, pero aún están presentes muchos procesos en los cuales se requiere implementar un controlador.

Por lo ya mencionado es importante el estudio para el trabajo de investigación propuesto, que centra su experimento en un control de temperatura para un horno convencional utilizando un controlador inteligente difuso tipo II el cual será desarrollado bajo simulación con el Simulink de Matlab.

En conclusión y basado en la importancia de la presencia de controladores ya sea en procesos sencillos o complejos en todos los sectores que necesiten el adecuado manejo de variables y su monitoreo, el estudio del control difuso tipo II aplicado para controlar la temperatura de un horno permitirá ahondar y ampliar los conocimientos acerca de los sistemas de control al compararlo con un PID clásico y que se puedan aplicar en procesos relacionados con en el diario vivir de la población.

Hipótesis de investigación

La simulación de un control de temperatura en un horno convencional permitirá determinar que el uso de controladores avanzados ayuda a mejorar la respuesta de un proceso.

Categorización de las variables de investigación

En consecuencia, de la hipótesis planteada se identifican las siguientes variables:

- **Variable Dependiente:** Temperatura.
- **Variable Independiente:** Controlador difuso tipo II.

La operacionalización de las variables identificadas se muestra en Tabla 1:

Tabla 1*Operacionalización de las Variables*

VARIABLES	TIPO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Temperatura	Dependiente	Es la magnitud que mide la energía térmica de un cuerpo en relación a otro.	Variable que determina el punto óptimo de operatividad de un horno convencional .	Niveles de temperatura	Porcentaje de variación de la temperatura deseada.
Control Difuso Tipo II	Independiente	Conjunto de variables lingüísticas que puede manejar incertidumbres no probabilísticas para realizar el control de un proceso.	Controlador utilizado para mejorar la respuesta de un horno convencional .	Eficiencia del controlador. Velocidad de respuesta del controlador.	Porcentaje de variación respecto a la temperatura deseada.

Nota. Esta tabla muestra las características de las variables dependientes e independientes.

Capítulo II:

Marco teórico referencial

Marco Legal

- La Ley Orgánica de Salud, en el Artículo 6, Numeral 18, señala como responsabilidad del Ministerio de Salud Pública regular y realizar el control sanitario de la producción, importación, distribución, almacenamiento, transporte, comercialización, dispensación y expendio de alimentos procesados, (...) y otros productos para uso y consumo humano; así como los sistemas y procedimientos que garanticen su inocuidad, seguridad y calidad.
- La NFPA 86-2019 se refiere a hornos, secadores y hornos de clase A, clase B, clase C y clase D, así como a oxidantes térmicos. También cubre hornos de panadería, generadores de atmósfera y sistemas que suministran hornos de clase C, así como "tanques de enfriamiento integral o baños de sales fundidas".
- El Reglamento de Régimen Académico, en el Artículo 45, menciona, que las IES cuyas fortalezas o dominios académicos se encuentren relacionados directamente con los ámbitos productivos, sociales, culturales y ambientales podrán formular e implementar proyectos institucionales de investigación aplicada para el desarrollo de modelos prototípicos y de adaptación de técnicas, tecnologías y metodologías. Las IES podrán articular estos proyectos de investigación con las necesidades de cada territorio, país o región.

Marco conceptual

Dentro de los sistemas de control de procesos existen un sin número de conceptos sin embargo para este trabajo de investigación se enuncian aquellos que estén directamente relacionados con el controlador difuso tipo II de un proceso de control de temperatura.

Modelamiento Matemático

Una definición de modelo matemático es la siguiente: un modelo matemático es una construcción matemática abstracta y simplificada relacionada con una parte de la realidad y creada para un propósito particular. Así, por ejemplo, un gráfico, una función o una ecuación pueden ser modelos matemáticos de una situación específica (Chovet, 2004).

En ingeniería la representación más común de los modelos matemáticos son las funciones de transferencia a partir de ecuaciones de espacio estados, para ello se debe entender el concepto de espacio de estados y sus variables.

- **Espacio de estados:** Espacio de estados se denomina, a un espacio cualquiera de n dimensiones en el cual los eje coordenados radican en el eje x_1 , el eje x_2, \dots , en el x_n . Se puede detallar que cualquier punto puede representar a cualquier estado dentro del espacio de estado. (Ogata, 2010)
- **Variables de estado:** Se puede decir que las variables de estado son aquellas que conforman el conjunto de menor tamaño de variables que establecen el estado de un sistema dinámico. Para describir de forma completa el comportamiento de un sistema de orden n , se necesita por lo menos n variables x_1, x_2, \dots, x_n que puedan describir la forma en la que se comporta el sistema con el mismo orden. Es decir, el conjunto de variables de estado con las n variables. (UNER, 2017).
- **Ecuaciones de espacio de estados:** Para el estudio en espacio de estados es importante concentrar el análisis en los tres tipos de variables que influyen en el modelado de los sistemas dinámicos, como son: las variables de entrada, variables de salida y las variables de estado. Uno de los principales beneficios de la representación en espacio de estados es que mediante su modelado se logra representar sistemas lineales o no lineales, continuos o discretos y se puede usar generalmente en notación matricial (UNER, 2017).

Las formas de las ecuaciones de estado son de primer orden, estas utilizan vectores de estado como se indica en las Ecuaciones 1 y 2.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (1)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t), t) \quad (2)$$

Donde:

u : vector de las entradas al sistema.

y : vector de las salidas del sistema.

x : vector de variables de estado del sistema.

Cuyos vectores de pueden representar de la siguiente forma representada en la Ecuación 3.

$$x = \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ \cdot \\ \cdot \\ xn \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} y1 \\ y2 \\ \cdot \\ \cdot \\ yn \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u1 \\ u2 \\ \cdot \\ \cdot \\ un \end{bmatrix} \quad (3)$$

Sistemas de Control

Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema (Gutiérrez e Iturralde, 2017, Capítulo 5, p. 104).

La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados (Gutiérrez e Iturralde, 2017, Capítulo 5, p. 104).

Un sistema de control según Gutiérrez e Iturralde (2017), es ideal cuando puede ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

1. Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
2. Ser tan eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido. Normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales.
3. Ser fácilmente ejecutable y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador.

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación son: Sensor, Controlador y Actuador.

Controladores

Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado), determina la desviación y produce una señal de control que reducirá la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina acción de control. (Gutiérrez e Iturralde, 2017, Capítulo 5, p. 104).

Los controladores industriales se clasifican, de acuerdo con sus acciones de control, como:

- Sistemas de realimentación. (Feed-back)
- Proporcional
- Integral
- Derivativo
- Sistema anticipativo (Feed-Foward)
- Sistema en cascada (Cascade)
- Sistema selectivo (Over-Ride)
- Lógica Difusa
- Control de restricciones (Constraint Control)
- Control del modelo de referencia (Model Reference Control)
- Optimización de unidades

Controlador PID

Es un mecanismo de control por realimentación que emplea la suma de las acciones de control proporcional, integral y derivativo, por este motivo este control es el más empleado en el control de procesos industriales por su robustez, el cual está ilustrado en la Figura 1.

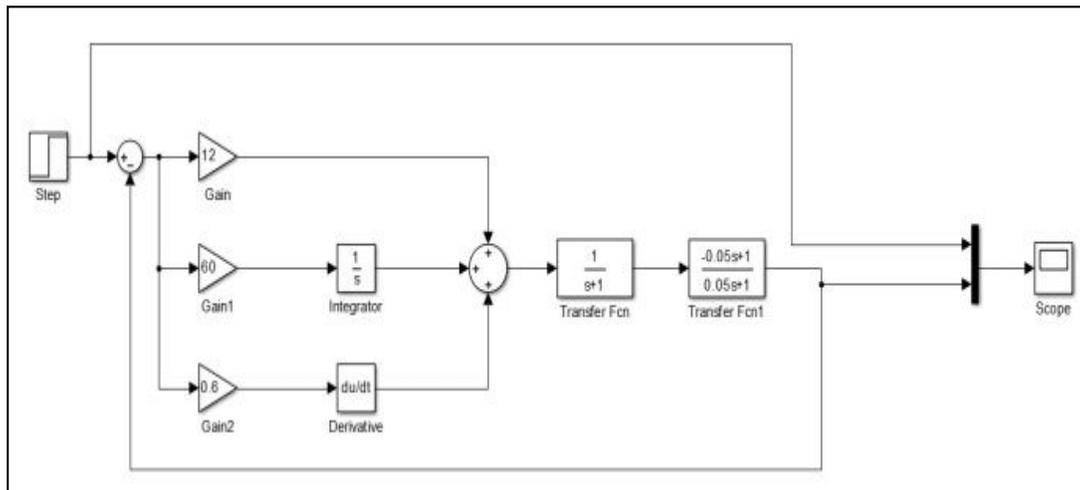
Se estima que más del 90% de los lazos de control emplean control PID, con bastante frecuencia con la ganancia derivada ajustada a cero (control PI). Durante el último medio siglo, una gran cantidad de esfuerzo académico e industrial se ha centrado en mejorar el control de PID, principalmente en las áreas de reglas de ajuste, esquemas de identificación y técnicas de adaptación. Es apropiado en este momento considerar el estado del arte en el control PID, así como los nuevos desarrollos en este enfoque de control (Knospe, 2006).

Los tres términos de un controlador PID cumplen tres requisitos comunes de la mayoría de los problemas de control. El término integral produce un error de estado estable cero en el seguimiento de un punto de ajuste constante, un resultado comúnmente explicado en términos del principio del modelo interno y demostrado usando el teorema del valor final. El control integral también permite el rechazo completo de perturbaciones constantes. Si bien el control integral filtra el ruido del sensor de frecuencia más alta, es lento en respuesta al error actual. Por otro lado, el término proporcional responde inmediatamente al error actual, pero

normalmente no puede lograr la precisión del punto de ajuste deseado sin una ganancia inaceptablemente grande (Knospe, 2006).

Figura 1

Esquema básico de un sistema de control proporcional integral derivativo



Nota. La imagen representa el funcionamiento de un controlador PID simulado en el Software Matlab. Tomado de *Aplicación del control PID y PI λ D μ fraccional a una planta de primer orden con retardo*. Cerro, Isra. 2016. 10.13140/RG.2.2.29825.45920.

Métodos de sintonización de controladores PID

La sintonización de los controladores Proporcional - Integral - Derivativo o simplemente controladores PID, consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros (K_c , T_i , T_d), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto de conformidad con algún criterio de desempeño establecido (Alfaro, 2002).

Para poder realizar la sintonización de los controladores, primero debe identificarse la dinámica del proceso, y a partir de ésta determinar los parámetros del controlador utilizando el método de sintonización seleccionado (Alfaro, 2002).

Métodos de lazo abierto

El controlador cuando está instalado operará manualmente. Produciendo un cambio escalón a la salida del controlador se obtiene la curva de reacción del proceso, a partir de la

cual se identifica un modelo para el mismo, usualmente de primer orden más tiempo muerto. Este modelo es la base para la determinación de los parámetros del controlador (Alfaro, 2002).

Métodos de lazo cerrado

El controlador opera automáticamente produciendo un cambio en el valor deseado se obtiene información del comportamiento dinámico del sistema para identificar un modelo de orden reducido para el proceso, o de las características de la oscilación sostenida del mismo, para utilizarla en el cálculo de los parámetros del controlador. Se restringirá la presentación de los métodos de sintonización y de los resultados de la comparación, a aquéllos desarrollados para los controladores PID que operan como reguladores y utilizan un modelo del proceso. Existen varios tipos de métodos de lazo cerrado entre los que se pueden mencionar: Regulación automática, Método del Tanteo, Ziegler y Nichols (Ganancia límite, Curva de reacción), Cohen y Coon, López et al., Kaya y Sheib, Sung et al. (Alfaro, 2002).

- *Método de Tanteo*: Según Creus, A. (2010), en su libro Instrumentación Industrial menciona que el método de tanteo requiere que el controlador y el proceso estén instalados completamente y trabajando en su forma normal. El procedimiento general se basa en poner en marcha el proceso con bandas anchas en todas las acciones y estrecharlas, poco a poco individualmente, hasta obtener la estabilidad deseada. Para provocar cambios de carga en el proceso, y observar sus reacciones, se mueve el punto de consigna arriba y abajo en ambas direcciones, lo suficiente para lograr una perturbación considerable, pero no demasiado grande que pueda dañar el producto, perjudicar la marcha de la planta o bien crear perturbaciones intolerables en los procesos asociados.

Al ajustar los controladores P + I + D se procede del siguiente modo: Con la banda derivada en 0 y la integral en minutos/repetición, se aumenta la ganancia proporcional (se estrecha la banda proporcional) hasta obtener una relación de amortiguamiento de 0,25. Se aumenta, lentamente, la banda integral en la forma indicada anteriormente hasta acercarse al punto de inestabilidad. Se aumenta la banda derivada en pequeños incrementos, creando, al mismo tiempo, desplazamientos del punto de consigna hasta obtener en el proceso un comportamiento cíclico, reduciendo ligeramente la última banda derivada. Después de estos ajustes, puede aumentarse normalmente la ganancia proporcional (disminuir la banda proporcional) con mejores resultados en el control.

Hay que señalar que una acción derivada óptima, después de una perturbación, lleva la variable a la estabilización en muy pocos ciclos.

- *Método de ganancia límite (Ziegler y Nichols):* Creus, A. (2010), en su libro Instrumentación Industrial describe a este método permite calcular los tres términos de ajuste del controlador a partir de los datos obtenidos en una prueba rápida de características del lazo cerrado de control. El método supone que el proceso es de primer orden y se basa en aumentar gradualmente la ganancia (o estrechar gradualmente la banda proporcional) con los ajustes de integral y derivada en su valor más bajo (integral = infinito número de minutos/ repetición o cero repeticiones/minuto y derivada = 0 minutos de anticipo), mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empieza a oscilar de modo continuo. Esta ganancia proporcional se denomina ganancia límite (o banda proporcional límite = P_{Bu} = Proportional Band Ultimate). Se anota el período del ciclo de las oscilaciones P_u en minutos, y la última ganancia límite K_c (o la última banda proporcional P_{Bu}). Los ajustes de control que producirán, aproximadamente, una respuesta con una relación de amplitudes 0.25, se calculan como sigue:

Controlador proporcional: Ganancia = $0,5 K_c \times \text{Banda proporcional (\%)} = 2 P_{Bu}$

Controlador proporcional + integral: Ganancia = $0,45 K_c \times \text{Banda proporcional (\%)} = 2,2 P_{Bu}$. y la Banda integral (min/rep) = $P_u/1,2$

Controlador proporcional + integral + derivado: Ganancia = $0,6 K_c \times \text{Banda proporcional (\%)} = 1,7 P_{Bu}$. La Banda integral (min/rep) = $P_u/2$ y la Banda derivada (minutos) = $P_u/8$.

- *Regulación Automática:* Creus, A. (2010), en su libro Instrumentación Industrial detalla que en casos en los que se requiere manejar varios lazos de control y existiese uno o dos responsables del proceso, es recomendable elegir un instrumento controlador que disponga de un algoritmo de autoajuste de las acciones de control que le permita sintonizar una amplia gama de procesos industriales, los controladores comerciales disponen de velocidades de respuesta seleccionables (lenta, media y rápida) y el controlador selecciona, automáticamente, las reglas del autoajuste. Muchos controladores comerciales autoajustables estimulan el proceso con un ciclo limitado de oscilaciones para no perturbarlo excesivamente, y otros se limitan a trabajar con una sola oscilación.

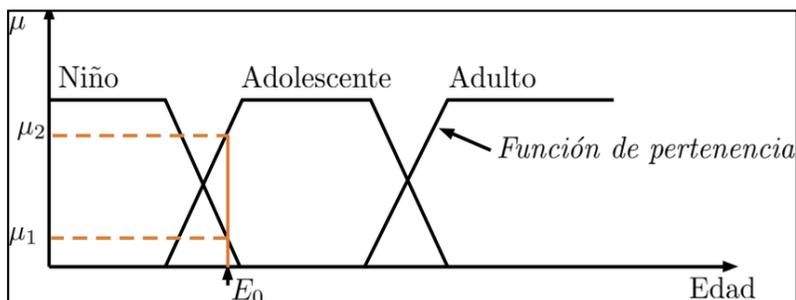
Existen varias formas de realizar el autoajuste: a) La aplicación de una señal de prueba al proceso, y el análisis de su respuesta con la obtención de un modelo matemático y el diseño analítico del controlador, o bien el uso de las formas del método de ganancia límite de Ziegler y Nichols, o b) El análisis continuo u ocasional (ante una perturbación o una modificación del punto de consigna) del proceso sin aplicar señales de prueba, sin perturbar, pues, el proceso, pero con el inconveniente de no detectar los cambios lentos del mismo. Se trata de controladores *adapta vos*. El ordenador puede utilizarse para ajustar las acciones de control con técnicas "o-line", que trabajan con modelos dinámicos del proceso, y con técnicas "on-line", que identifican la dinámica del proceso con la planta en operación.

