

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL POR MODOS  
DESLIZANTES DINÁMICO PARA UN SISTEMA DE DOS  
ENTRADAS DOS SALIDAS, APLICACIÓN: MÓDULO DE  
TEMPERATURA, TCLAB.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**MÓNICA ANDREA CONTRERAS GUERRA**

**DIRECTOR: Ing. MARCO ANTONIO HERRERA GARZÓN, MSc.**

**CODIRECTOR: Ing. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO, PhD.**

**Quito, mes año**

## **AVAL**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Mónica Andrea Contreras Guerra, bajo nuestra supervisión.

---

**Ing. MARCO ANTONIO HERRERA GARZÓN, MSc.  
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**Ing. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO, PhD.  
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Mónica Andrea Contreras Guerra, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

---

Mónica Andrea Contreras Guerra

## DEDICATORIA

*El desarrollo del presente trabajo junto con toda mi vida Universitaria va dedicado primero a Dios, quién me da cada día la fortaleza y sabiduría necesarias para enfrentar cada uno de mis retos, y a mis padres y hermanos que siempre están ahí para apoyarme y sacar lo mejor de mí.*

# AGRADECIMIENTO

Quiero empezar diciendo que no fue fácil llegar hasta aquí, pero sí que fue un camino lleno de altos y bajos que me han permitido crecer en diferentes aspectos de mi vida.

Empezaré por agradecer a Dios que me ha permitido pasar por tantas situaciones y llegar a este punto tan importante en mi vida, que a pesar de todo nunca me ha desamparado y siempre está y estará presente en cada etapa de mi vida.

A mis padres quienes han estado en todo momento para animarme, corregirme, regañarme, exhortarme, apoyarme e inspirarme cada día para ser mejor y cumplir cada una de mis metas. Se merecen todo el amor del mundo, son un ejemplo de perseverancia, amor y respeto a seguir. Los amo con todo el corazón, gracias por siempre estar ahí.

A mis hermanos Andrés, Manne, David, Pablo y Juan que nunca me han faltado y que sé nunca me faltarán. Cada risa, llanto, carcajada, molestada y tantas cosas más... anécdotas llenas de tanto amor y cariño que han nacido dentro del hogar, hacen que esta vida loca y divertida sea la mejor y que este camino de la Universidad sea siempre mas llevadero. Rescato de cada uno de ustedes el amor, el cariño, el respeto, la perseverancia, la disciplina, la honradez, humildad y tantas cualidades y virtudes que hacen de nuestra familia mi refugio seguro. Gracias por ser clave importante en mi vida. Los amo y espero que nuestra unidad nunca se pierda.

Cómo no agradecer a mi Nala, mi Fiona y mi Flash mis tres almitas que siempre están donde yo estoy, que llenan mi corazón de mucho amor y alegría con sus travesuras, gracias por su amor infinito mis perritos hermosos.

A la Flia. Pazmiño Castro que ha estado siempre pendiente y apoyándome en todo momento, gracias por todo su cariño hacia mi y a mi familia, los quiero muchísimo. Gracias por ser parte de nuestra familia.

A mis amigos que han sabido estar siempre en todo momento, de verdad que Dios ha bendecido mi vida con personas tan maravillosas de las que he aprendido muchas cosas. Yo soy la más feliz y estoy muy agradecida de tenerlos en mi vida. Sé y estoy segura de que nunca faltarán las risas y carcajadas con cada uno de ustedes.

A mis malcriaditos Maggie, Laylis, Isra, Sambo, Marquito y David.. Una amistad que creció en tan poco tiempo, pero que ha llenado mi corazón de tantas cosas hermosas y recuerdos que me dibujan una sonrisa enorme en la cara. Gracias por todos esos vinitos, las carcajadas que nunca faltan, las historias del Sambito que nos matan de risa y el cariño que existe entre nosotros. Son muy importantes en mi vida y espero que se sigan sumándose más anécdotas, paseos, parrilladas, vinitos y cosas bellas. Gracias por todo lo vivido, los quiero muchísimo.

A mi peladito lindo, que estuvo presente en mi último año de Universidad, pero que agradezco con todo el corazón el haberte conocido, soy muy feliz de tenerte en mi vida y poder compartir cosas lindas a tu lado. Te quiero muchísimo Andresito López.

Finalmente, quiero hacer un agradecimiento especial a todos los profesores que dan de su tiempo y conocimiento a cada uno de sus estudiantes, que sepan que son importantes en nuestras vidas y su labor es realmente importante para el desarrollo y crecimiento de nuestro país. Gracias por su guía, cariño, aprecio, esfuerzo, inteligencia y tantas cosas que nos permiten seguir aprendiendo y creciendo tanto personal como académicamente. En especial a Marquito y a Óscar Camacho que me han sabido guiar, además de ser pacientes en el desarrollo de mi Tesis. Gracias por su gran labor, nunca dejen de dar todo de ustedes a las futuras generaciones.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.2 ALCANCE.....	3
1.3 MARCO TEÓRICO .....	4
1.3.1 MÓDULO DE TEMPERATURA, TCLAB.....	4
1.3.2 APROXIMACIÓN DE SISTEMAS DE PRIMER ORDEN.....	5
1.3.3 DESACOPLAMIENTO DE VARIABLES.....	7
1.3.3.1 Interacción entre variables.....	8
1.3.3.2 Tipos de Desacopladores .....	8
1.3.4 CONTROL TIPO PID .....	11
1.3.5 CONTROL POR MODOS DESLIZANTES (SMC) .....	13
1.3.6 CONTROL DINÁMICO POR MODOS DESLIZANTES (DSMC).....	15
1.3.7 SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS POR OPTIMIZACIÓN DE MAPEO DE LA MEDIA-VARIANZA (MVMO).....	15
1.3.8 CRITERIOS DE DESEMPEÑO .....	18
1.3.9 GRÁFICOS RADIALES .....	19
2. METODOLOGÍA.....	19
2.1. Modelamiento del Sistema TCLAB.....	20
2.2. Interacción de variables .....	23
2.3. Desacoplamiento de variables .....	23
2.4. Diseño de controladores .....	27
2.4.1 Control tipo PID.....	27
2.4.2 Control por Modo Deslizante (SMC).....	28

2.4.3 Control Dinámico por Modo Deslizante (DSMC).....	30
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	38
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	46
4.1. CONCLUSIONES .....	46
4.2. RECOMENDACIONES .....	47
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
ANEXOS.....	50



## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se diseña e implementa un control dinámico por modos deslizantes (DSMC) para un sistema de dos entradas dos salidas (TITO: two input, two output), aplicado en el módulo de temperatura: TCLAB. Dicho módulo está conformado por un sistema embebido Arduino, un LED, dos transistores que actúan como calentadores y dos sensores de temperatura.