Lógica Difusa

La lógica difusa apareció por primera vez en 1965 por Lofti Zadeh, fue matemático, ingeniero eléctrico, informático y profesor, en su investigación define a la lógica difusa o conjuntos difusos como una función que asigna a cada objeto un grado de pertenencia que varía entre cero y uno, como se puede observar en la Figura 2. Las nociones de inclusión, unión, intersección, complemento, relación, convexidad, etc., se extienden a tales conjuntos, y se establecen diversas propiedades de estas nociones en el contexto de conjuntos difusos. En particular, se prueba un teorema de separación para conjuntos difusos convexos sin requerir que los conjuntos difusos sean disjuntos. (Zadeh, 1965).

Figura 2

Descripción gráfica de un conjunto difuso



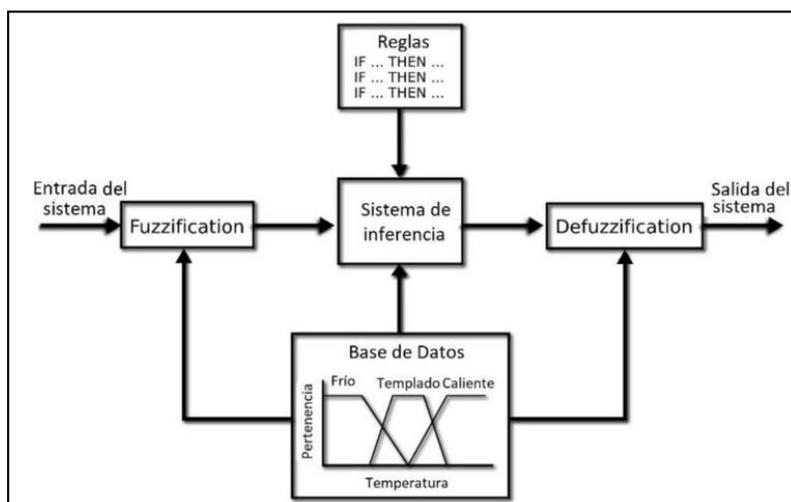
Nota. El gráfico representa un conjunto difuso sencillo en el cual da un grado de pertenencia o nombre para un determinado rango de edades. Tomado de *Riesgo Químico: Un Modelo Computacional de Cálculo Mediante Lógica Difusa*, por Obando, Oscar & Garita, Cesar, 2017.

Control Difuso

La lógica difusa en la que se basa el control difuso, tiene un espíritu mucho más cercano al pensamiento humano y al lenguaje natural que los sistemas lógicos tradicionales. Básicamente, proporciona un medio efectivo para capturar la naturaleza aproximada e inexacta del mundo real. Visto desde esta perspectiva, la parte esencial del controlador de lógica difusa (FLC) es un conjunto de reglas de control lingüístico relacionadas por los conceptos duales de implicación difusa y la regla de inferencia. Como se puede corroborar en la Figura 3, en esencia, el FLC proporciona un algoritmo que puede convertir la estrategia de control lingüístico basada en el conocimiento experto en una estrategia de control automático. (C. C. Lee, 1990).

Figura 3

Diagrama de bloques de un sistema de control difuso clásico (Tipo I)



Nota. El gráfico muestra un diagrama de bloques básico el cual explica de manera sencilla la forma y fondo de cómo actúa el control difuso sobre un proceso. Tomado de *Desarrollo de un sistema domótico con controlador difuso y controlador manual, implementado en LabView y Arduino IDE. Research in Computing Science. 147. 249-264. 10.13053/rcs-147-6-19.*

Fernández, José & Varela, David, 2018.

Control Difuso Tipo II

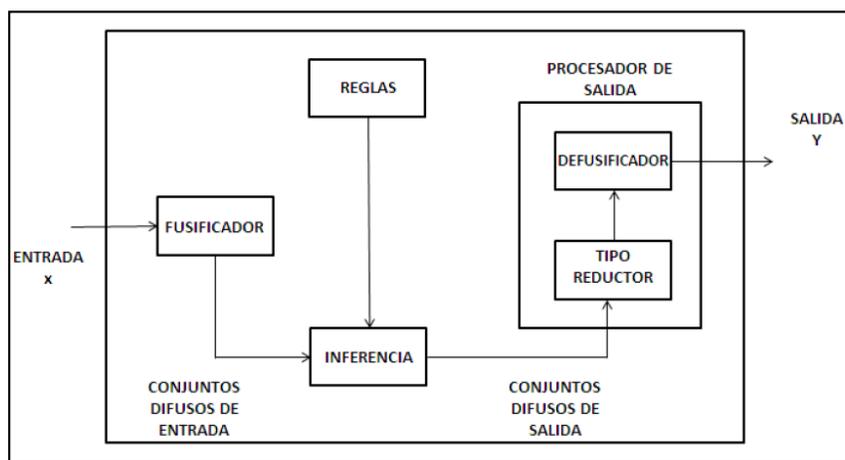
Una nueva clase de conjuntos lógicos difusos de mayor orden denominados tipo-2, fueron introducidos por Zadeh en 1975 como una extensión de los conjuntos difusos ordinarios (tipo-1). Tales conjuntos pueden manejar las incertidumbres presentes en los sistemas debido

a que sus grados de pertenencia son así mismos conjuntos difusos tipo-1. Una justificación para el uso de conjuntos difusos de tipo-2 es la incertidumbre que puede existir en los sistemas en los que se aplican conjuntos difusos tipo-1. Esta incertidumbre puede presentarse en distintas formas: reglas con diferente significado para diferentes expertos; consecuentes que difieren para reglas idénticas según diferentes expertos; ruido presente en los en los transductores de medición de las variables físicas o en la naturaleza misma de las variables involucradas y diferencias entre el modelo matemático y el sistema real.

Así, se puede pensar en los conjuntos difusos tipo-1, como conjuntos difusos con aproximación de primer orden para la representación de la incertidumbre. Siendo de esta forma en la Figura 4 se representa que los conjuntos difusos tipo-2 son una aproximación de segundo orden de la incertidumbre presente en situaciones del mundo real (E. Medina y D. Romero, 2018).

Figura 4

Diagrama de bloques de componentes de un sistema de control difuso de segundo orden



Nota. El gráfico representa el diagrama de bloques del control difuso tipo II para el manejo de un proceso. Tomado de *Control Difuso Tipo 2 en el Enfoque de Lyapunov Aplicado a un Servomecanismo*. Farfán Martínez R., Ruz Hernández J.A., Rullan Lara J.L., Torres Hernández W., Flores-Morales J.C., 2014

Conjuntos Difusos Tipo II

Los conjuntos difusos y la lógica difusa, son el fundamento de los sistemas difusos, han sido desarrolladas buscando modelar la forma como el cerebro manipula información inexacta.

Los conjuntos difusos tipo-2, se usan para modelar incertidumbre e imprecisión (Castro et. al, 2006).

Los conjuntos difusos Tipo-2, cuya función de pertenencia secundaria es un intervalo (es decir que la incertidumbre asociada al lenguaje es tratada de manera equitativa), son llamados conjuntos difusos de intervalo o IT2FSs (por sus siglas en inglés) o también conjuntos difusos Tipo-2 de intervalo (IT2FSs), ya que los grados de pertenencia asignados a los elementos del universo de discurso son un intervalo (Rodríguez y Huertas, 2016).

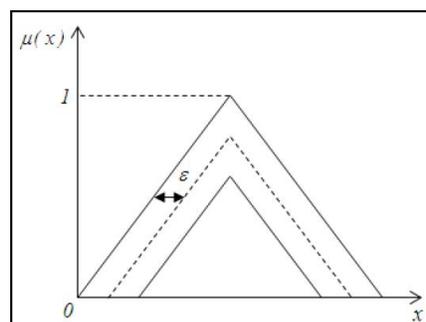
Zadeh además explica que un IT2FS es expresado por dos funciones de pertenencia, donde una representa el grado de pertenencia en X y la otra da una ponderación a cada uno de los conjuntos difusos Tipo-1. Así, un IT2FS es definido como en la Ecuación 4 (Rodríguez y Huertas, 2016):

$$\tilde{A} = \{(x, u_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X \quad (4)$$

Las funciones de membresía (pertenencia) en los sistemas difusos tipo 2 se caracterizan por una función de membresía superior y una función de membresía inferior; el intervalo entre estas dos funciones puede variarse para obtener un desempeño óptimo. Cada una de estas funciones puede ser representada como una función de membresía de sistemas difusos tipo 1. En la Figura 5 se aprecia una función de membresía tipo 2 (Farfán et. al, 2014).

Figura 5

Representación de los conjuntos de un sistema de control difuso de segundo orden (Tipo II)



Nota. El gráfico representa el diagrama de bloques del control difuso tipo II para el manejo de un proceso. Tomado de *Control Difuso Tipo 2 en el Enfoque de Lyapunov Aplicado a un Servomecanismo*. Farfán Martínez R., Ruz Hernández J.A., Rullan-Lara J.L., Torres Hernández W., Flores-Morales J.C., 2014

Incertidumbre y clasificación

La incertidumbre, es "la imperfección en el conocimiento sobre el estado o los procesos de la naturaleza". La incertidumbre estadística es "la aleatoriedad o el error proveniente de varias fuentes como las descritas al usar la metodología estadística" (Castro et. al, 2006).

Hay varias fuentes de incertidumbre en el cálculo y evaluación. Los cinco tipos de incertidumbre, que emergen de un conocimiento impreciso del estado de la naturaleza son (Castro et. al, 2006):

- Incertidumbre en la medición, es el error en las cantidades observadas.
- Incertidumbre en el proceso, es la aleatoriedad subyacente en la dinámica.
- Incertidumbre en el modelo, es la especificación errónea de la estructura del modelo.
- Incertidumbre en la estimación, es la que puede resultar de cualquiera, o de una combinación, de las incertidumbres descritas anteriormente y es la inexactitud e imprecisión.
- Incertidumbre en la implementación, es la consecuencia de la variabilidad que resulta de una política de ordenación, i.e. incapacidad para alcanzar exactamente el objetivo de una estrategia.

La lógica difusa, es una tecnología basada en reglas que tolera imprecisiones e incluso las aprovecha para resolver problemas que antes no tenían solución (Castro et. al, 2006).

Huella de Incertidumbre

La Huella de incertidumbre es también conocida como FOU (Footprint of Uncertainty) por sus siglas en inglés, de los conjuntos difusos Tipo-2 define la incertidumbre de \tilde{A} como la unión de todas las pertenencias primarias cuya representación se puede encontrar en la Ecuación 5 (Rodríguez y Huertas, 2016).

$$FOU(\tilde{A}) = \bigcup_{x \in X} J_x \quad (5)$$

Donde J_x es el conjunto difuso primario que está ponderado por el conjunto difuso $f_x(u)$ como una función de pertenencia secundaria como indica la Ecuación 6:

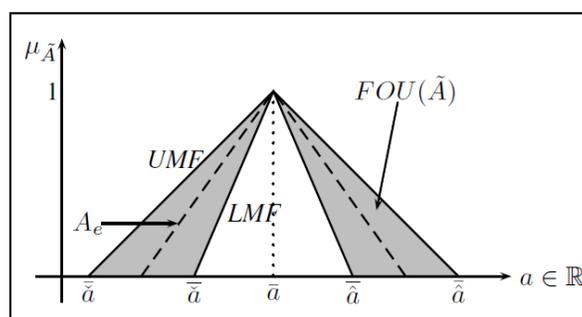
$$\tilde{A} = \{((x, u), J_x, f_x(u)) \mid x \in X; u \in [0,1]\} \leftrightarrow f_x(u) = 1 \quad (6)$$

donde x es la variable primaria, J_x es un intervalo $[0,1]$ que representa la pertenencia primaria de x , u es la variable secundaria y $f_x(u)$ es la función de pertenencia secundaria de x .

La FOU la cual está limitada por dos funciones de pertenencia: una función de pertenencia superior (UMF, Upper membership function, por sus siglas en inglés) $\bar{u}_{\tilde{A}}(x)$ y una función de pertenencia inferior (LMF, Lower membership function, por sus siglas en inglés) $\underline{u}_{\tilde{A}}(x)$ donde son conjuntos difusos Tipo-1 y tienen e conjuntos empotrados A_e ; en consecuencia el grado de pertenencia de cada elemento de un IT2FS es un intervalo $\underline{u}_{\tilde{A}}(x), \bar{u}_{\tilde{A}}(x)$, la interpretación grafica de estos enunciados se identifican en la Figura 6.

Figura 6

Conjunto difuso Tipo-2 de intervalo (\tilde{A})



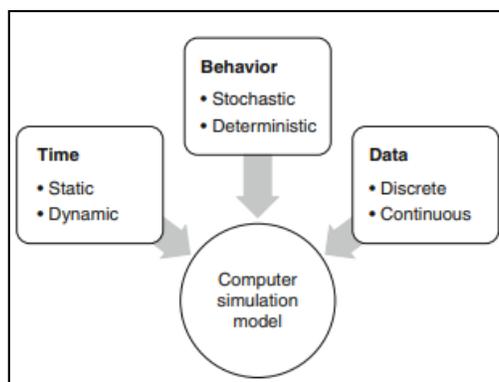
Nota. El gráfico representa un conjunto difuso con una función de membresía principal y sus respectivos UMF, LMF y huella FOU. Tomado de *Rodríguez Ayala, M. L., & Huertas Moreno, Y. E. (2016). Metodología para el Diseño de Conjuntos Difusos Tipo-2 a partir de Opiniones de Expertos. Ingeniería, 21(2), 121–137.*

Simulación

Es una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. En la Figura 7 se muestra la forma en la cual estos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógico que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos sociales, biológicos, físicos, o químicos a través de largos períodos de tiempo (R. Bú, 1994).

Figura 7

Diagrama de bloques del modelo de simulación por computadora



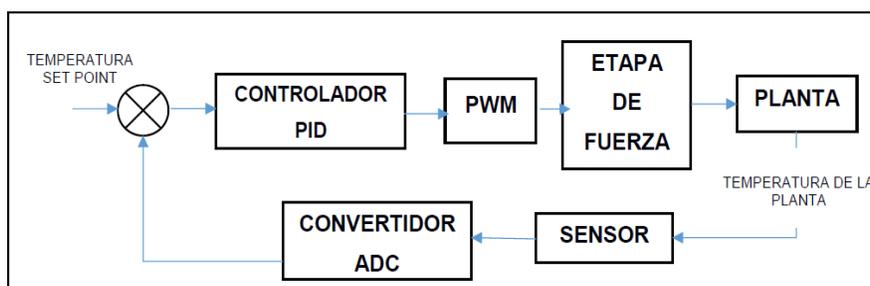
Nota. El contenido de la figura muestra un diagrama de bloques el cual representa la forma en la cual funciona una simulación computacional. Adaptado de Ifenthaler D. (2012) Computer Simulation Model. In: Seel N.M. (eds) *Encyclopedia of the Sciences of Learning*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_500.

Control de Temperatura

Una aplicación de la ingeniería de control es el control de temperatura ya sea en una habitación, sala, o en cualquier área determinada en el interior de una edificación. Lo que se quiere es mantener la temperatura en un valor deseado, sin importar que, al abrir las ventanas, puertas y la temperatura del exterior, haga que la cantidad de calor que pierda la habitación sea variable como se explica en la Figura 6. Es por ello que el sistema de calefacción se debe de modificar para remediar esas perturbaciones (Godínez et al., 2004).

Figura 8

Diagrama de proceso de un control de temperatura



Nota. El Diagrama de bloques de la Figura muestra el algoritmo de control general para un proceso de temperatura. Tomado de "Desarrollo de un sistema de extrusión de filamento para impresión 3D de bajo costo", Hurel, Jorge & Muñoz, Cristian & Reyes, Néstor, 2018.

10.13140/RG.2.2.13677.28642.

Transferencia de Calor

La transferencia de calor es el proceso físico de propagación del calor en distintos medios, de manera general existen tres formas de transferencia de calor que son: conducción, convección y radiación.

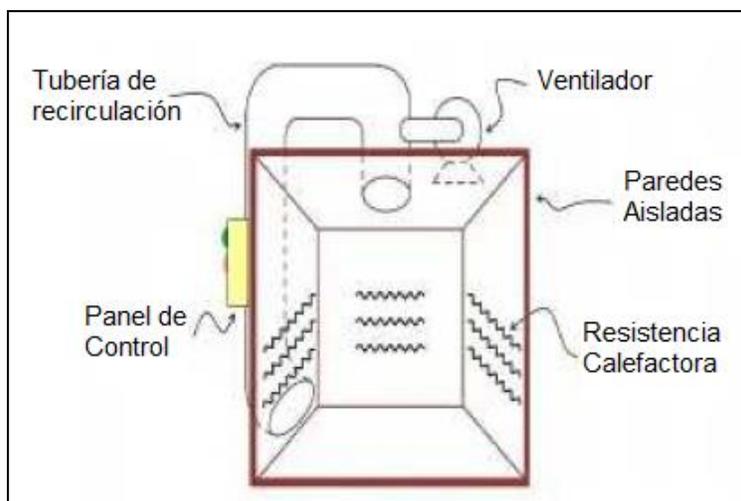
- ***Conducción:*** La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases, (Aguirre & Sánchez, 2014).
- ***Convección.*** En la transferencia de calor por convección se da cuando el calor es transferido por el movimiento relativo de partes del cuerpo calentado de forma natural o forzada (Aguirre & Sánchez, 2014).
- ***Radiación.*** La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor (Aguirre & Sánchez, 2014).

Horno Eléctrico

Un horno eléctrico es un dispositivo que genera calor y lo conserva dentro de un compartimiento cerrado como se observa en la Figura 9, se utiliza para cocción de alimentos y en el sector industrial para varios procesos de manufactura, los niveles de su fuente de energía dependen del entorno de aplicación (Robalino L. & Sánchez A. 2016).

Figura 9

Esquema gráfico de un horno eléctrico industrial



Nota. La Figura representa la composición física de manera general de un horno eléctrico industrial. Adaptado de *Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de Temperatura dentro de un horno industrial de resistencia*. Guarochico, V. Morán, M. Martín, M. 2012. Quito: EPN.

Clasificación de Hornos Eléctricos

Los hornos eléctricos tienen una diversidad de aplicaciones tanto en el área industrial como doméstica, debido a eso existe varias clasificaciones, una de ellas la que se presenta a continuación (Robalino L. & Sánchez A. 2016).

Por su Tipo de Operación

Por su tipo de operación se los puede clasificar en continuos, semicontinuos e intermitentes.

- **Continuos:** en esta sub clasificación podemos encontrar los hornos tipo túnel, rotatorios y los reactores, la principal característica es que la temperatura tiene una relación de dependencia con la distancia a la que se encuentre el cuerpo de cocción (Robalino L. & Sánchez A. 2016).
- **Semicontinuos:** Este tipo de hornos se tiene que la carga es estática, pero el quemador pasa a todas las zonas del horno, el más común en la industria es el

denominado horno Hoffman aplicado en el sector ladrillero. La característica que los destaca es que la temperatura y el tiempo tienen una dependencia parabólica (Robalino L. & Sánchez A. 2016).

- **Intermitentes:** Estos equipos son muy poco comunes debido a su baja eficiencia energética, se caracterizan por ser la necesidad de realizar continuamente la colocación de las piezas, el encendido y el vaciado (Robalino L. & Sánchez A. 2016).

Por su Uso

Dependiendo del medio en el que se puede usar se los puede clasificar en industriales y domésticos.

- **Industrial:** Son equipos o dispositivos utilizados en la industria, en los que se calientan piezas por encima de la temperatura ambiente, con el objeto de fundir, realizar tratamientos térmicos, secados y varias funciones semejantes, además de la industrialización de varios alimentos (Robalino L. & Sánchez A. 2016).
- **Doméstico:** Se entiende por horno doméstico a los equipos o dispositivos utilizados en el hogar para cocer, asar, dorar o tostar alimentos mediante la generación de calor que se mantiene dentro de un compartimento cerrado (Robalino L. & Sánchez A. 2016).

Por el Tipo de calentamiento

Por el tipo de calentamiento que puede tener un horno se los puede clasificar en hornos por llamas o eléctricos.

- **Por llamas:** Este equipo se caracteriza por funcionar bajo combustibles sólidos, líquidos o gaseosos; donde la pieza puede ser calentada por la conducción de calor entre las partes o por convección, (Hornos Industriales, 2015).
- **Eléctrico:** Son hornos de alimentación eléctrica, por su facilidad de manejo y comodidad son muy utilizados en el sector industrial y doméstico. Dentro de este grupo encontramos hornos de arco, inducción, resistencias, plasma, haz de electrones y laser (Robalino L. & Sánchez A. 2016).

Por el Tipo de Cocción

Por el tipo de cocción tenemos también varios tipos como son los hornos de radiación, hornos multifunción, hornos microondas y hornos de inducción.

- **Radiación:** Son hornos en donde el calor es entregado bajo el efecto Joule, emitiendo calor por radiación (Robalino L. & Sánchez A. 2016).
- **Multifunción:** En este grupo encontramos que su comportamiento es versátil, el equipo puede funcionar por radiación, conducción o convección (Robalino L. & Sánchez A. 2016).
- **Microondas:** Son equipos que funcionan mediante la generación de ondas electromagnéticas en la frecuencia de las microondas en torno a los 2.5GHz, (Campos electromagnéticos & salud pública: Hornos microondas, 2015).
- **Inducción:** Horno en donde el calentamiento no es por llama ni contacto, su funcionamiento se basa en transformar la energía electromagnética en calórica, esta energía se genera gracias a la alta circulación de corriente alterna (Robalino L. & Sánchez A. 2016).

Por la ubicación en una cocina

Por el tipo de cocción tenemos también varios tipos como son los hornos de radiación, hornos multifunción, hornos microondas y hornos de inducción

- **Combinado con placa de cocción:** Equipo culinario que se encuentra adherido a una placa de cocción (cocina), se encuentra ubicado en la parte inferior de la placa y separado por una gruesa capa de aislante térmico.
- **Independiente:** Equipo culinario, que permite la cocción de alimentos a temperaturas graduables, generalmente empotrados a la pared y soportados en muebles de cocina.

Recursos

El desarrollo integral del trabajo de titulación propuesto en este documento se basa en la utilización del software Matlab y de sus complementos como son Simulink y Fuzzy Logic Designer para la realización del controlador difuso tipo II de temperatura de un horno

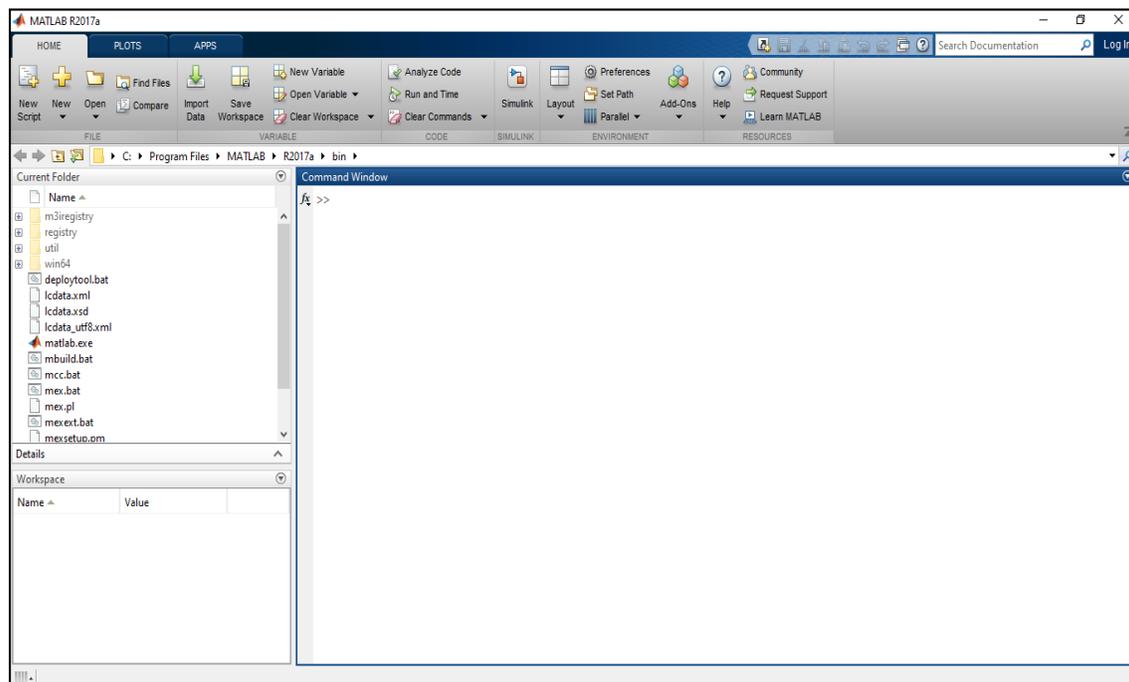
convencional y estudiar su comportamiento bajo simulación, para determinar así la factibilidad de aplicación del mencionado controlador tanto en al ámbito estudiantil como industrial.

Software Matlab

MATLAB es una de las muchas sofisticadas herramientas de computación disponibles en el comercio para resolver problemas de matemáticas, tales como Maple, Mathematica y MathCad. Esta herramienta permite efectuar cálculos matemáticos básicos así también cálculos simbólicos y procesos matemáticos más complicados, como la manipulación de matrices. MATLAB es una abreviatura de Matrix Laboratory, laboratorio matricial. En un nivel fundamental, se puede pensar que este programa es una sofisticada calculadora con base en una computadora capaz de realizar las mismas funciones que una calculadora científica, y muchas más (Moore, 2007). Además, posee un entorno gráfico bastante sencillo y amigable para el usuario como se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Entorno gráfico de Matlab.



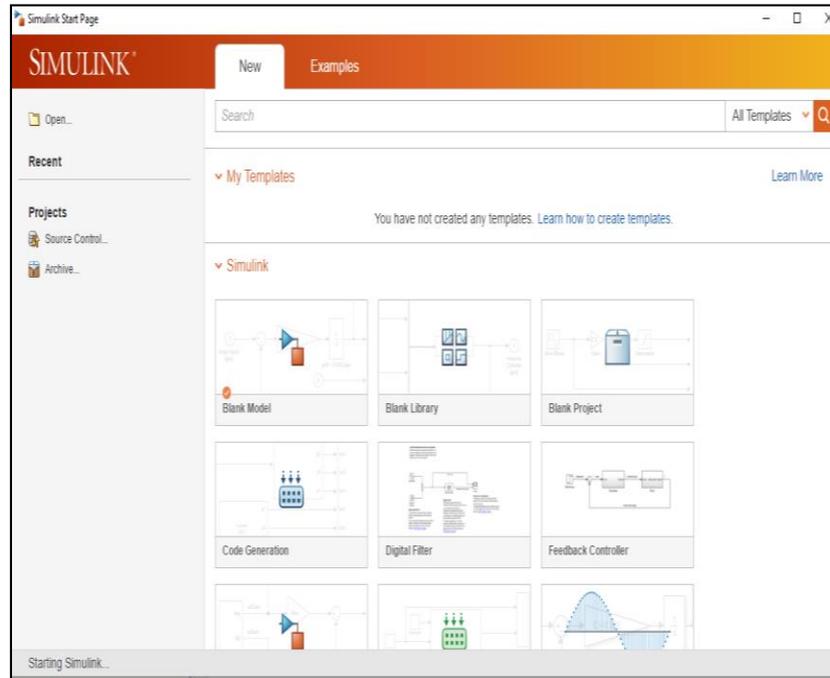
Nota. La Figura representa el entorno gráfico de Matlab IDE 2017. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Herramienta Simulink

Simulink debido a su naturaleza es un programa de interfaz gráfica de usuario, que básicamente utiliza enfoque de diagrama de bloques para simular diferentes sistemas como se puede observar en la Figura 11, se puede utilizar eficazmente en la simulación de diferentes sistemas no lineales. La naturaleza del diagrama de bloques del programa nos permitirá estudiar el comportamiento de los sistemas bajo diferentes no linealidades. Esto nos permitirá utilizar el software para investigar el tiempo de escape finito, equilibrios múltiples, ciclos límite y su naturaleza (estable o inestable) (Azemi, A. et al., 1996).

Figura 11

Entorno gráfico de Simulink de Matlab.



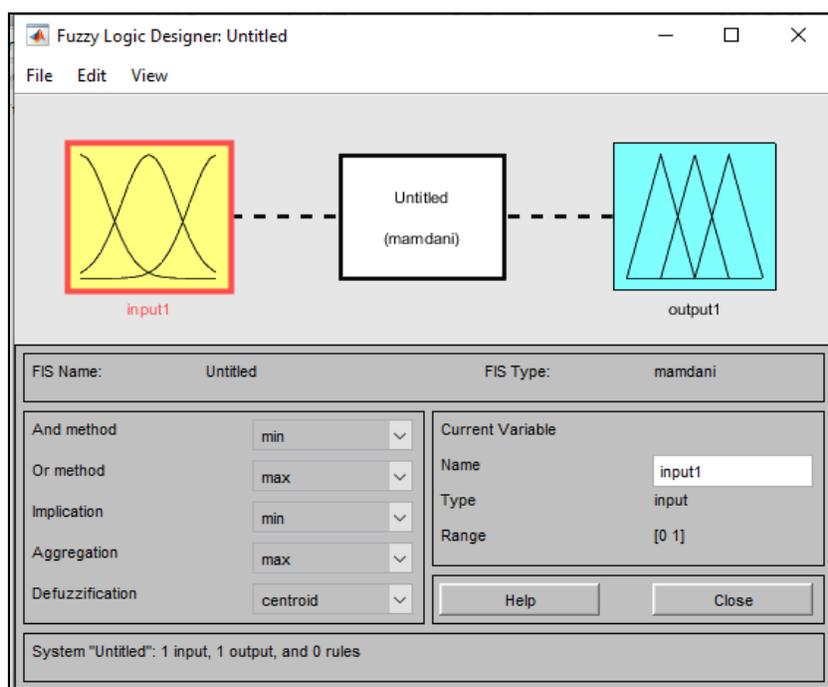
Nota. La Figura representa el entorno gráfico de Simulink de Matlab IDE 2017. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Herramienta Fuzzy Logic Designer

La herramienta Fuzzy Logic Designer es una colección de funciones integradas en el entorno informático numérico Matlab. Proporciona herramientas para crear y editar sistemas de inferencia difusos dentro del marco de Matlab, o integrar sistemas difusos en simulaciones con Simulink. Este toolbox se basa en herramientas de interfaz gráfica de usuario (GUI) y proporciona tres categorías de herramientas: funciones de línea de comandos, herramientas gráficas interactivas y bloques y ejemplos de Simulink. Hay cinco herramientas GUI principales para construir, editar y observar sistemas de inferencia difusa en el toolbox de lógica difusa: el sistema de inferencia difusa o el editor FIS, el editor de funciones de pertenencia, el editor de reglas, el visor de reglas y el visor de superficies, en la Figura 12 se puede observar el entorno gráfico de ésta herramienta (Rachmat, H. et al., 2017).

Figura 12

Entorno gráfico de Toolbox Fuzzy Tipo 1 de Matlab.