Por medio del método de identificación basado en la curva de reacción, se obtiene el modelo de primer orden más tiempo muerto (FOPDT) y se determina la interacción que existen entre las variables del sistema. Debido a la misma se implementa un desacoplador dinámico ideal en serie al sistema de temperatura. Una vez desacoplado el sistema se diseña e implementa el control DSMC, mismo que es comparado frente a un control proporcional integral (PI) y un control por modos deslizantes (SMC).

Las pruebas aplicadas con cada uno de los controladores son de cambio de referencia, incertidumbre en el modelado y ante una perturbación externa. Finalmente, para evaluar el desempeño de cada uno de los controladores se consideran los índices de rendimiento ISE, IAE, TVU, analizados por medio de curvas radiales.

Para la implementación, simulación y visualización de resultados, se usa el software MATLAB-Simulink, por medio de una interfaz gráfica desarrollada en App Designer.

**PALABRAS CLAVE:** control DSMC, curvas radiales, desacoplador dinámico ideal, índices de rendimiento, interacción entre variables, módulo de temperatura: TCLAB,

## **ABSTRACT**

This final degree project presents the design and implementation of a dynamic sliding modes control (DSMC) for a two input two output (TITO) system applied to the Temperature Control Lab (TCLAB) module. The module consists of an embedded Arduino system, an LED, two transistors acting as heaters and two temperature sensors. The reaction curve method is used to obtain the first order plus dead time model (FOPDT) and the interaction between the system variables is determined. Because of these interactions, an ideal dynamic decoupler in series is implemented. Once the system is decoupled, the DSMC control is designed and applied, and then compared to a proportional integral (PI) control and a sliding modes control (SMC).

The tests applied on each one of the controls are: change of reference, modelling uncertainty and an external perturbation. Finally, to evaluate the performance of each control, the ISE, IAE and TVU performance indexes are considered; these are analyzed by means of radial curves.

For the implementation, simulation and visualization of the results, the software MATLAB-Simulink is used through a graphical interface developed in App Designer.

**KEYWORDS:** DSMC, radial curves, ideal dynamic decoupler, performance indexes, interaction between the variables, TCLAB temperature module.

# 1. INTRODUCCIÓN

Generalmente el control de procesos o sistemas con múltiples entradas, múltiples salidas (MIMO), se ha realizado por medio de lazos de control mono-variables e independientes, seleccionando la variable a controlar mediante una variable manipulada. En función de lo mencionado, se ha propuesto el desarrollo de controladores de una entrada y una salida (SISO: single input single output), que cumplen con su correcto funcionamiento en caso de que el sistema no presente mayor interacción entre las variables, o que ésta sea casi despreciable. Sin embargo, cuando las interacciones entre variables son importantes, ajustar los lazos del sistema mediante este tipo de control, puede afectar su rendimiento hasta el punto de desestabilizar el sistema[1].

Para el control de sistemas MIMO, es importante considerar la interacción que existe entre cada una de las variables. Dicha interacción representa una característica inherente del sistema, en donde una variable de entrada tiene la capacidad de afectar o no el diseño de control en el sistema y como resultado a la salida de este [2]. Debido a esta interacción existen diferentes metodologías de control en donde se aborda un control multivariable descentralizado, el cual contempla un número específico de controladores correspondientes cada uno a su variable de interés, considerando los efectos que llegan a tener debido a la interacción presente. Es importante mencionar que, para el diseño de un control de este tipo, es necesario tomar en consideración el emparejamiento adecuado entre las variables en base a la matriz de ganancias relativas (RGA), criterio establecido por Bristol [2]. En caso de existir una interacción considerable, se incorpora una red de desacoplo en serie al proceso para eliminar o reducir la interacción existente entre las variables y así trabajar con sistemas desacoplados, junto con diferentes técnicas de control [2].

Una red de desacoplo es aplicable en sistemas cuadrados [1], es decir un sistema que presente mismo número de entradas y de salidas, en donde una vez emparejadas las variables, permite que las variables de interés sean controladas de manera independiente.

El Módulo de Temperatura “Temperature Control Lab (TCLAB)”, se encuentra conformado por dos transistores que actúan como calentadores [3] y dos sensores de temperatura, que en conjunto representan un sistema multivariable de dos entradas y dos salidas (TITO), correspondiendo a un sistema cuadrado, que responde al mecanismo de funcionamiento descrito a continuación. Al hablar de un sistema de temperatura, se generaliza a un proceso de transferencia de calor, donde el calor es transferido: por conducción, si es directamente del calentador hacia el sensor; por convección, si se da por la circulación propia del calor

en el ambiente y finalmente, por radiación, si se da del disipador de calor hacia los sensores. Debido a las características mencionadas la interacción entre las salidas del sistema se da de manera permanente [4], por lo que se considera el uso de un desacoplador en serie al sistema.

Para determinar el modelo del sistema TITO, se propone aplicar una entrada paso a cada entrada del sistema para la identificación del modelo utilizando el método de curva de reacción. Debido a la interacción existente por la transferencia de calor presente se tiene un sistema de  $2 \times 2$ , el cual es modelado por una matriz de funciones de transferencia con modelos de primer orden más retardo (FOPDT).

Por medio de una red de desacoplo en serie al sistema las interacciones se pueden reducir o hasta eliminar, cumpliendo la función de realizar un control en lazo cerrado a un sistema MIMO cuadrado [5]. Una vez desacoplado el sistema se trabaja con sistemas independientes en los que se puede aplicar un control descentralizado, es decir controles mono-variables dedicados a las variables de interés.

En este trabajo se realizará el estudio de diferentes tipos de desacopladores y se aplicará el de mejor desempeño, implementando en el módulo de temperatura TCLAB, para posterior a esto trabajar con controladores mono-variables.

Se propone la implementación de un control dinámico por modos deslizantes (DSMC) el cual será comparado con un control proporcional integral (PI) y un control por modos deslizantes (SMC). Adicional a esto se propone realizar una comparación de los controladores en base a índices de rendimiento ISE, IAE y TVU.

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

Diseñar e implementar un control dinámico por modos deslizantes para un sistema de dos entradas – dos salidas, aplicación: Módulo de temperatura, TCLAB.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Realizar una revisión bibliográfica de sistemas TITO, desacopladores, así como también estudiar los diferentes componentes del módulo de temperatura TCLAB.
- Determinar el modelo del sistema TCLAB utilizando la aproximación a un sistema de primer orden más retardo basado en el método de curva de reacción, para analizar el grado de interacción de las variables mediante el criterio de Bristol e implementar un desacoplador en serie aplicado al sistema TCLAB para desacoplar sus variables.
- Diseñar e implementar un esquema de control DSMC utilizando el sistema desacoplado aplicado al sistema TCLAB.
- Realizar pruebas experimentales de: cambio de referencia paso, incertidumbre en el retardo de tiempo y la perturbación externa y comparar el rendimiento del controlador DSMC diseñado contra un esquema de controlador tipo PID y un SMC mediante índices de rendimiento ISE, IAE, TVU para las pruebas experimentales del objetivo anterior.
- Diseñar e implementar una interfaz gráfica, para la visualización del comportamiento del sistema con diferentes esquemas de control.