Nota. La Figura representa el entorno gráfico del Fuzzy Logic Designer de Matlab IDE 2017. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

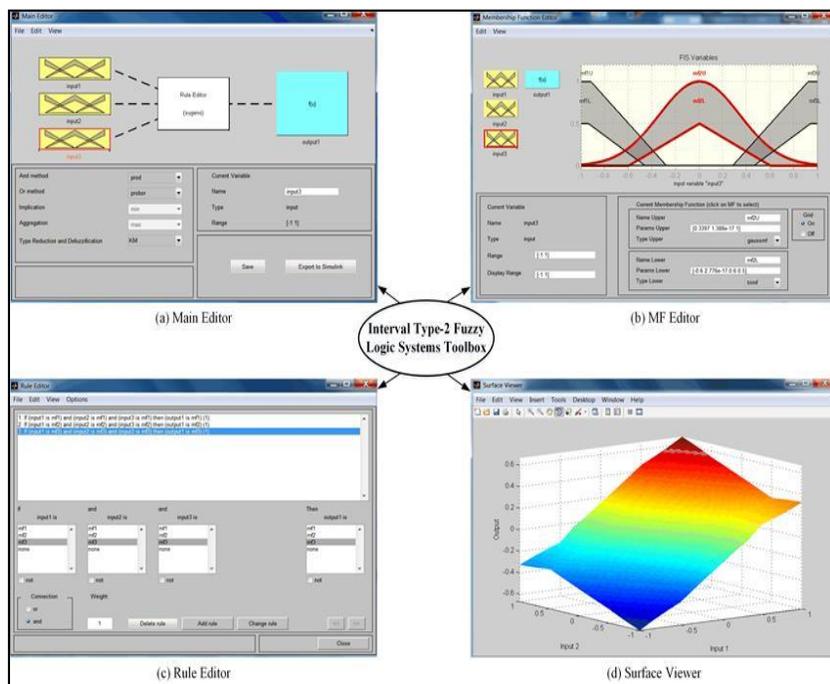
Herramienta Fuzzy Logic Designer Tipo II

Una función de pertenencia de tipo 2 de intervalo se representa mediante una función de pertenencia superior e inferior. Los valores de la función de pertenencia superior siempre son mayores o iguales que los valores correspondientes de la función de pertenencia inferior. El área delimitada por estas funciones de pertenencia es la huella de incertidumbre (FOU). Por ejemplo, la siguiente gráfica muestra tres funciones de membresía de tipo 2 para una variable de entrada dada.

Descargue o clone el repositorio en un directorio conveniente. Abra MATLAB 2015a o una versión más reciente. Luego ejecute "fuzzyt2.m", que se encuentra en la raíz del proyecto, la representación de la herramienta se muestra en la Figura 13 (Tufán, 2022).

Figura 13

Entorno gráfico de Toolbox Fuzzy Tipo 2 de Matlab.



Nota. La Figura 11 representa el entorno gráfico del Fuzzy Logic Designer Type 2 de Matlab IDE. Tomado de *Tufan Kumbasar (2022). Interval Type-2 Fuzzy Logic System Toolbox* (<https://github.com/kumbasart/type-2-fuzzy-logic-systems-matlab-toolbox/releases/tag/V1.2>), GitHub. Retrieved June 10, 2022.

Capítulo III:

Metodología de la Investigación

Diseño de la Investigación

Este proyecto de investigación busca estudiar el control inteligente difuso de tipo II aplicado en el control de temperatura de hornos convencionales, cuyo objetivo es aportar al ámbito educativo con una herramienta útil para familiarizarse con controladores avanzados que pueden ser aplicados en la industria en general o promover proyectos de innovación tecnológica.

La información se obtendrá a través del análisis de documentos basándose fundamentalmente en artículos científicos, además de libros que serán seleccionados aplicando cadenas de búsqueda que relacionen el trabajo propuesto con temas de interés que ayuden al desarrollo de la investigación.

El análisis de la información recolectada, de la cual se buscará resaltar los beneficios del controlador inteligente de lógica difusa tipo II y su aplicabilidad con la ayuda de tablas que describan brevemente sus cualidades.

Esta investigación es de tipo descriptivo, puesto que será basado en la teoría recopilada, su análisis y la presentación de los datos más representativos que contienen los artículos científicos existentes relacionados con el tema que en este documento se presenta.

Una gran variedad de técnicas y métodos para el diseño del controlador inteligente difuso tipo II pueden verse involucrados en la presente investigación, por lo cual, se debe revisar y analizar una gran cantidad de artículos relacionado los cuales deben ser filtrados especificando los criterios y datos requeridos.

Trabajos relacionados

En función de la investigación a desarrollar se identificaron los siguientes trabajos relacionados presentados en la Tabla 2:

Tabla 2**Trabajos Relacionados**

No	ARTÍCULO / PROYECTO	AUTOR	AÑO	DESCRIPCIÓN
1.	Type-II Fuzzy Logic Controller for Temperature Control of a Double pipe Heat Exchanger system.	A. Yasmine Begum & Dr. G. V. Marutheeswar	2015	Propone la aplicación de un controlador difuso tipo II a una parte de un intercambiador de calor, bajo simulación.
2.	Speed Control of a DC Motor with a Type-2 Fuzzy Logic Controller Subject to a Large Disturbance	Emilio R. Moo Medina, David Romero Romero	2018	Se presenta la metodología para la aplicación de un controlador difuso tipo-2 en intervalos para el control de velocidad de un motor de corriente directa ante un gran disturbio estocástico y otro determinista.
3.	An Intelligent Control of an Inverted Pendulum Based on an Adaptive Interval Type-2 Fuzzy Inference System	Ayad Al-Mahturi, Fendy Santoso, Matthew A. Garratt and Sreenatha G. Anavatti	2019	Se propone la comparación entre el control inteligente difuso tipo II y controlador PID en presencia de perturbaciones en un péndulo invertido bajo simulación.

Nota. Esta tabla muestra los artículos relacionados con el propósito de este estudio.

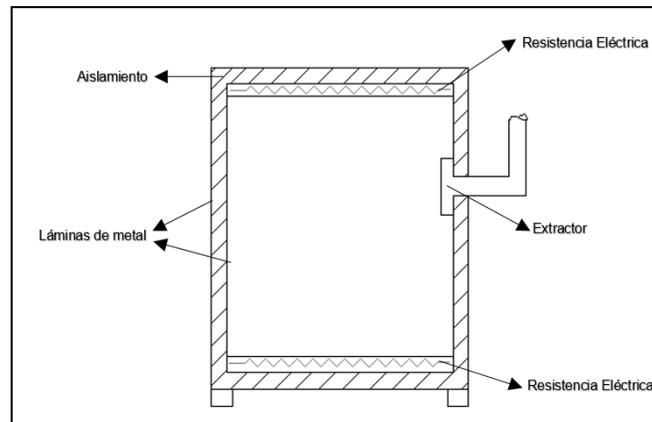
Modelo matemático de horno eléctrico convencional

Es importante identificar o tener una base de la planta que se requiere modelar teóricamente, para el estudio de este caso se tomará en cuenta un horno eléctrico convencional en funcionamiento continuo, debido a que la elaboración del producto analizado en el Capítulo I fue el pan y este ítem ya sea en pequeños negocios o en industrias más grandes debe tener precisamente de producción continua debido al giro del negocio que este representa.

Un horno convencional normalmente es de construcción rectangular con sus resistencias eléctricas tanto en las paredes inferior y superior, esta distribución es la más común debido a que permite una distribución uniforme de la temperatura interna ayudando también a tener un menor consumo de energía, como se puede observar en la representación de la Figura 14.

Figura 14

Horno convencional de resistencias eléctricas.



Nota. La Figura 14 representa la composición básica de un horno convencional de resistencias eléctricas.

El modelo matemático objeto de este estudio se basa en la dinámica de un horno eléctrico, en la cual se toma en cuenta variables como las capacitancias aproximadas de los elementos, la constante de tiempo térmica y las potencias de consumo, pudiendo llegar a una función de transferencia aproximada, la cual puede representada de forma general como se indica en la Ecuación 7.

$$\frac{T_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{R_{te}}{\tau_t s + 1} \quad (7)$$

En base a lo expresado para el desarrollo y estudio de esta investigación se utiliza una función de transferencia ya existente de un modelo matemático para control de temperatura de Saldívar y Vásquez (2010), estudio en el cual desarrollan una función de transferencia de segundo grado y servirá para el uso en la simulación de Matlab de este trabajo, la cual se representa en la Ecuación 8.

$$G(s) = \frac{-1.425 s + 11.4}{3.2355 s^2 + 17.625 s + 1} \quad (8)$$

Por tanto, para $t \geq 4T$, la respuesta permanece dentro del 2% del valor final. Por tanto, con base en la ecuación (4.26), el estado estable se alcanza matemáticamente sólo después de un tiempo infinito.

Sin embargo, en la práctica, una estimación razonable del tiempo de respuesta es la magnitud de tiempo que necesita la curva de respuesta para alcanzar la línea de 2% del valor final, o cuatro constantes de tiempo.

Controlador PID

La función de control PID integrada Simulink de Matlab une los controles P, PI, PID lo que proporciona un control eficaz para las tareas de diseño analizando una función de transferencia de una planta industrial ya que se puede formar en configuración paralelo o estándar, así como el ajuste automático de la ganancia del controlador (K_p) y las constantes de tiempo integral (T_i) y derivada (T_d).

El PID Controller de Simulink utiliza la Ecuación 9 para calcular el valor de salida del modelo.

$$Y = P + I * \frac{1}{s} + D * \frac{N}{1+N*\frac{1}{s}} \quad (9)$$

Donde:

Y es la función de salida del controlador

P es la ganancia proporcional

I es el tiempo de acción integral

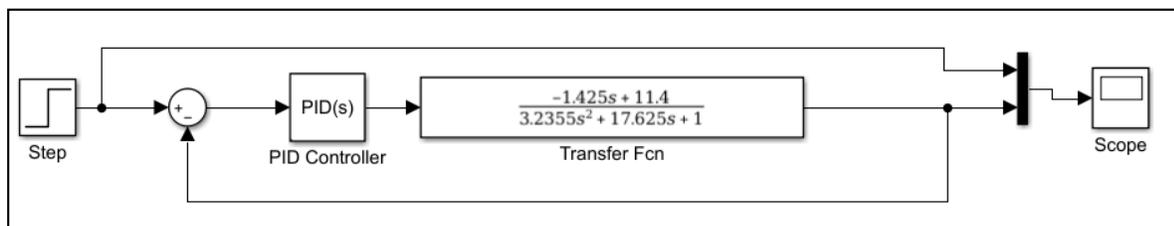
D es el tiempo de acción derivativa

N es el coeficiente de filtro de acción derivativa

El diagrama de bloques en Matlab para el diseño del controlador de la función de transferencia de la Ecuación 5 utilizando la herramienta Simulink quedaría como muestra la Figura 15.

Figura 15

Diagrama de bloques del Lazo de control PID en Simulink.



Nota. La Figura 15 representa la composición del lazo cerrado del control de la función de transferencia del horno de resistencias eléctricas.

Sintonización de Lazo PID

La correcta sintonización de un lazo de control PID, ayuda a tener un control adecuado de las variables del proceso, para lograr estos se disponen de varias técnicas como se ha mencionado en el apartado anterior, una de estas y la más usada es el método en lazo cerrado de Ziegler-Nichols, la cual en este proyecto se usará para obtener un control del proceso de temperatura adecuado para compararlo con el controlador difuso tipo II, que se desarrollará más adelante.

El método de ajuste mencionado se debe realizar con el sistema en lazo cerrado donde inicialmente se fijan las constantes integral y derivativa en cero y se empieza a aumentar manualmente la ganancia proporcional, hasta obtener una salida de forma oscilatoria con una amplitud constante para obtener la ganancia límite K_u , en este caso su valor aproximado es 12.4, con el cuál el período de oscilación da como resultado $P_u=0.962$, con éstas variables se puede obtener las constantes del controlador PID como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

Variables de sintonización PID

Controlador	Proporcional K_p	Integral T_i	Derivativa T_d
PID Fórmula	0.6 K_u	0.5 P_u	0.125 P_u
PID Valores	7.44	0.481	0.120
PID Autotune	0.1427	0.0155	-0.0735

Nota. La tabla representa análisis comparativo de la sintonía del lazo PID por Ziegler Nichols vs el método de auto sintonía de Matlab.

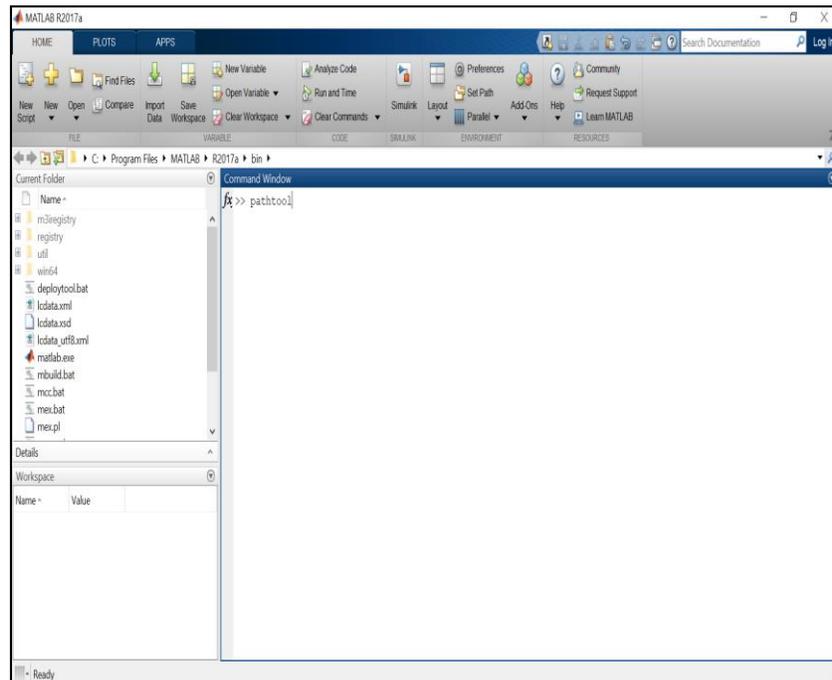
Instalación de Herramienta Fuzzy Type 2 en Matlab

Matlab IDE 2017 no cuenta dentro de sus librerías por defecto con el toolbox para el uso del diseñador de lógica difusa tipo 2, para poder hacer uso de esta herramienta para versiones del software desde el 2015 en adelante es necesario descargar de la página de Mathworks la

librería IT2-FLS, una vez descargada la librería y descomprimido el archivo se debe ejecutar el programa Matlab e introducir el comando *pathtool* como se indica en la figura 16.

Figura 16

Ejecución del comando *pathtool* en Matlab

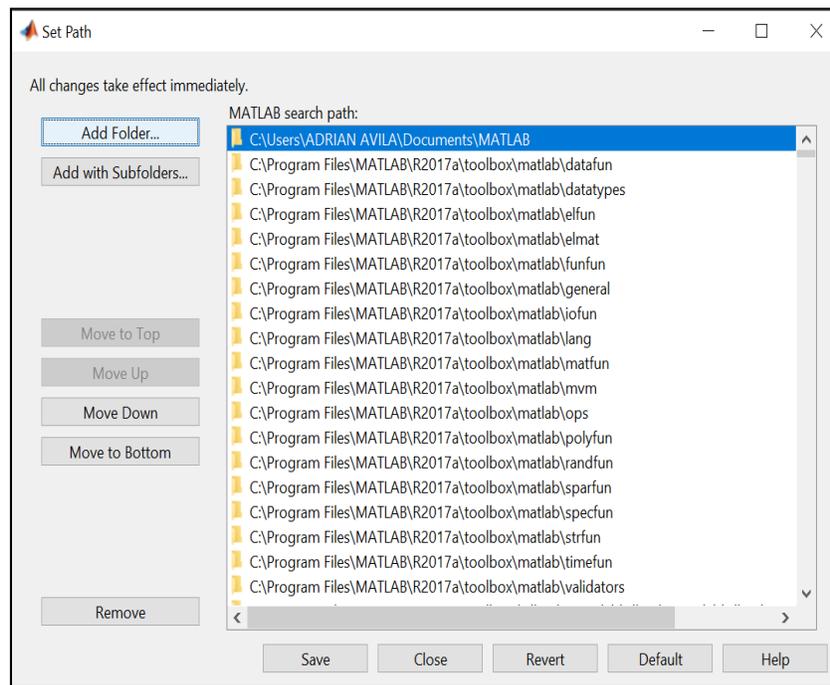


Nota. La Figura representa la ejecución del comando para incluir la librería de lógica difusa tipo 2 en Matlab IDE. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Una vez ejecutado el comando se desplegará la ventana indicada en la figura 17, donde se agregará la librería descargada a través del icono *Add Folder*, en la nueva pestaña desplegada se debe realizar la búsqueda de la carpeta extraída del archivo y se selecciona la carpeta, este procedimiento se indica en la Figura 18.