## 1.2 ALCANCE

- Determinar un modelo aproximado del sistema TCLAB utilizando la aproximación a sistemas de primer orden más retardo utilizando el método de la curva de reacción, para generar la matriz de ganancias relativas (RGA) y determinar el acoplamiento de las variables utilizando el criterio de Bristol.
- Realizar la revisión bibliográfica de desacopladores para sistemas TITO y seleccionar el más adecuado para implementar en el módulo de temperatura TCLAB.
- Diseñar e implementar un esquema de control DSMC para el sistema TCLAB.

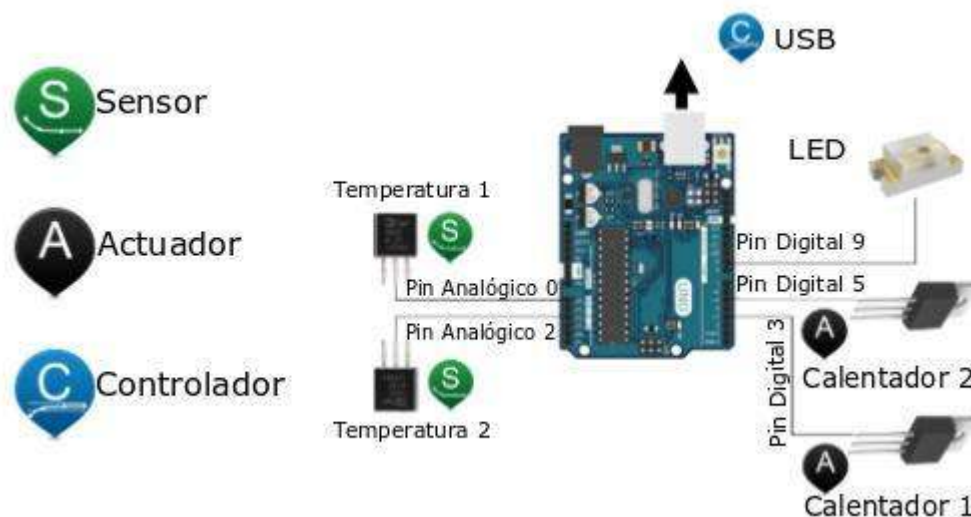
- Realizar pruebas experimentales de: cambio de referencia paso, incertidumbre en el retardo de tiempo y de perturbación externa.
- Realizar la comparación del controlador DSMC diseñado contra esquemas de controlador tipo PID y SMC mediante índices de rendimiento ISE, IAE, TVU para las pruebas experimentales del ítem anterior.
- Diseñar e implementar una interfaz gráfica, para visualizar el comportamiento del sistema con los diferentes esquemas de control.

### 1.3 MARCO TEÓRICO

A continuación, se detalla la literatura correspondiente a: Módulo de temperatura TCLAB, aproximación de sistemas de primer orden más retardo, interacción entre variables en un sistema MIMO, desarrollo de desacopladores, control tipo PID, control por modos deslizantes (SMC), control dinámico por modos deslizantes (DSMC), sintonización de parámetros por MVMO y finalmente criterios de desempeño de los controladores.

#### 1.3.1 MÓDULO DE TEMPERATURA, TCLAB

El módulo de Temperatura TCLAB, es una aplicación de control con realimentación, conformada por un Arduino Leonardo, un LED, dos transistores o calentadores y dos sensores de temperatura[4], como se ve en la Figura 1.1, que en conjunto representan un sistema (TITO), dos entradas dos salidas, cuadrado.



**Figura1. 1** Módulo de Temperatura (TCLAB) [4]

La conexión hacia el computador se realiza por medio de un puerto serial USB, permitiendo realizar procesos de control haciendo uso de Python, Matlab y Simulink, y para la correcta

operación de los calentadores se requiere de un conector eléctrico de 5V, como se ve en la Figura 1.2. [3]



**Figura1. 2** Componentes Módulo de Temperatura (TCLAB) [4]

La manera de operación del módulo, una vez establecida una temperatura deseada, se da de la siguiente manera, la energía térmica de los calentadores es transferida por: conducción, si es directamente del calentador hacia el sensor; por convección, si se da por la circulación propia del calor en el ambiente y finalmente por radiación, si se da del disipador de calor hacia los sensores. Permitiendo realizar la identificación del modelo del sistema y el desarrollo de controladores[3], es importante mencionar que al hablar de temperatura la interacción que existe en el sistema es considerable.

### 1.3.2 APROXIMACIÓN DE SISTEMAS DE PRIMER ORDEN

En la mayoría de los procesos en donde se requiera aplicar un control en lazo cerrado, es necesario el desarrollo del control sobre una función de transferencia basada en el modelo para la ejecución del control sobre el proceso. La obtención del modelo de un sistema, se lo realiza al aplicar un cambio de referencia tipo paso a la variable de entrada del sistema en lazo abierto [6], en donde se observa y analiza la salida, determinada por una curva de reacción de la que se desea obtener el modelo.

Es importante tomar en consideración que la magnitud de la entrada paso que se aplica al sistema no provoque un cambio brusco a la salida, de esta manera se evitan los efectos dominantes de las no linealidades en el sistema [7]. A continuación, se presentan tres métodos para la identificación del modelo de primer orden más retardo (FOPDT), representado por la función de transferencia que se indica en la ecuación 1.1. [6]

$$G(S) = \frac{K}{\tau S + 1} e^{-toS} \quad (1.1)$$

Donde:

$K$  = Ganancia del Sistema

$\tau$  = Constante de tiempo

$to$  = Tiempo de retardo

### Método I

Este método fue adaptado por Ziegler y Nichols (1942), en donde se determinan los parámetros en función de la magnitud del cambio en la entrada  $\Delta U$ , la magnitud del cambio en la salida  $\Delta Y$ , la pendiente en la salida  $m$  y el tiempo de retardo  $t_0$ . Correspondiendo a las siguientes relaciones:[8]

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U} ; \quad \tau = \frac{\Delta Y}{m} \quad (1.2)$$