Figura 17

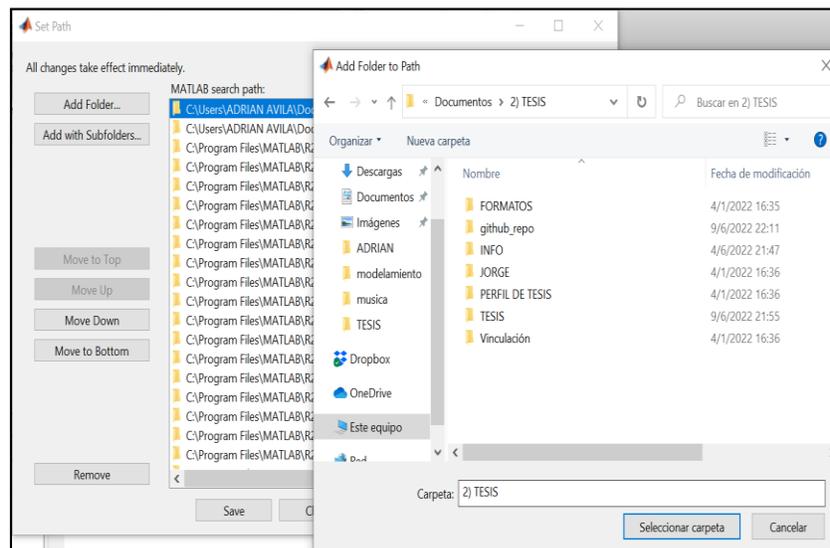
Ventana para agregar la librería IT2-FLS



Nota. La Figura representa la ventana para incluir la librería de lógica difusa tipo 2 en Matlab IDE. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Figura 18

Ventana de búsqueda para insertar la librería IT2-FLS

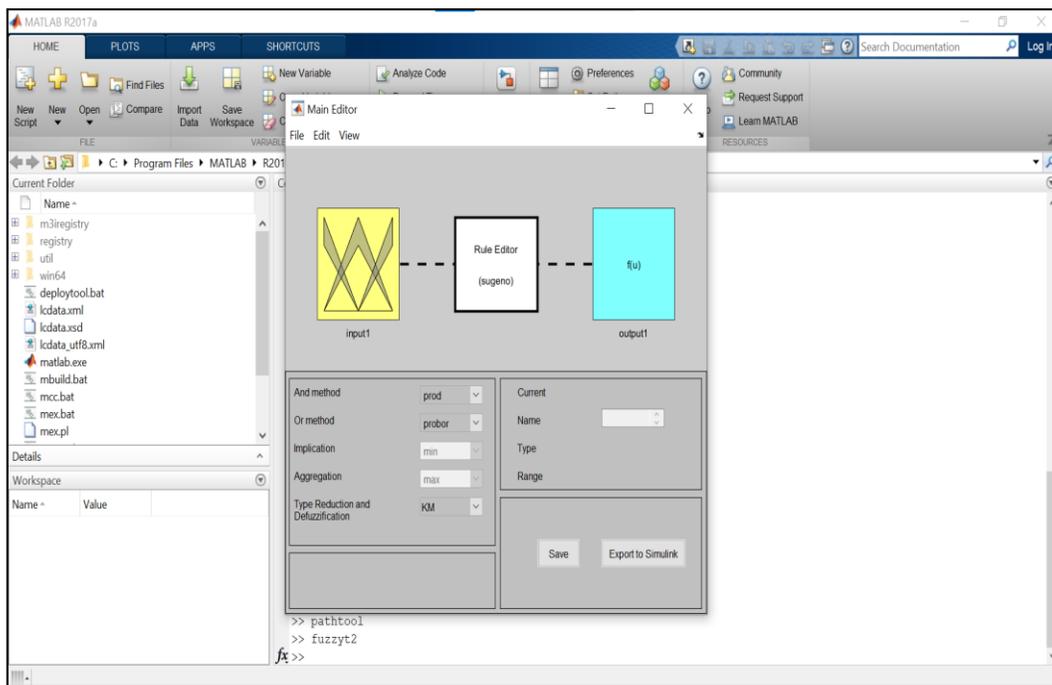


Nota. La Figura representa la búsqueda de la carpeta obtenida del archivo de la librería descargada para cargarla en Matlab IDE. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Una vez cargada la librería en el entorno de Matlab, se debe ejecutar el comando *fuzzyt2* para abrir el toolbox de lógica difusa tipo 2, como muestra la Figura19.

Figura 19

Ejecución del Tolboox para Fuzzy Logic-Type 2



Nota. La Figura representa la herramienta de control difuso tipo 2 ejecutada en Matlab IDE. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Diseño Controlador Difuso Tipo II

El primer paso para realizar el diseño de un controlador difuso ya sea tipo 1 o de tipo 2 es determinar las reglas lingüísticas las cuales nos permitirán evaluar las variables físicas mediante su uso, en este caso específico se estimaron en base a dos variables de entrada que serán la temperatura medida y la carga que se podría ubicar dentro de un horno, y una variable de salida la cual controlará la acción del elemento calentador de este tipo de equipos, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Variables del Controlador Difuso Tipo II

Temperatura / Carga	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja	Baja	Media	Alta
Baja	Muy Baja	Baja	Media	Media	Alta
Media	Muy Baja	Baja	Media	Media	Alta
Alta	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Alta
Muy Alta	Muy Alta	Alta	Alta	Media	Baja

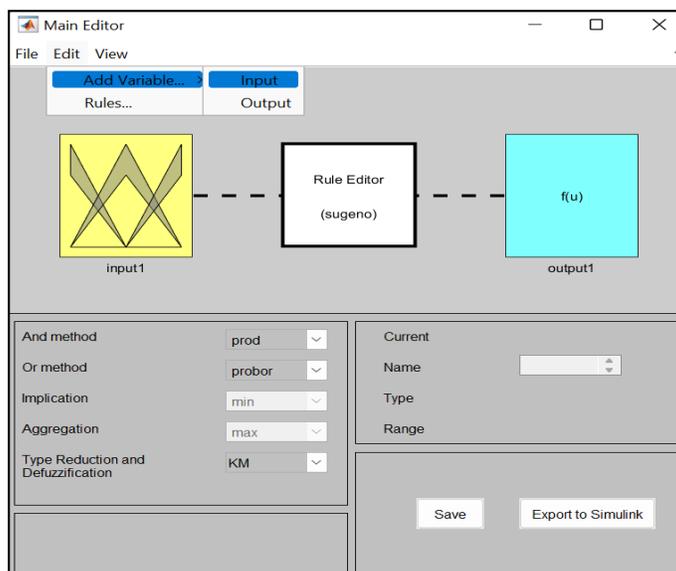
Nota. La tabla muestra las reglas lingüísticas propuestas en base a dos variables de entrada y una de salida

Creación de Variables en la Herramienta FT2 de Matlab

El primer paso para diseñar el controlador difuso tipo 2 en Matlab es crear las entradas y salidas que se necesitan en base a las reglas determinadas para la evaluación de la función de transferencia de la planta a utilizar, para ello después de ejecutar el comando mencionado en un apartado anterior se debe ingresar al menú *editar* como muestra la Figura 20.

Figura 20

Agregar variables de entrada y salida en la herramienta fuzzyt2

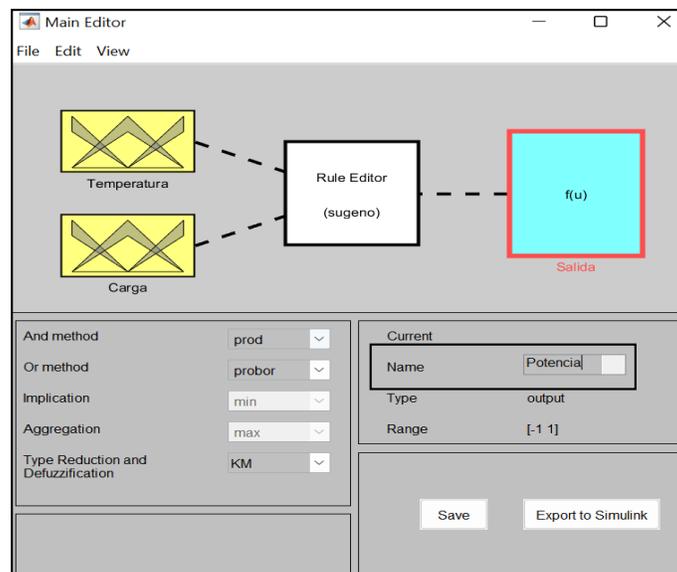


Nota. La Figura representa como añadir variables de entrada y salida en la herramienta de control difuso tipo 2 ejecutada en Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

El siguiente paso a cumplir después de crear las variables que se consideran necesarias en la herramienta para el desarrollo del controlador fuzzy tipo 2 es definir los nombres de las variables que previamente se crearon en la Tabla 4, como muestra la Figura 21, se debe seleccionar la variable y en el campo *Name* escribir el nombre deseado.

Figura 21

Modificar variables de entrada y salida en la herramienta fuzzyt2

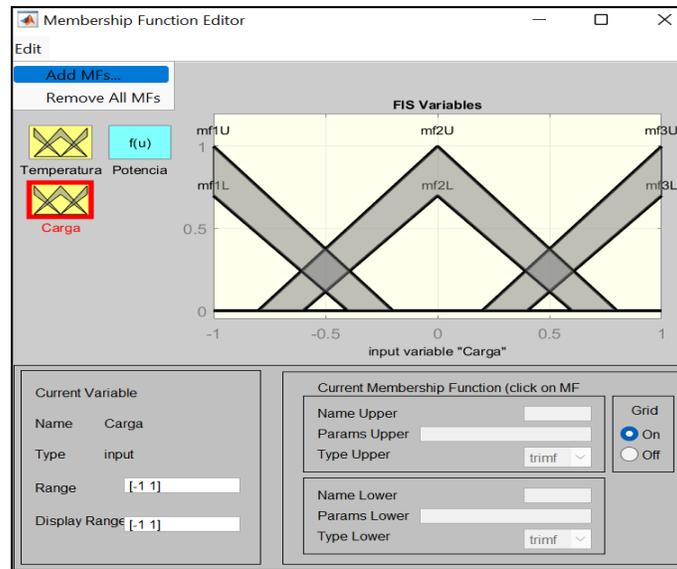


Nota. La Figura representa como modificar los nombres de las variables de entrada y salida en la herramienta de control difuso tipo 2 ejecutada en Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Una vez ingresados los nombres de las variables, se deberá ingresar la cantidad que tendrán los conjuntos difusos es decir las funciones de pertenencia por sus siglas en inglés *MF* (Membership Functions), para ello se debe hacer “*doble click*” en cualquiera de las variables y se desplegará una segunda ventana como muestra la Figura 22, en ella seleccionando cada variable se ingresa al menú “*Edit*” y posteriormente a “*Add MFs*”.

Figura 22

Ventana para cambiar el rango y tipo de las Funciones de Membresía de las variables

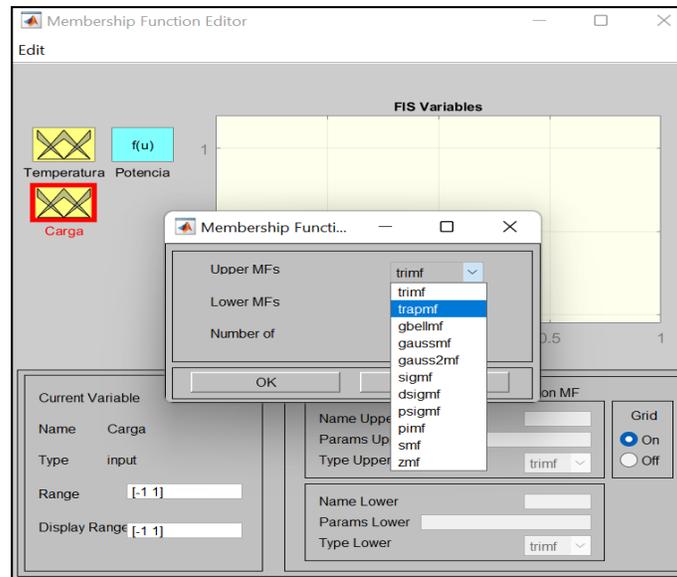


Nota. La Figura representa como desplegar la ventana para modificar la cantidad y tipo de las funciones de membresía de las variables de entrada y salida en la herramienta de control difuso tipo 2 ejecutada en Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Dentro de la ventana de dialogo desplegada se definirá la cantidad de MF para cada variable y el tipo o forma que tendrá la membresía en las que se puede escoger entre: triangular, trapezoidal, forma de campana, gaussiana o función sigmoideal, para efecto de este estudio se determinó un conjunto de 5 MFs para cada variable y el tipo de membresía trapezoidal, como muestran las figuras 23 y 24.

Figura 23

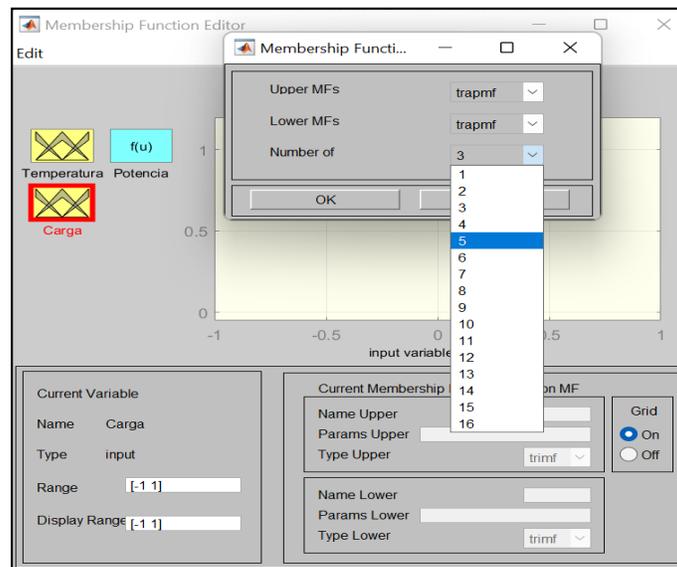
Modificar el tipo de las Funciones de Membresía de las variables



Nota. La Figura representa como modificar el tipo de las funciones de membresía de las variables de entrada y salida en la herramienta de control difuso tipo 2 ejecutada en Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Figura 24

Modificar el rango de las Funciones de Membresía de las variables

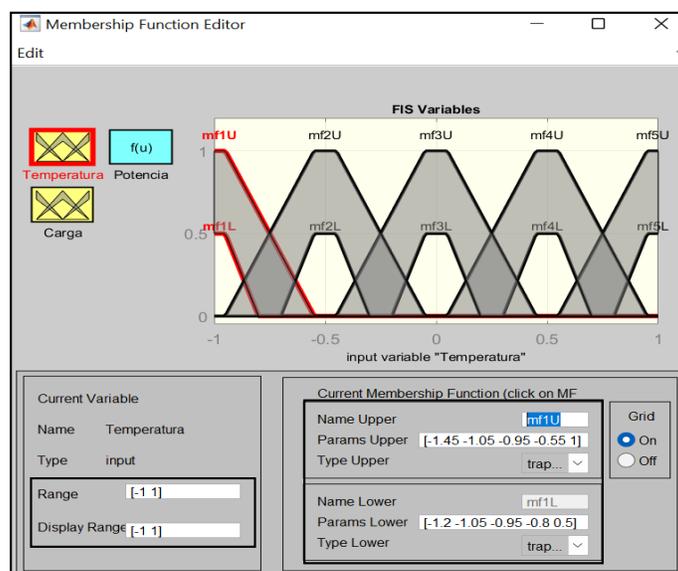


Nota. La Figura representa como modificar la cantidad de las funciones de membresía de las variables de entrada y salida en la herramienta de control difuso tipo 2 ejecutada en Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Una vez realizados los pasos anteriores se deberá definir los nombres de cada función de membresía tanto para la función de pertenencia superior UMF como para la función de pertenencia inferior LMF, sus parámetros y su rango, este último se debe realizar como primer paso, esto se logra seleccionando una MF a la vez de cada variable y modificando ambos parámetros, como indica la Figura 25, y cuyo resultado se resalta la Figura 26 que corresponde a las entradas.