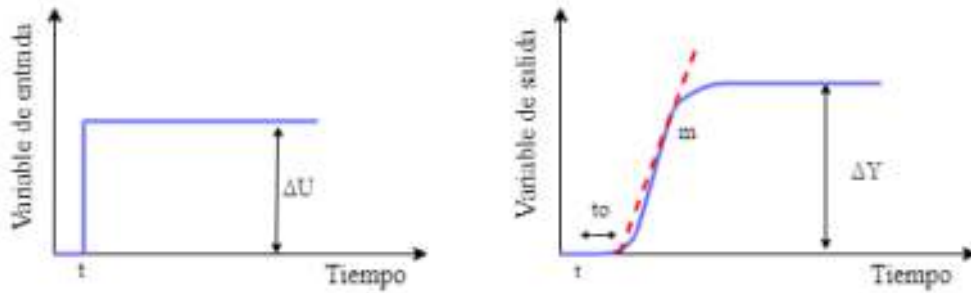


Figura1. 3 Método I de identificación

### Método II

De igual manera que en el primer método se define la ganancia del sistema como la relación de la magnitud de salida con la magnitud de la entrada, el tiempo de retardo se lo determina de manera gráfica y finalmente la constante de tiempo se determina de la siguiente manera.[6]

$$\tau = t_{63.2\%} - t_0 \quad (1.3)$$

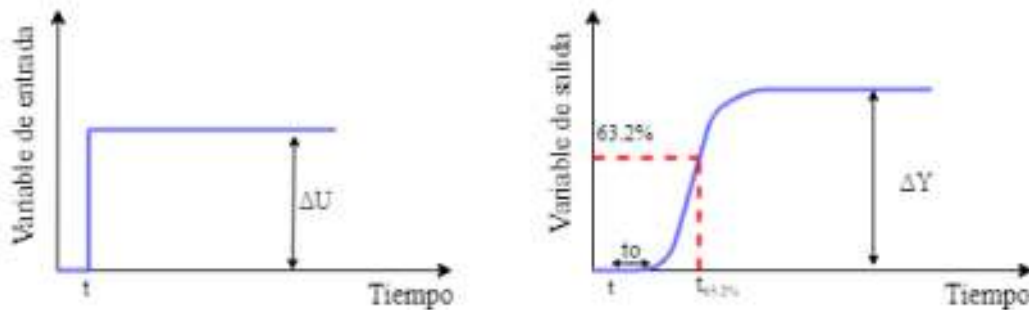


Figura1. 4 Método II de identificación

### Método III

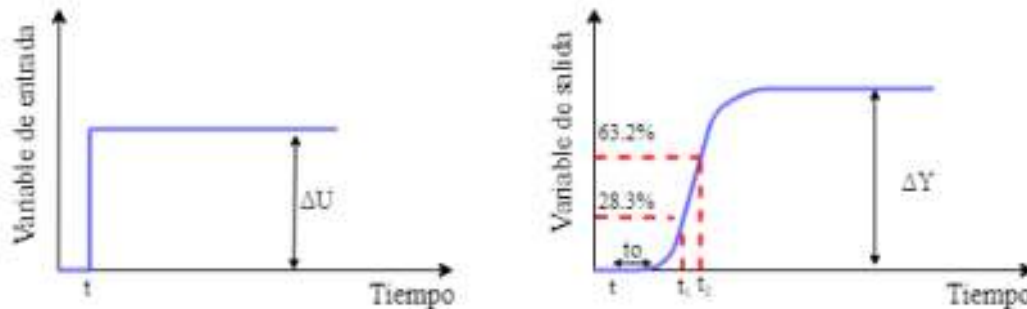
Finalmente, para este método se consideran dos puntos de operación, al 63.2% y al 28.3% para determinar la constante de tiempo y el tiempo de retardo como se puede ver en las



ecuaciones 1.4 y 1.5 respectivamente, siendo este método el más preciso para determinar el modelo de un sistema, adicionalmente la ganancia se obtiene de igual manera con la relación de salida con la entrada.[8]

$$\tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \quad (1.4)$$

$$t_0 = t_2 - \tau \quad (1.5)$$



**Figura1. 5** Método III de identificación

### 1.3.3 DESACOPLAMIENTO DE VARIABLES

En sistemas multivariables es común encontrar la interacción entre las variables manipuladas del sistema. En caso de presentar una interacción pequeña, se da solución por medio de controladores que permiten disminuir y controlar dicha interacción. Al presentarse una interacción mayor, el ajuste de los lazos de control se dificulta, en donde los lazos de control se ven afectados directamente, hasta llegar a desestabilizar el sistema.

En base a lo mencionado, se han propuesto soluciones por medio del desacoplamiento de sus variables, con el objetivo de disminuir o hasta eliminar dicha interacción. En donde se descompone el sistema multivariable en varios sistemas mono-variables en función del número de variables con el que se trabaje. Para poder desacoplar un sistema se deben considerar las siguientes características: [9]

- Sistemas cuadrados, mismo número de entradas y salidas ( $n \times n$ ).
- Procesos que pueden presentar retardos en el tiempo.
- Determinante de la matriz del sistema no sea igual a cero.
- Grado de interacción de las variables mayor a la unidad.

A continuación, se presenta la interacción entre variables en base a la matriz de ganancias relativas (RGA) y los tipos de desacopladores que se han desarrollado.

### 1.3.3.1 Interacción entre variables

La interacción que existe entre las variables de un sistema es un parámetro que se lo analiza en función de la matriz de ganancias relativas (RGA), criterio establecido por Bristol.

La RGA permite cuantificar el grado de integración entre las variables por medio de un índice de interacción, en donde: Si el índice es positivo y cercano a la unidad se establecen las variables controladas y su paridad  $y$ ; si el valor se aleja del valor unitario, indica una mayor interacción entre las variables[10]. Adicionalmente, la RGA cumple con las siguientes características:

- Es normalizada
- Es adimensional
- La suma de sus elementos tanto en filas como en columnas es igual a uno.

Para determinar la RGA, se consideran las ganancias del sistema en estado estable y está definida por la ecuación 1.7.

$$G(0) = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) \quad (1.6)$$

$$\Lambda = G(0) \circ (G(0)^{-1})^T \quad (1.7)$$

En donde el producto  $\circ$ , denominado producto Schur en [11], corresponde a la multiplicación término a término de los valores presentes en las matrices.

### 1.3.3.2 Tipos de Desacopladores

Una vez analizada la paridad de las variables en el sistema y el grado de interacción entre las mismas, se procede al diseño de un desacoplador apropiado al sistema, que permita disminuir o eliminar la interacción que existe entre las variables del sistema.

La estructura de un sistema desacoplado se presenta en la Figura 1.6, compuesto por  $G(s)$  representando a la planta,  $D(s)$  corresponde al desacoplador y  $C(s)$  el control aplicado[9], junto con las referencias  $r1$  y  $r2$  que se aplican al sistema. En el cual se considera que las salidas  $y1$  y  $y2$ , se encuentran ya desacopladas.



Figura1. 6 Esquema general de un sistema desacoplado

De donde el producto aplicado a la red de desacoplo junto con el proceso, dará como resultado un sistema diagonal, denominado como el nuevo proceso aparente  $Q(s)$ , como se ve en la ecuación 1.8.

$$Q(s) = G(s)D(s) \quad (1.8)$$

En la literatura se han estudiado dos tipos de desacopladores, los cuales se presentan a continuación:

#### Desacoplador Estático

Este tipo de desacoplador es mayormente usado en sistemas que presenten parte integral, ya que no presenta un buen desempeño en el cual la influencia de frecuencias altas puede afectar el comportamiento del sistema. [5]

Se lo diseña en base a las ganancias del sistema en estado estable, como se muestra a continuación:

$$D(s) = G(0)^{-1} \quad (1.9)$$

$$D_{12} = \frac{K_{12}}{K_{11}} \quad D_{21} = \frac{K_{21}}{K_{22}} \quad (1.10)$$

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & D_{12} \\ D_{21} & 1 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

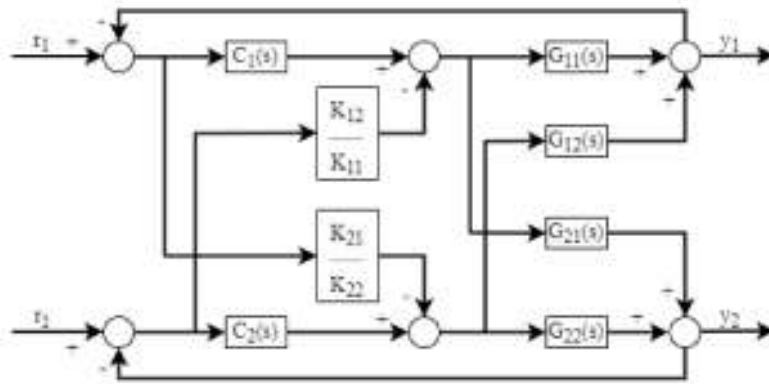


Figura1. 7 Esquema Desacoplador Estático

### Desacoplador Dinámico

Los desacopladores dinámicos presentan un mejor desempeño[5], considerando los grados de libertad que presenta el sistema, para un proceso  $(n \times n)$  disponiendo de  $n$  grados de libertad, que son usados para determinar las funciones de transferencia correspondientes a un proceso aparente  $Q(s)$ , o para establecer los  $n$  elementos que permitirán el desacoplamiento de variables[9] y se clasifican en:

- Desacoplador dinámico ideal
- Desacoplador dinámico simplificado
- Desacoplador dinámico inverso

### Desacoplador dinámico ideal

Para el diseño del desacoplador ideal, se considera la matriz del controlador, matriz del desacoplador y la matriz correspondiente al proceso, como se muestra a continuación:

$$C(s) = \begin{bmatrix} C_1(s) & 0 \\ 0 & C_2(s) \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

$$D(s) = \begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

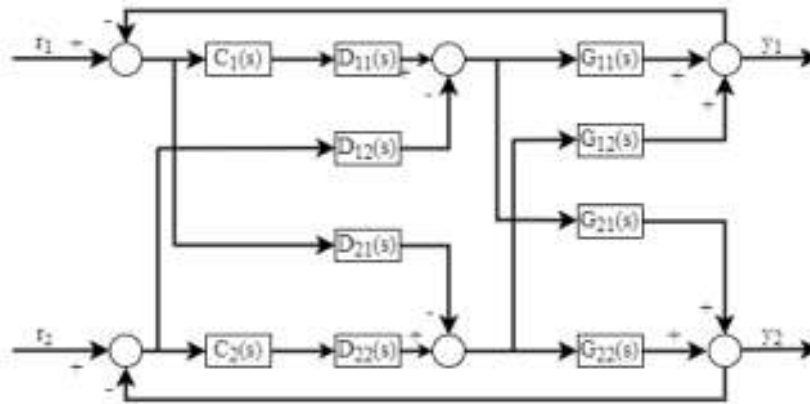
$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

El desarrollo del desacoplador se presenta a continuación:

$$D(s) = G^{-1}(s)Q(s) \quad (1.15)$$

El objetivo de este tipo de desacoplador es obtener un sistema aparente representado por una matriz diagonal, en donde sus términos sean iguales a la diagonal principal del proceso principal[5], como se ve en la ecuación 1.16.

$$Q(s) = \begin{bmatrix} q_{11}(s) & 0 \\ 0 & q_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & 0 \\ 0 & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (1.16)$$



**Figura1. 8** Esquema Desacoplador dinámico ideal

### Desacoplador dinámico simplificado

Este tipo de desacoplador es mayormente usado y se lo diseña de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} q_{11} & 0 \\ 0 & q_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Realizando la matemática correspondiente en la ecuación 1.17 se llegan a considerar las siguientes restricciones:

$$G_{11}D_{12} + G_{12}D_{22} = 0 \quad (1.18)$$

$$G_{21}D_{11} + G_{22}D_{21} = 0 \quad (1.19)$$

Este tipo de desacoplador establece definir en función de los grados de libertad los elementos del desacoplador, y determinar el resto[9]. Considerando esto, se fija a  $D_{11}$  y  $D_{22}$  igual a 1, y se obtiene el desacoplador de la siguiente manera:

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{12}}{G_{11}} \\ -\frac{G_{21}}{G_{22}} & 1 \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

Dando como resultado el proceso aparente de la siguiente manera:

$$Q(s) = \begin{bmatrix} G_{11} - \frac{G_{21}G_{12}}{G_{22}} & 0 \\ 0 & G_{22} - \frac{G_{21}G_{12}}{G_{11}} \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

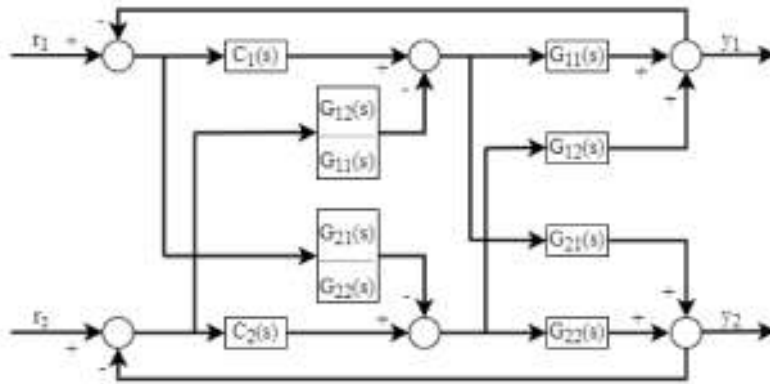


Figura1. 9 Esquema Desacoplador dinámico simplificado

### Desacoplador dinámico inverso

Para el diseño de este desacoplador se considera el mismo procedimiento usado para el desacoplador simplificado[5]. Sin embargo, se considera otro tipo de esquema como se ve en la Figura 1.10.