Figura 25

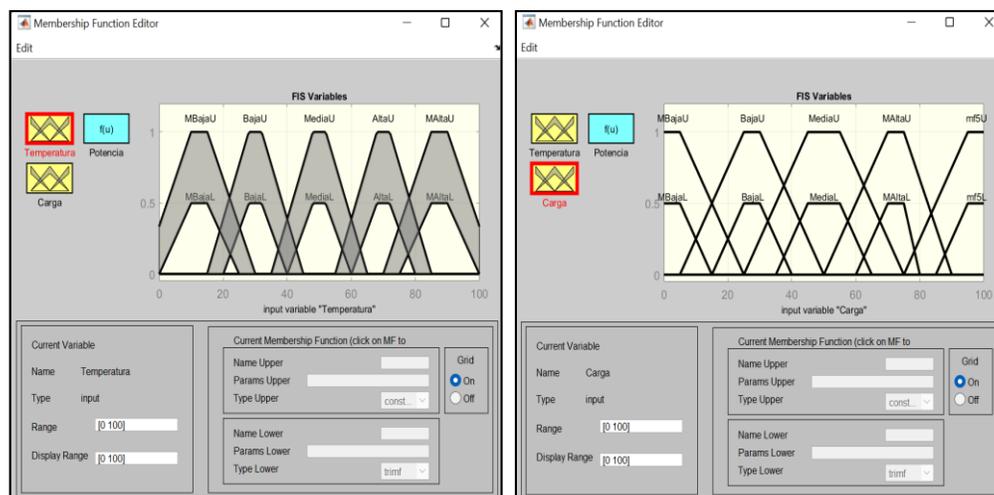
Modificar el nombre y rango de las Funciones de Membresía UMF y LMF de las variables de entrada



Nota. La Figura representa como modificar el rango y nombre de cada función de membresía de las variables de entrada en la herramienta de control difuso tipo 2 ejecutada en Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Figura 26

Variables de entrada definidos nombres y rangos de MFs

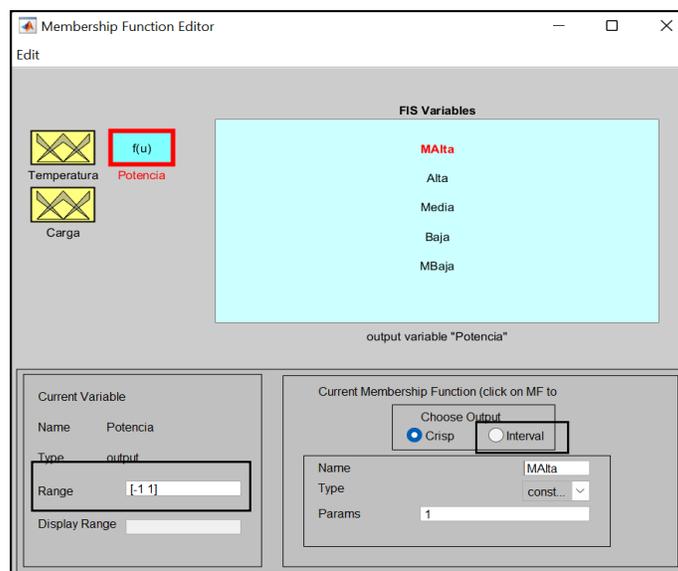


Nota. La Figura representa como modificar el rango y nombre de las funciones de membresía de las variables de entrada en la herramienta de control difuso tipo 2 ejecutada en Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

De la misma forma que se modificó el nombre para las funciones de membresía de las variables de entrada se debe realizar para la variable de salida, con la diferencia que el rango no se debe modificar ya que tendrá una pertenencia entre 0 y 1 para tres MFs o si se desea usar el rango de -1 a 1 utilizando cinco MFs, también se puede escoger si se desea entre una salida constante definida o un intervalo de pertenencia como se muestra en la Figura 27 la variable de salida.

Figura 27

Variable de salida definida su nombre

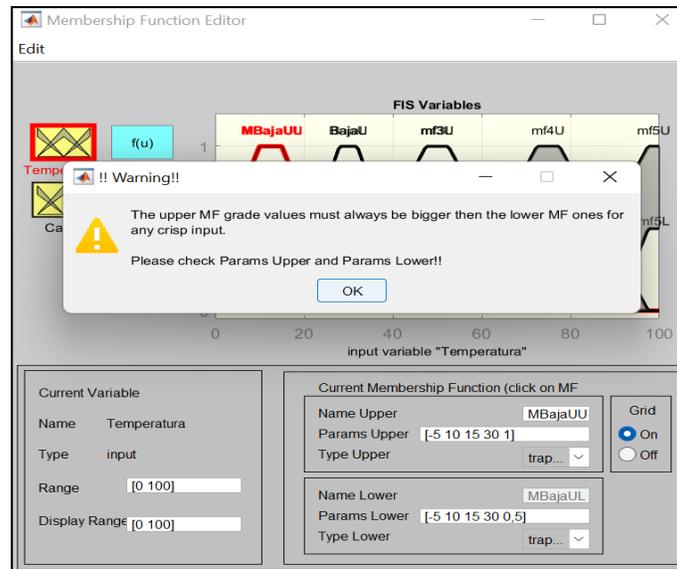


Nota. La Figura representa como modificar el nombre de las funciones de membresía de la variable de salida en la herramienta de control difuso tipo 2 ejecutada en Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

En caso de que se presente una notificación de advertencia al modificar los rangos de las funciones de pertenencia UMF y LMF es debido a que es posible que una de ellas este sobrepasando el rango de la otra, simplemente se debe aceptar la advertencia y en cuanto se terminen de definir ambos rangos ya no volverá a aparecer el mensaje que se muestra en la Figura 28.

Figura 28

Mensaje de advertencia en la definición de rangos de las MFs



Nota. La Figura representa el mensaje de advertencia que se despliega cuando uno de los rangos de las funciones de membresía UNF y LMF se superan en la herramienta de control difuso tipo 2 ejecutada en Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

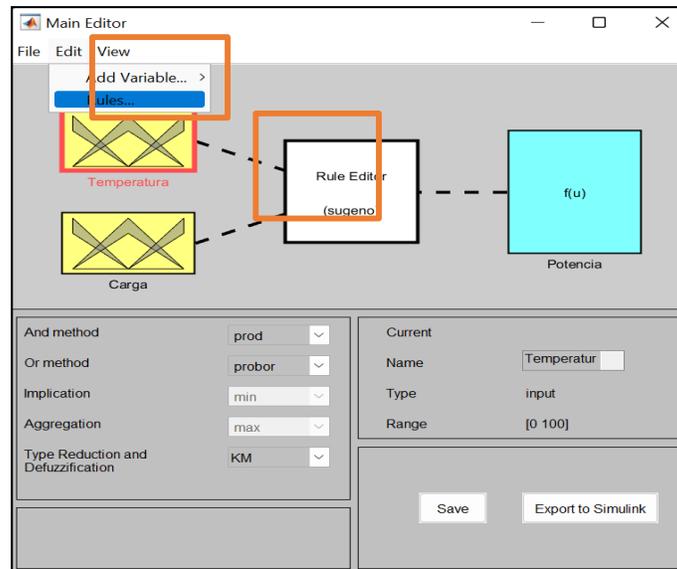
Creación de Reglas

Una vez definidos todos los parámetros anteriores se debe proceder a crear las reglas difusas o lingüísticas conocidas como *suposiciones* debido al comportamiento que toman al estar sujetas a la interpretación del diseñador, estas se conforman con una condición (si - if) y una decisión (entonces - then), en este tipo de sistemas permite evaluar una variable física.

Para acceder a la edición de reglas se debe cerrar la ventana donde se modificaron los parámetros de las variables como muestra la Figura 29, y dirigirse al menú “Edit” e ingresar al ítem “Rules” o simplemente hacer “doble click” sobre el cuadro blanco “Rule Editor” donde se desplegará la ventana que se muestra en la Figura 30 y en la cual se crearán las reglas necesarias para el diseño del controlador.

Figura 29

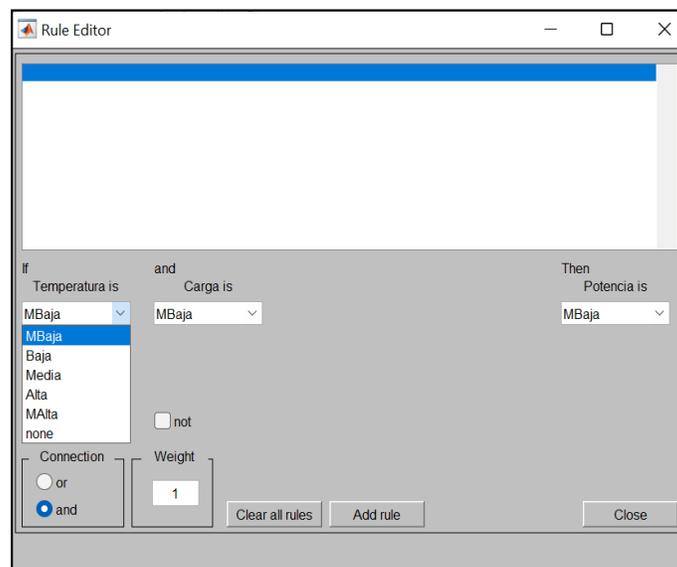
Ventana principal para acceso al editor de reglas



Nota. La Figura representa la ventana principal para poder acceder al editor de reglas en la herramienta de control difuso tipo 2 ejecutada en Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Figura 30

Ventana del editor de reglas



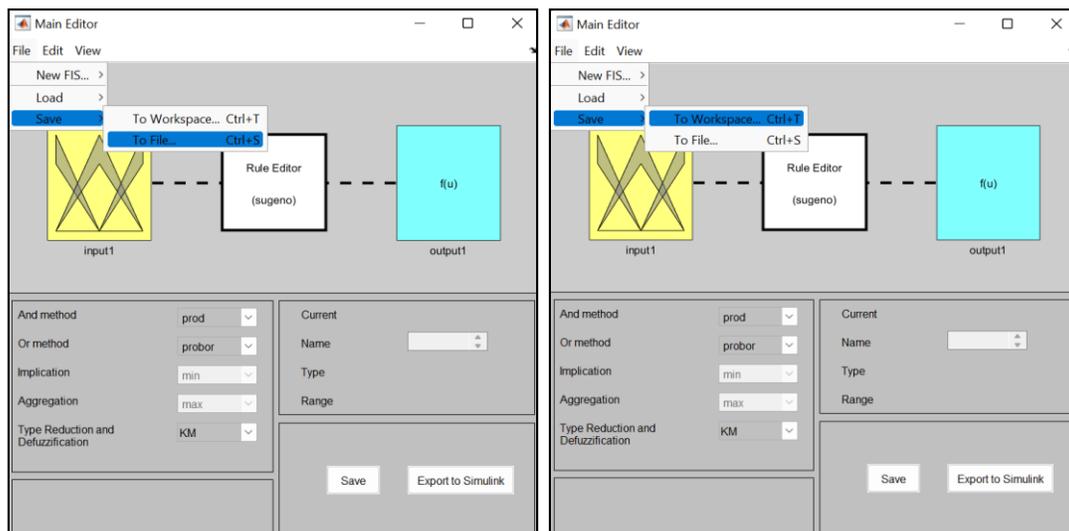
Nota. La Figura representa la ventana del editor de reglas en la herramienta de control difuso tipo 2 ejecutada en Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Guardar el modelo difuso diseñado

Finalmente, después de realizar todo el proceso de diseño del controlador fuzzy tipo 2, este debe ser almacenado tanto en un archivo cuya extensión es “.t2fis” que se puede almacenar en cualquier ruta deseada, así como en el espacio de trabajo (Workspace) de Matlab para poder ser utilizado en Simulink, como muestra la Figura 31.

Figura 31

Guardar modelo diseñado en la herramienta fuzzyt2

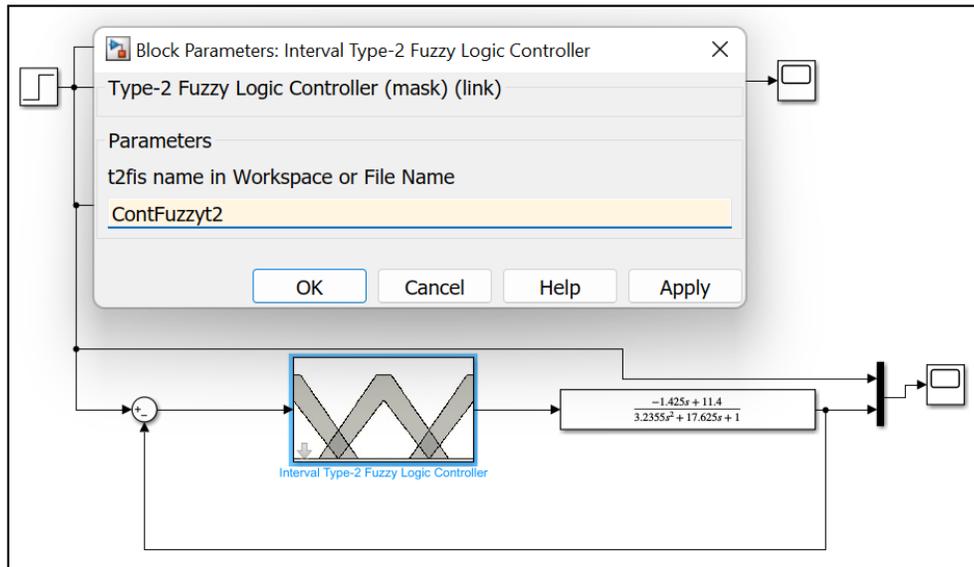


Nota. La Figura representa la forma de guardar el modelo del controlador difuso tipo 2 en archivo .t2fis y en el workspace de Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Una vez guardado al modelo difuso tanto en el workspace y así como archivo en la ruta deseada se debe importar a la simulación de Matlab, esto se logra haciendo “*doble click*” sobre el bloque del controlador difuso tipo 2 de Simulink y escribir el nombre exacto con el que se guardó el diseño, como se puede observar en la Figura 32.

Figura 32

Cargar el modelo fuzzy tipo 2 en Simulink



Nota. La Figura representa la forma de cargar el modelo del controlador difuso tipo 2 en Simulink de Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Capítulo IV:

Resultados de la simulación

Análisis del controlador PID

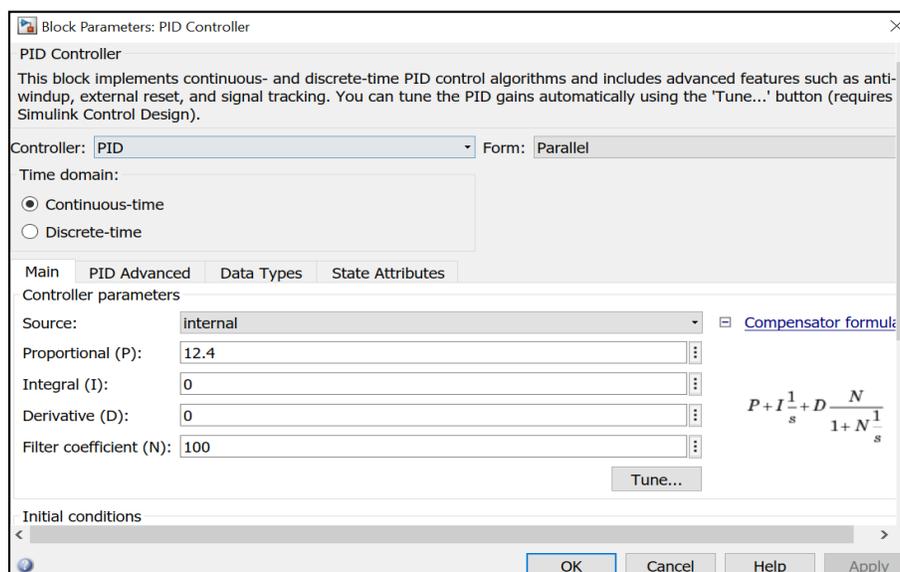
En esta sección se analizará el comportamiento del controlador PID sintonizados bajo el método de lazo cerrado de Ziegler Nichols como la sintonización automática (Autotune) de Matlab, tanto sus ondas como el porcentaje de sobreimpulso y el tiempo de establecimiento para la función de transferencia mencionada en apartados anteriores que representa un horno eléctrico de resistencias.