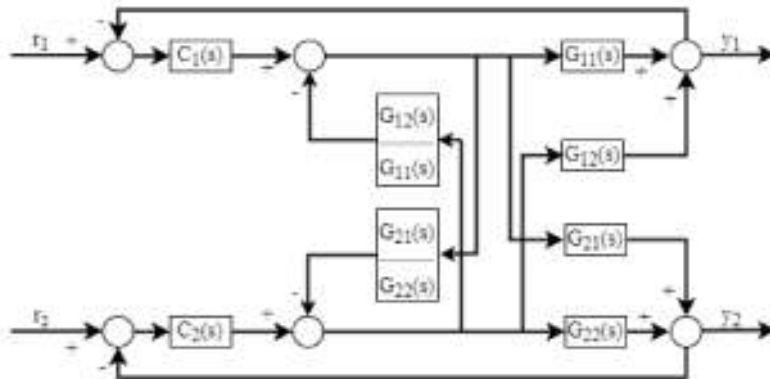


Figura1. 10 Esquema desacoplador dinámico inverso

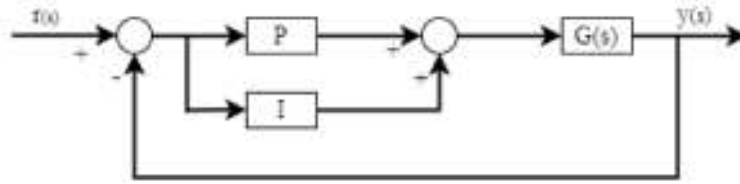
### 1.3.4 CONTROL TIPO PID

La aplicación de este tipo de controladores abarca más del 90% en la industria de sistemas de control, debido a su versatilidad y sencilla aplicación. Estos controladores basan su funcionamiento en base a tres acciones de control[12]:

- Control proporcional (P)
  - Salida del controlador es proporcional al error
 
$$G_c(s) = K_p \quad (1.22)$$
- Control Integral (I)
  - Salida del controlador es proporcional a la integral del error
 
$$G_c(s) = \frac{K_i}{s} = \frac{K_p}{T_i s} \quad (1.23)$$
- Control Derivativo (D)
  - Salida de controlador es proporcional a la derivada del error
 
$$G_c(s) = K_d s \quad (1.24)$$

Estos controles al interactuar entre sí conforman tres tipos de control como se muestra a continuación:

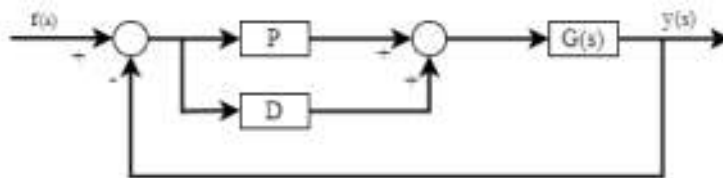
**Control Proporcional- Integral PI:**



**Figura1. 11** Esquema control PI

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_p}{T_i s} \tag{1.25}$$

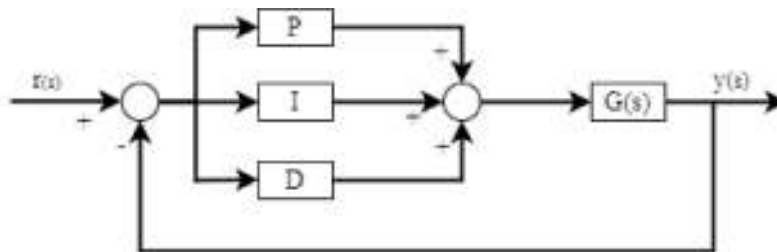
**Control Proporcional- Derivativo PD:**



**Figura1. 12** Esquema control PD

$$G_c(s) = K_p [1 + T_d s] \tag{1.26}$$

**Control Proporcional-Integral- Derivativo PID:**



**Figura1. 13** Esquema control PID

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{1.27}$$

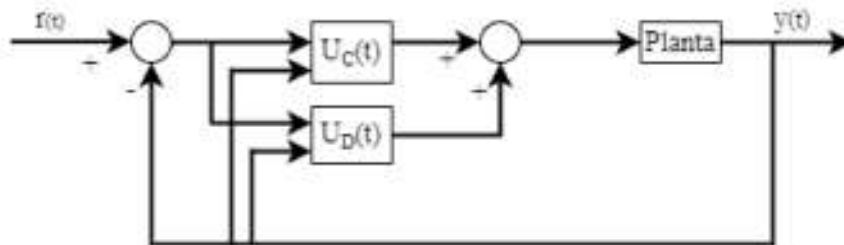
Para la sintonización de los parámetros proporcional, integral y derivativo, se lo realiza por medio de criterios establecidos en los que se consideran los valores de: Ganancia, retardo en el tiempo y constante de tiempo correspondientes al modelo del sistema. En la tabla 1 se presentan dos criterios propuestos por Ziegler-Nichols y Dahlin respectivamente:

**Tabla 1.1** Criterios de sintonización control PID

Control PID			
Criterio	$K_p$	$T_i$	$T_d$
Ziegler-Nichols	$\frac{1.2}{K} \left(\frac{t_o}{\tau}\right)^{-1}$	$2t_o$	$0.5t_o$
Dahlin	$\frac{1}{2K} \left(\frac{t_o}{\tau}\right)^{-1}$	$\tau$	$t_o/2$

### 1.3.5 CONTROL POR MODOS DESLIZANTES (SMC)

El Control por Modos Deslizantes es un control de tipo robusto, derivado de una estructura de control variable [13]. Su diseño depende directamente del modelo de primer orden más tiempo muerto (FOPDT) del sistema a controlar, juntos con sus parámetros [14] y será desarrollado en su totalidad en el capítulo dos del presente proyecto.



**Figura1. 14** Estructura general Control por Modos Deslizantes

Para el diseño se considera inicialmente el tipo de superficie con la que se va a trabajar, siendo esta una superficie derivativa o integral como se indica en la ecuación 1.28 y 1.29 respectivamente. Por medio de esta el proceso se deslizará hasta llegar a su valor deseado, como se ve en la Figura 1.15. La superficie permite dividir el plano en dos regiones en donde la función  $\sigma(t)$  tiene diferente signo [13].

$$\sigma(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e(t) \quad (1.28)$$

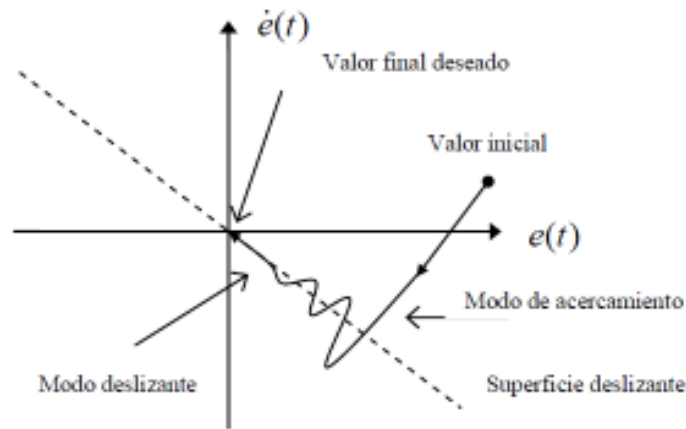
$$\sigma(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^n \int e(t) \quad (1.29)$$

En donde:

$e(t)$  : representa el error entre la salida y la referencia del sistema.