PID por el método de lazo cerrado de Ziegler-Nichols

Para la obtención de variables y la simulación del proceso para la obtención de la gráfica resultante se siguió el procedimiento del apartado 3.5 cuyo primer resultado arrojó la gráfica de la Figura 34 donde se varía la constante proporcional para que el proceso sea oscilatorio y así determinar la ganancia límite K_u que se representa en la Figura 33 y el período de oscilación para posteriormente realizar el cálculo de las constantes proporcional, integral y derivativa que se muestran en la Tabla 3.

Figura 33

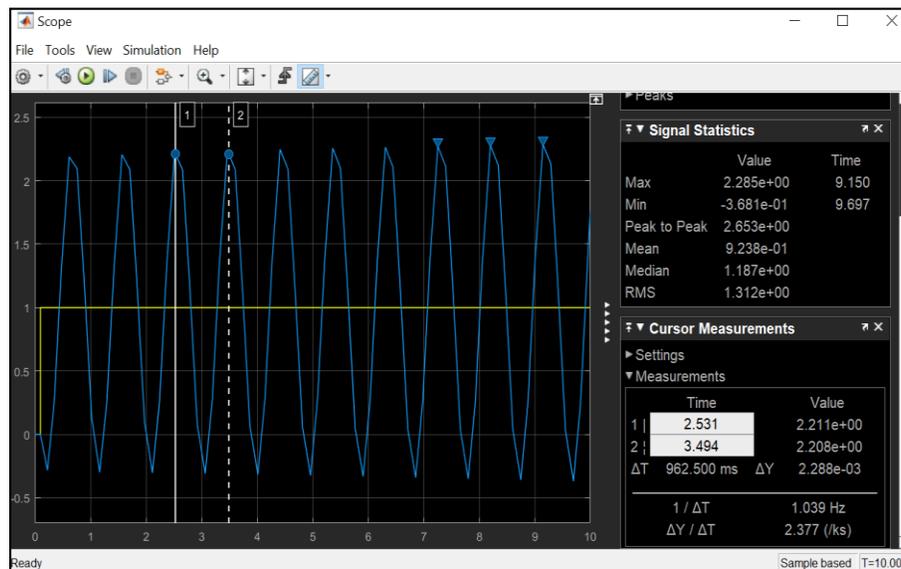
Obtención de la ganancia límite K_u



Nota. La Figura representa la ventana de variables del controlador PID donde obtiene la ganancia límite K_u en Simulink de Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Figura 34

Gráfica de respuesta oscilatoria para la obtención P_u

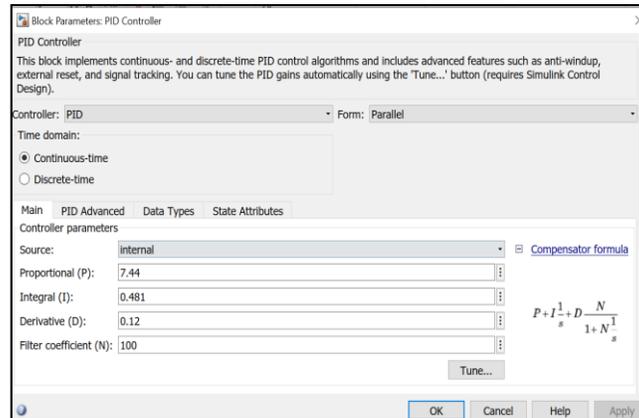


Nota. La Figura representa la ventana de la gráfica para medir el período de oscilación P_u en Simulink de Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Después de haber obtenido la ganancia límite K_u y el período de oscilación P_u se realiza el cálculo anteriormente mencionado y representado en la Tabla 3 para conseguir las ganancias: proporcional K_p , integral K_i y derivativo K_d las cuales se ingresarán en la ventana de configuración de constantes del PID de Simulink como se muestra en la Figura 35.

Figura 35

Sintonización PID con ingreso de variables calculadas

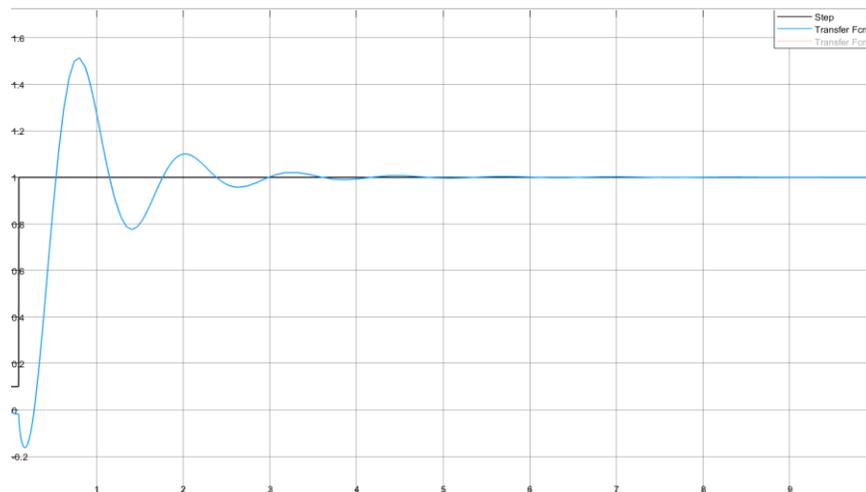


Nota. La Figura representa la ventana de variables del controlador PID donde ingresan las ganancias calculadas para sintonizar el lazo PID en Simulink de Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Una vez ingresadas se procede a correr la simulación del controlador PID sintonizado por el método de Ziegler Nichols, cuyo resultado se puede observar en la Figura 36, en la cual se puede observar el sobreimpulso y el establecimiento del controlador de la planta, se realizará la comparación de los parámetros obtenidos más adelante.

Figura 36

Respuesta de la sintonización PID con ingreso de variables calculadas



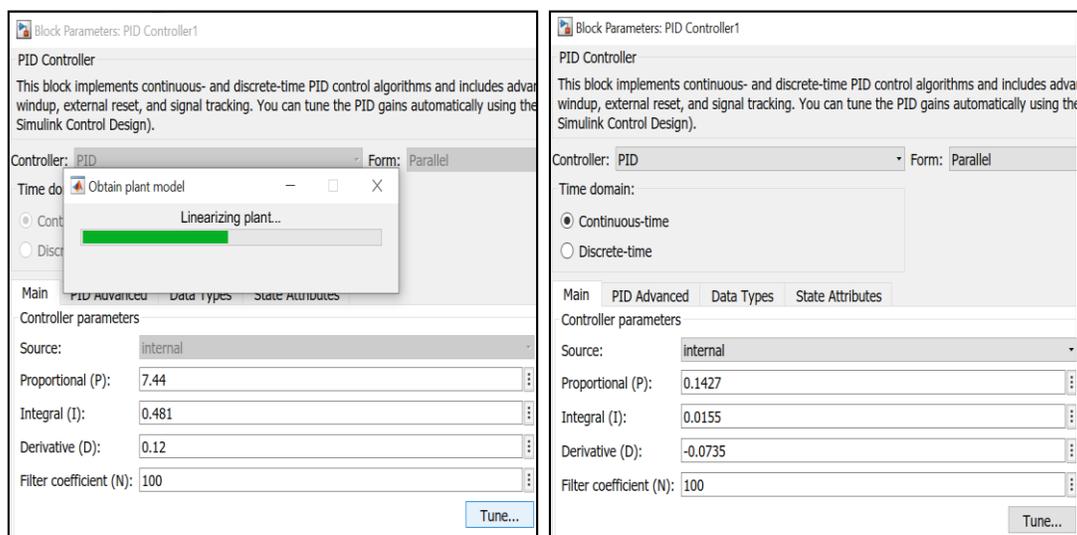
Nota. La Figura representa la gráfica resultante de la sintonización por el método de Ziegler Nichols del lazo PID en Simulink de Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Sintonización automática del lazo PID de Matlab

Para obtener un análisis comparativo más completo entre el controlador PID y el controlador difuso tipo 2 se realizó también la simulación del lazo PID con la ayuda del sintonizador automático de Matlab cuya representación se muestra en la Figura 37.

Figura 37

Sintonización automática del lazo PID

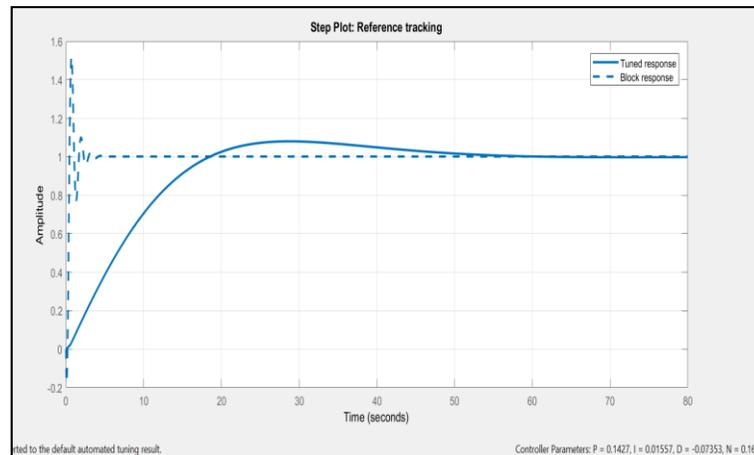


Nota. La Figura representa el proceso de sintonización automática del lazo PID en Simulink de Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Una vez terminado el proceso de sintonización automática del lazo PID en Simulink se debe ejecutar nuevamente la simulación para la obtención de la gráfica del comportamiento de la planta con este método, la Figura 38 representa ésta resultante.

Figura 38

Gráfica de simulación por sintonización automática del lazo PID



Nota. La Figura representa la gráfica resultante de la sintonización automática del lazo PID en Simulink de Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Después de haber obtenido la gráfica de comportamiento del lazo PID, se puede también acceder a los datos completos de la simulación con el método de auto sintonía, los cuales se pueden observar en la Figura 39, en el que se detallan parámetros importantes para la comparación entre el método de Ziegler Nichols inicial y el resultante después del Autotune, como son las constantes, el tiempo de establecimiento y el porcentaje de sobreimpulso.

Figura 39

Parámetros de simulación por sintonización automática del lazo PID

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	0.14274	7.44
I	0.015567	0.481
D	-0.073534	0.12
N	0.16437	100
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	13.1 seconds	0.192 seconds
Settling time	48.8 seconds	2.75 seconds
Overshoot	8.03 %	51.8 %
Peak	1.08	1.52
Gain margin	39.3 dB @ 6.49 rad/s	5.43 dB @ 7.39 rad/s
Phase margin	69 deg @ 0.116 rad/s	26.7 deg @ 4.33 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

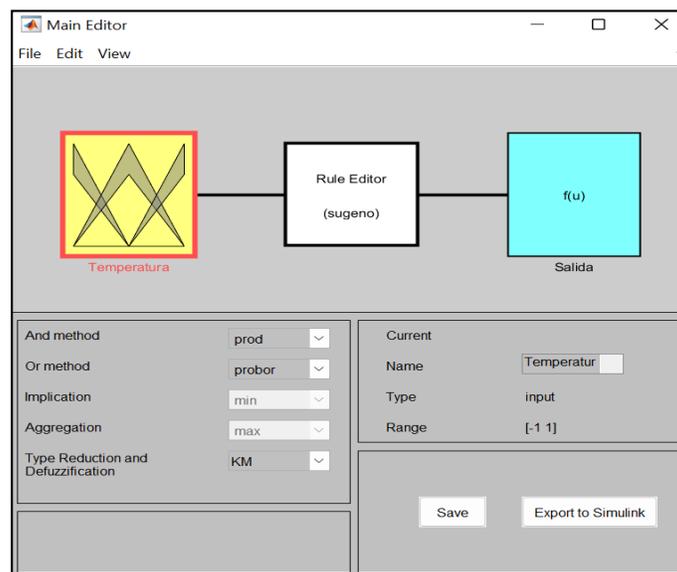
Nota. La Figura representa los parámetros de la gráfica resultante de la sintonización automática del lazo PID en Simulink de Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Análisis del controlador difuso tipo 2

Una vez obtenido el resultado del controlador PID llega el turno de centrarse en el controlador difuso tipo 2, luego de la propuesta de diseño y realizado el análisis del funcionamiento del toolbox desarrollado por Taskin A. y Kumbasar T. (2015), y debido a que este proceso es de prueba y error surgieron varios inconvenientes como es el uso de más variables de entrada o salida, sin embargo se logró llegar a un funcionamiento aproximadamente estable para la comparación frente al controlador PID, quedando finalmente diseñado con una variable de entrada y una variable de salida como se aprecia en la Figura 40.

Figura 40

Diseño del controlador difuso Tipo 2

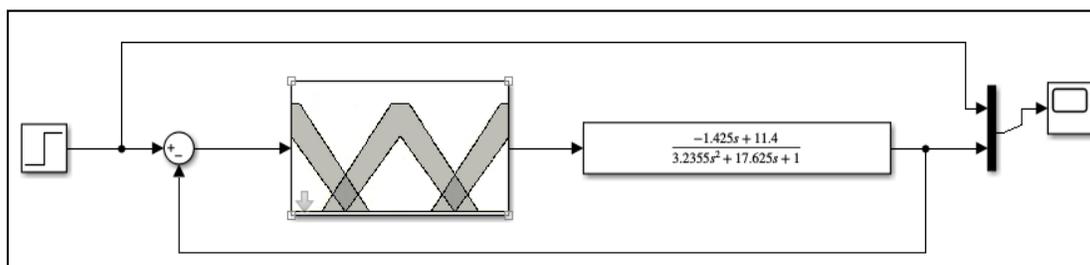


Nota. La Figura representa el diseño del controlador Difuso Tipo 2 en la herramienta Fuzzyt2 cargado en Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Se utilizó la herramienta Simulink como se ha propuesto desde el inicio de este caso de estudio para la simulación del controlador difuso tipo 2 y la planta propuesta en anteriores apartados como se puede observar en la Figura 41.

Figura 41

Diseño del controlador en lazo cerrado en Simulink

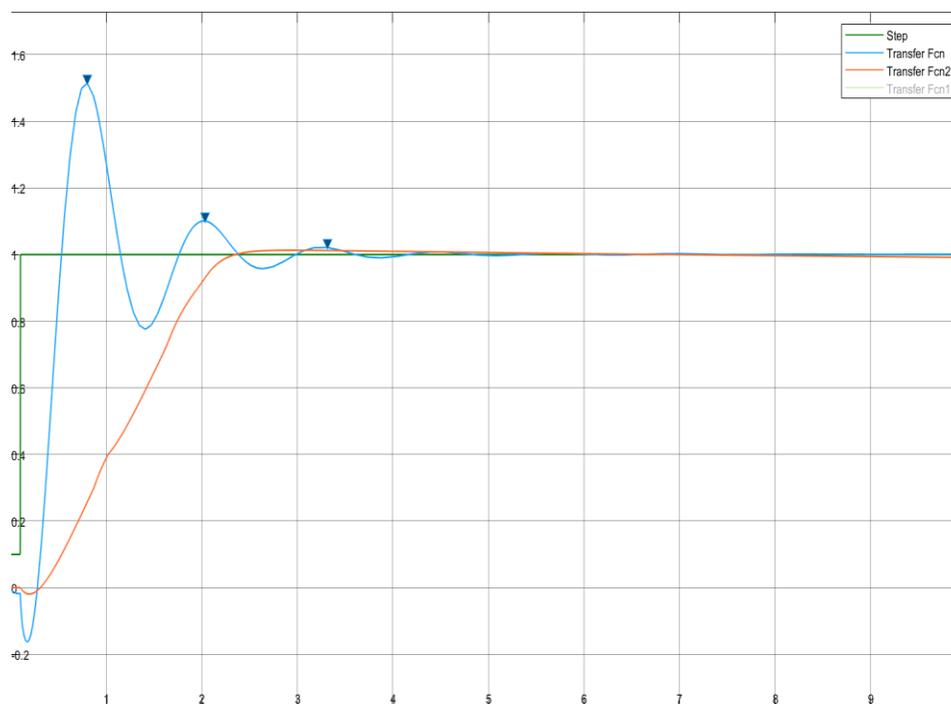


Nota. La Figura representa el diseño del controlador Difuso Tipo 2 en Simulink de Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

Una vez guardado el diseño del controlador difuso en el workspace de Matlab y asignado al bloque del Controlador difuso en Simulink, se debe realizar la simulación para revisar el comportamiento de la señal de salida acorde a la variable de entrada y reglas definidas, la gráfica obtenida se puede observar en la Figura 42.

Figura 42

Gráfica de respuesta simulación de los controladores PID y Difuso Tipo 2



Nota. La Figura representa la gráfica obtenida al ejecutar la simulación del controlador Difuso Tipo 2 en Simulink de Matlab. Adaptado del Software utilizado para propósito del desarrollo de este proyecto.

En la gráfica anterior se puede observar en color azul el comportamiento del controlador PID sintonizado con el método de Ziegler Nichols y en color naranja el comportamiento del controlador Difuso tipo 2, cuya principal diferencia es el porcentaje de sobreimpulso, cuyo análisis comparativo se realizará con más detalle en el siguiente y último apartado de este caso de estudio.

Comparación entre controlador PID y controlador Difuso tipo 2

Para realizar el análisis comparativo entre el controlador PID sintonizado con Ziegler Nichols, PID en sintonización automática y el controlador difuso tipo 2 se ubicarán los datos de sobreimpulso y tiempo de establecimiento en la Tabla 5.

Tabla 5

Análisis comparativo entre el controlador PID y Control difuso tipo 2

	PID	PID	Fuzzy Tipo 2
	Ziegler Nichols	Autotune	
Porcentaje de Sobreimpulso (%)	50%	8,03 %	1.84 %
Tiempo de Establecimiento (seg.)	5,33 seg.	48,8 seg.	5,64 seg.

Nota. En la tabla se representan los parámetros obtenidos con los tres métodos de control simulados en el desarrollo de este trabajo.

En la Tabla 5 se puede observar que, entre los controladores implementados para la simulación de la planta que representa un horno eléctrico de resistencias, el porcentaje más bajo de sobreimpulso lo contiene el controlador difuso tipo 2 con el 1.84% con una ligera diferencia respecto al sobreimpulso generado por el PID sintonizado por auto sintonía que tiene un porcentaje de 8,03%, pero que si existe una diferencia más amplia respecto al sobreimpulso generado por el PID sintonizado por el método de lazo cerrado de Ziegler Nichols que presenta un porcentaje del 50%, lo que significa que el porcentaje de sobreimpulso del controlador PID sintonizado es 96% mayor que el sobreimpulso del controlador difuso tipo 2.

De la comparación de este primer parámetro se obtiene que para procesos que se requiera que el sobre impulso generado en la planta por el controlador no sea alto para lograr obtener por ejemplo un menor consumo de energía o alargar la vida útil de componentes eléctricos o electrónicos, o simplemente lograr una mejor eficiencia en procesos productivos.

Por otro lado, en la Tabla 5 se puede determinar que otro punto de comparación entre los controladores implementados, es que el menor tiempo de establecimiento se obtiene con el controlador PID sintonizado por Ziegler Nichols con 5,33 segundos respecto al controlador difuso tipo 2 que tiene un tiempo de establecimiento de 5,64 segundos, pero al igual que en el anterior parámetro analizado ambos mantienen una diferencia amplia respecto al generado por el PID auto sintonizado que genera un tiempo de establecimiento de 48,8 segundos, lo cual podemos interpretar que el tiempo de establecimiento del controlador PID sintonizado es un 5% menor que el tiempo del controlador difuso tipo 2.

Lo mencionado en el párrafo anterior ayuda a determinar que a pesar de que el tiempo de establecimiento en el primer controlador citado es el menor se debe tomar en cuenta los dos parámetros descritos en la Tabla 5 para decidir cuál de los tres controladores simulados elegir a la hora de tomar la decisión de implementarlo en una planta para lograr una mejor eficiencia para procesos de producción sean de mayor o menor tamaño, o como es el caso de este estudio un horno eléctrico de resistencias.

Capítulo V:

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Para el desarrollo de este estudio, en Matlab se incluyó la herramienta fuzzyt2 desarrollado por Taskin, A. and Kumbasar, T. en el 2015, la cual además de poseer el entorno gráfico para diseño del controlador difuso tipo 2 incluye también la librería que se integra a Simulink, por lo que la simulación se logró representar de manera dinámica y didáctica el comportamiento de una planta de temperatura con una función de transferencia que representa un horno eléctrico de resistencias de forma general.
- Se diseñó un sistema de control difuso tipo 2 en lazo cerrado para una planta de temperatura basado en el funcionamiento de un horno eléctrico convencional con el objetivo de obtener como resultado un controlador con una respuesta más eficiente que permita tener un mejor ahorro de energía para la producción de alimentos para pequeños productores o, a nivel industrial, este diseño se desarrolló con una variable de entrada y una variable de salida con sus respectivas funciones de membresía asignando a cada una su grado de pertenencia.
- Con la ayuda de la herramienta desarrollada del controlador difuso tipo 2 para el uso en Simulink de Matlab se logró realizar la simulación del funcionamiento de una planta de temperatura y realizar una comparativa con un controlador clásico como el PID, y en base a esto determinar si es aplicable o no en hornos convencionales para producción de alimentos.
- En este trabajo se implementaron dos propuestas de controladores; (1) difuso tipo II y (2) PID, este último con dos opciones de sintonización, la primera con el método de lazo cerrado de Ziegler Nichols y la segunda con la ayuda del método de auto sintonía propia del software Matlab en Simulink. La diferencia del comportamiento de ambos controladores radica en el porcentaje de sobreimpulso que se obtiene en cada uno de los controladores además del tiempo de establecimiento de la señal, estos parámetros son decisivos a la hora de escoger el ideal para un proceso productivo.
- El resultado obtenido al probar el desempeño del controlador difuso tipo 2 implementado en este trabajo diseñado a partir de una variable de entrada y una

variable de salida para la simulación de un horno convencional, dio como resultado una señal de salida con un porcentaje de sobreimpulso y un tiempo de establecimiento bajos, lo cual es favorable para demostrar que el comportamiento de este tipo de controladores es muy eficaz, lo cual deja una base sólida para que futuros trabajos que sean desarrollados bajo esta lógica difusa de tipo 2 den resultados favorables en comparación a controladores clásicos.

- La respuesta del controlador difuso tipo 2 en comparación al controlador PID sintonizado por Ziegler Nichols obtuvo un mejor desempeño en cuanto al porcentaje de sobreimpulso generado en el sistema, el primer controlador mencionado tuvo 1,84% mientras que el segundo tuvo un 50% de sobreimpulso de la señal, a pesar de que el tiempo de establecimiento en ambos controladores es similar, se puede determinar que el mejor desempeño y eficiencia de control se obtuvo con el controlador basado en lógica difusa de tipo 2.

Recomendaciones

- Si la herramienta para el controlador difuso tipo 2 después de ser integrada a Matlab no se ejecuta o no despliega la ventana gráfica para el diseño del controlador al ingresar la función “*fuzzyt2*” en el workspace del programa, se debe cargar la versión 1.0 para poder utilizar el toolbox, caso contrario no se podrá utilizar la herramienta.
- El uso del toolbox FT2 para el diseño del controlador difuso tipo 2 es similar al de lógica difusa tipo 1, la diferencia radica en que después de haber diseñado el controlador es decir la creación tanto las variables de entrada, salida y sus reglas, éstas no se pueden borrar o reemplazar, sino que se debe volver a realizar todo el proceso desde cero, por lo cual se recomienda realizar un buen análisis para evitar crear nuevos diseños después de cada prueba que se desee ejecutar y así reducir el tiempo de implementación o simulación de un proceso.
- Para un mejor uso de la herramienta y evitar el despliegue de errores no esperados que se alejan del funcionamiento del controlador difuso ya sean en el workspace de Matlab como en Simulink, se recomienda agregar la carpeta de trabajo es decir la ruta donde se van a almacenar los archivos tanto del diseño del controlador (“.t2fis”) como para la simulación (“.slx”) al directorio del software a través de la ventana de “*Directorio de trabajo actual*” o “*Current Window*”, esto se debe hacer cada vez que se inicie el Matlab, o también se puede establecer como predeterminada la ruta deseada.
- Para lograr una mejor utilización de mayor número de variables tanto de entrada como de salida se sugiere realizar un estudio que ayude a desarrollar e implementar mejoras en la herramienta IT2-FLS existente, este proceso de investigación podría ayudar a un mejor desempeño de la herramienta, y así realizar un estudio a fondo para que la implementación de los sistemas difusos de tipo 2 sean más comunes en el campo de la ingeniería.

Bibliografía

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and control*, 8, 338-353.

Farfan-Martinez R., Ruz-Hernandez J.A., Rullan-Lara J.L., Torres-Hernandez W., Flores-Morales J.C. (2014) *Designing Type-2 Fuzzy Controllers Using Lyapunov Approach for Trajectory Tracking*. In: Jamshidi M., Kreinovich V., Kacprzyk J. (eds) *Advance Trends in Soft Computing. Studies in Fuzziness and Soft Computing*, vol 312. Springer, Cham

Hassani, Hossein & Zarei, Jafar. (2015). *Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller Design for the Speed Control of DC Motors*. *Systems Science & Control Engineering: An Open Access Journal*. 3. 10.1080/21642583.2015.1013644.

Yasmine Begum and G. V. Marutheeswar, "*Type-II Fuzzy Logic Controller for Temperature control of a Double pipe heat exchanger system*", 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC), Pune, 2015, pp. 1253-1258, doi: 10.1109/IIC.2015.7150940.

A. Al-Mahturi, F. Santoso, M. A. Garratt and S. G. Anavatti, "*An Intelligent Control of an Inverted Pendulum Based on an Adaptive Interval Type-2 Fuzzy Inference System*", 2019 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), New Orleans, LA, USA, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858948.

J. J. Brito, P. Toledo and S. Alayón, "*Virtual laboratory for automation combining inventor 3D models and Simulink control models: Virtual laboratory for automation*", 2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Tenerife, 2018, pp. 555-562, doi: 10.1109/EDUCON.2018.8363279.

C. C. Lee, "*Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller*", In *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 20, no. 2, pp. 404-418, March-April 1990, doi: 10.1109/21.52551.

Moo Medina, E. R., & Romero Romero, D. (2018). *Speed Control of a DC Motor with a Type-2 Fuzzy Logic Controller Subject to a Large Disturbance*. *Computación y Sistemas*, 22(2).

J. C. Mugisha, B. Munyazikwiye and H. R. Karími, "*Design of temperature control system using conventional PID and Intelligent Fuzzy Logic controller*", 2015 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY), Yilan, 2015, pp. 50-55, doi: 10.1109/iFUZZY.2015.7391893.

Mugisha, J. C., Munyazikwiye, B., & Karimi, H. R. (2015). *Design of temperature control system using conventional PID and Intelligent Fuzzy Logic controller*. 2015 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY). doi:10.1109/ifuzzy.2015.7391893

Bú, R. C. (1994). *Simulación: un enfoque práctico*. Editorial Limusa.

Navarro, R., Castro, E. O. B., Aguilar, J. A., Tumax, H. J. P. P., Chávez, J. D. N., Ramírez, E. R., ... & Castillo, C. (2004). *Ingeniería de control*. McGraw Hill.

Moore, H. (2007), *MATLAB para Ingenieros*.
Prentice Hall.

Obando, Oscar & Garita, Cesar. (2017). *Riesgo Químico: Un Modelo Computacional de Cálculo Mediante Lógica Difusa*.

Huang, Chenn-Jung Huang & Hu, Kai-Wen & Chen, Heng-Ming & Chang, Tao-Ku & Luo, Yun-Cheng & Lien, Yih-Jhe. (2012). *Application of type-2 fuzzy logic to rule-based intrusion alert correlation detection*. *Int. J Innov. Computing, Inform. and Control*. 8.

Fernández, José & Varela, David. (2018). *Desarrollo de un sistema domótico con controlador difuso y controlador manual, implementado en LabView y Arduino IDE*. *Research in Computing Science*. 147. 249-264. 10.13053/rcs-147-6-19.

Ifenthaler D. (2012). *Computer Simulation Model*. In: Seel N.M. (eds) *Encyclopedia of the Sciences of Learning*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_500.

Hurel, Jorge & Muñoz, Cristian & Reyes, Nestor. (2018). "Desarrollo de un sistema de extrusión de filamento para impresión 3D de bajo costo". 10.13140/RG.2.2.13677.28642.

Cero, Isra. (2016). *Aplicación del control PID y $PI \lambda D \mu$ fraccional a una planta de primer orden con retardo*. 10.13140/RG.2.2.29825.45920.

Robalino Granda, L. F., & Sánchez Illanes, A. I. (2016). *Diseño y simulación de un horno eléctrico doméstico*. 200 hojas. Quito: EPN.

Guarochico, V. Morán, M. Martín, M. (2012). *Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de Temperatura dentro de un horno industrial de resistencia*. Quito: EPN.

Azemi, Asad & Yaz, Edwin. (1996). *Utilizing SIMULINK and MATLAB in a graduate nonlinear systems analysis course*. *Frontiers in Education, Annual*. 2. 595-598 vol.2. 10.1109/FIE.1996.573018.

Rachmat, Haris & Mulyana, Tatang & Hasan, Sulaiman & Ibrahim, Mohd. (2017). *Design Selection of In-UUVAT Using MATLAB Fuzzy Logic Toolbox*. 538-545. 10.1007/978-3-319-51281-5_54.

Knospe, Carl. (2006). *PID control*. *Control Systems Magazine, IEEE*. 26. 30- 31. 10.1109/MCS.2006.1580151.

Alfaro, Víctor. (2002). *Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores*. Revista de la Universidad de Costa Rica. Volumen 12. 21-36.

Creus, Antonio. (2007). Regulación Automática. En Alfaomega (Ed. 8ª). *Instrumentación Industrial* (pp. 499-545). (No. TS156. 8. C73 2007.). Marcombo.

Chovet, Rogelio. (2004). El mundo de la matemática. *Modelos matemáticos*. Revista Fundación Polar, Últimas Noticias Venezuela (pp. 129-136). ISBN 980-379-092-7.

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Pearson

UNER. (31 de Octubre de 2017). *METODO DEL ESPACIO DE ESTADO*. Obtenido de http://www.bioingenieria.edu.ar/academica/catedras/control/archivos/material/Anexos/anexo_ve.pdf

Saldívar, M. & Vásquez, O. (2010). *Diseño y construcción de un control de temperatura para el experimento de Franck – Hertz* [Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Autónoma de México <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/handle/132.248.52.100/627>

Castro, J.R., Castillo, O., Martínez-Méndez, L.G. *Tool Box para Lógica Difusa Tipo-2 por Intervalos*. In: International Seminar on Computational Intelligence, IEEE - CIS Mexico Chapter, Tijuana, Mexico, October 9-11 (CD-rom proceedings) (2006).

Rodríguez Ayala, M. L., & Huertas Moreno, Y. E. (2016). *Metodología para el Diseño de Conjuntos Difusos Tipo-2 a partir de Opiniones de Expertos*. Ingeniería, 21(2), 121–137. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2016.2.a01>

Tufán Kumbasar (2022). *Caja de herramientas del sistema de lógica difusa tipo 2 de intervalo* (<https://github.com/kumbasart/type-2-fuzzy-logic-systems-matlab-toolbox/releases/tag/V1.2>), GitHub. Recuperado 10 de junio de 2022.

Mathworks (2022). *Interval type-2 fuzzy membership function - MATLAB*. Recuperado en Junio 09, 2022 de <https://la.mathworks.com/help/fuzzy/fismftype2.html>

Gutiérrez, M., Iturralde, S. (2017). *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control*. (1ª ed.). En Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE). (pp. 104-106).

Anexos

ANEXO A: Diseño en Simulink.

ANEXO B: Diseño de variable de entrada del controlador difuso tipo 2.

ANEXO C: Diseño de variable de salida del controlador difuso tipo 2.

ANEXO D: Diseño de reglas lingüísticas del controlador difuso tipo 2.

ANEXO E: Gráfico de superficie de comportamiento del controlador difuso tipo 2.