$n$  : corresponde al orden del sistema.

$\lambda$  : parámetro de sintonización de la superficie.



**Figura1. 15** Interpretación SMC [14]

Por medio de este control se propone que el valor de salida se mantenga igual al valor de la referencia, obteniendo un error igual cero constante [13], cumpliendo la siguiente relación:

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} = 0 \quad (1.30)$$

La estructura de la ley de control se compone por dos partes, como se muestra a continuación [13]:

$$U_{SMC}(t) = U_C(t) + U_D(t) \quad (1.31)$$

En donde:  $U_C(t)$  corresponde a la parte continua, definida por la variable controlada  $Y(t)$ , y la referencia a la que se desea llegar  $R(t)$ . Se encarga de mantener la variable controlada sobre la superficie.

$$U_C(t) = f[Y(t), R(t)] \quad (1.32)$$

Y  $U_D(t)$  corresponde a la parte discontinua, definida por la función sigma, como se ve en la ecuación 1.33. Se encarga de la conmutación del control, asegurando que la variable llegue a la referencia.

$$U_D(t) = K_D \left( \frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)| + \delta} \right) \quad (1.33)$$

El término  $K_D$ , es responsable de que la variable llegue al valor deseado y  $\delta$  permite reducir las oscilaciones de alta frecuencia que se presentan en la ley de control, conocidas como *chattering* [14], que afectan directamente sobre el elemento final de control.

La estabilidad y alcanzabilidad del sistema se analiza por medio del teorema de Lyapunov en donde se establece que: si existe una función positiva, en este caso definida como la superficie, sobre la cual se desliza el sistema; y su derivada es negativa, entonces el sistema es estable, cumpliendo la siguiente relación.[15]

$$\sigma(t)\dot{\sigma}(t) < 0 \quad (1.34)$$



### 1.3.6 CONTROL DINÁMICO POR MODOS DESLIZANTES (DSMC)

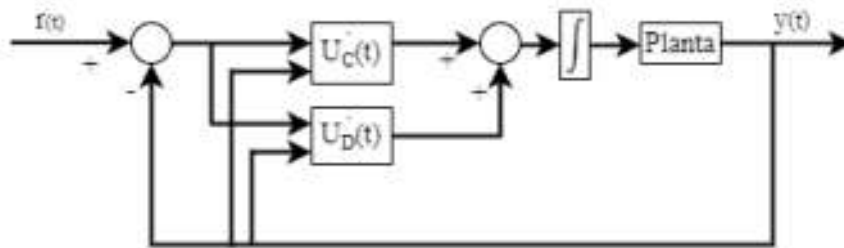
El Control Dinámico por Modos Deslizantes, es un control robusto que tiene como objetivo principal reducir o hasta eliminar el efecto de chattering, trabajando con una señal de control suavizada, transformando la conmutación de la ley de control del SMC a una nueva ley de control de conmutación. Además, ofrece estabilidad al sistema, por medio del cual el desempeño es mejor bajo condiciones que pueden llegar a afectar al mismo [16].

Para el diseño del DSMC se considera el modelo de primer orden más tiempo muerto (FOPDT) del sistema, con aproximación de Padé [16]. Seguido de esto, es necesario definir el tipo de superficie con la que se va a trabajar, en función del control que se vaya a realizar.

Se consideran diferentes esquemas que permiten el control de sistemas con retardo o sistemas que presenta respuesta inversa, como lo es el control de modelo interno (IMC) o el control propuesto por linoya y Alpeter, que junto con el desarrollo similar a un SMC se obtiene un DSMC [16]. El diseño en su totalidad se lo desarrollará en el capítulo dos del presente proyecto.

La ley de control que representa el DSMC hace uso de un integrador, como se ve en la Figura 1.16, que garantiza el rechazo a perturbación y contribuye con la reducción de oscilaciones de alta frecuencia o chattering. Al igual que el SMC, está conformada por una parte continua  $\dot{U}_C$  y una parte discontinua  $\dot{U}_D$ , como se muestra en la ecuación 1.35:

$$\dot{U}_{DSMC}(t) = \dot{U}_C(t) + \dot{U}_D(t) \quad (1.35)$$



**Figura1. 16** Esquema general Control Dinámico por Modos Deslizantes

La parte continua se relaciona directamente con el modo deslizante en el que trabaja el sistema, manteniendo la variable de interés sobre la superficie. La parte discontinua se encarga de atenuar el efecto de chattering y que la variable llegue al valor de referencia por medio de:

$$\dot{U}_D(t) = K_D \text{sgn}(\sigma) \quad (1.36)$$

En donde  $K_D$  corresponde a la ganancia que permite llegar al valor de referencia y  $\sigma$  representa la superficie sobre la cual se va a trabajar. De igual manera que en el SMC, para analizar la estabilidad de la superficie, se debe cumplir con el teorema de Lyapunov.

### 1.3.7 SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS POR OPTIMIZACIÓN DE MAPEO DE LA MEDIA-VARIANZA (MVMO)

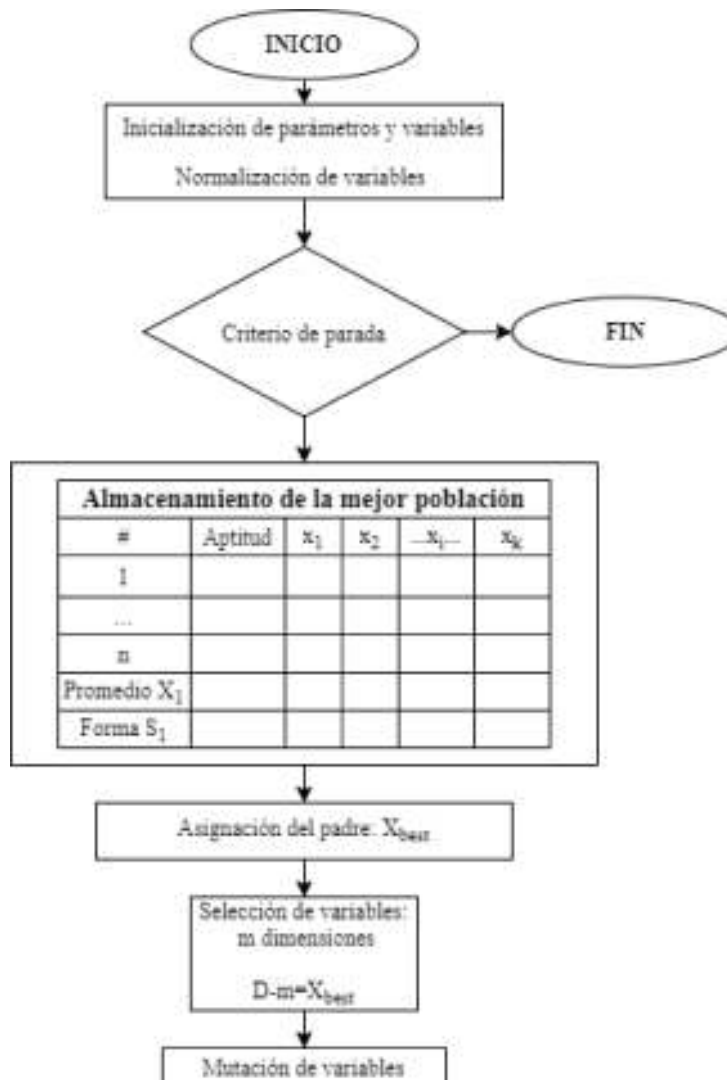
Para la determinación de los parámetros existentes en cierto tipo de controladores, se plantean diferentes métodos que en base a criterios de desempeño, establecidos como función objetivo, se seleccionan las mejores variables obtenidas. El MVMO es un método de optimización heurística, que establece su funcionamiento en base a una función de

mapeo que es aplicada sobre la mutación de una nueva descendencia, proveniente y generada de la media y la varianza obtenida de la mejor población que se haya encontrado.

Es un algoritmo robusto definido por la evolución de una partícula, que opera sobre un grupo de posibles soluciones asegurando una optimización en un número de iteraciones limitadas. Además, trabaja con límites establecidos en un rango de  $[0,1]$  [17].

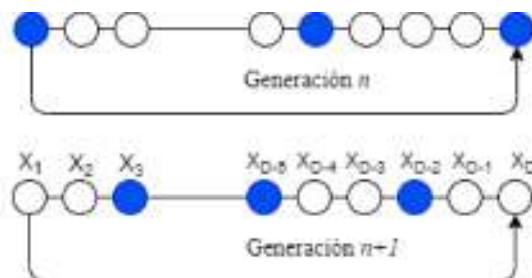
Las entradas en el algoritmo corresponden a la media y varianza de las mejores soluciones que se han obtenido en cada iteración, obteniendo salidas normalizadas de 0 a 1 de la función de mapeo. En la Figura 1.17 se presenta el diagrama de flujo correspondiente al algoritmo. Desarrollado de la siguiente manera:

- Se inicializan las variables y parámetros del algoritmo.
- En lazos iterativos se analiza la aptitud o función objetivo de cada individuo, estableciendo que: a menor valor de aptitud, mejor es el individuo.
- Se analiza un criterio de finalización comparando el número establecido de evoluciones de aptitud.
- Almacenamiento de soluciones, consiste en ir almacenando los  $n$ -mejores individuos junto con su valor de aptitud en un archivo.
- Asignación de padres, corresponde a denominar padre a la primera solución, definiéndola como:  $X_{best}$ .
- Selección de variables: se determinan la descendencia en  $m$  direcciones establecidas y el resto de las variables toman el valor del padre.
- Mutación: se asigna un nuevo valor a cada dimensión de  $m$ .

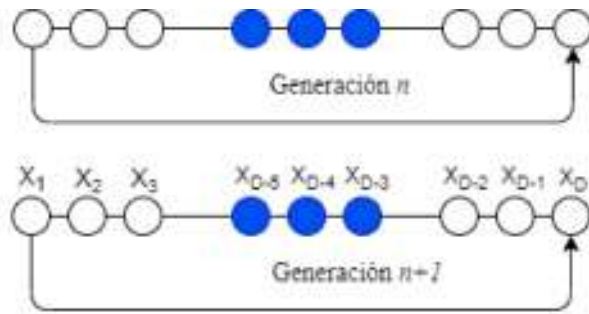


**Figura1. 17** Algoritmo MVMO

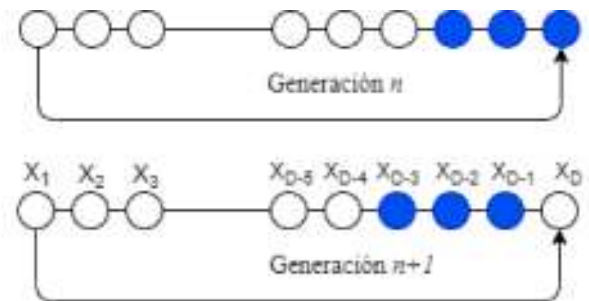
Para la selección de las variables el algoritmo considera una búsqueda en función de la media que es almacenada en las dimensiones  $m$  por medio de cuatro estrategias que se presentan en las Figuras 1.18,1.19, 1.20 y 1.21, las más comunes y mayormente usadas corresponden las estrategias 2 y 4 [18].



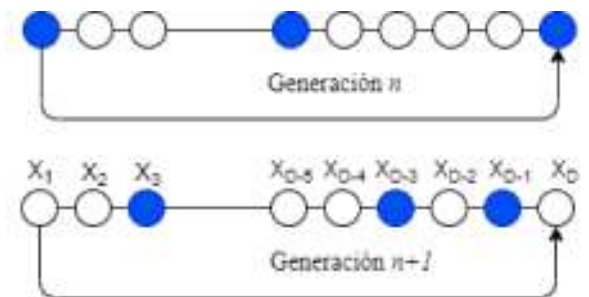
**Figura1. 18** Estrategia1. Aleatoria



**Figura1. 19** Estrategia 4. Grupo de vecinos- Pasos por bloques



**Figura1. 20** Estrategia 3. Grupos de vecinos-Pasos simples



**Figura1. 21** Estrategia 4. Selección aleatoria- Secuencial

### 1.3.8 CRITERIOS DE DESEMPEÑO

Para el análisis de un controlador se han establecidos diferentes criterios que permiten cuantificar el desempeño de este. A continuación, se presentan tres índices de rendimiento que serán considerados para el presente proyecto[19].

#### **ISE**

Definido por la integral del error cuadrático.

$$ISE = \int e^2(t)dt \quad (1.36)$$

#### **IAE**

Definido por la integral del valor absoluto del error.

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad (1.37)$$

#### **TVU**

Definido por la sumatoria de la variación total de la señal de control.

$$TVU = \sum_{k=1}^{\infty} u(k+1) - u(k) \quad (1.38)$$

### 1.3.9 GRÁFICOS RADIALES

Los gráficos radiales son usados para la comparación cuantitativa de múltiples variables a partir de la distancia de sus ejes, o por el área que ocupa el polígono. Son también usados para determinar cuál variable es mayor una sobre la otra, dentro de una base de datos, desarrollando un análisis para establecer o definir un desempeño.

La composición de estos gráficos se da de la siguiente manera: Cada variable es provista por un eje que inicia desde el centro del gráfico y cada eje se direcciona de manera radial con distancias iguales uno del otro. Adicionalmente cuenta con una cuadrícula que sirve de guía para la conexión entre cada eje[20].

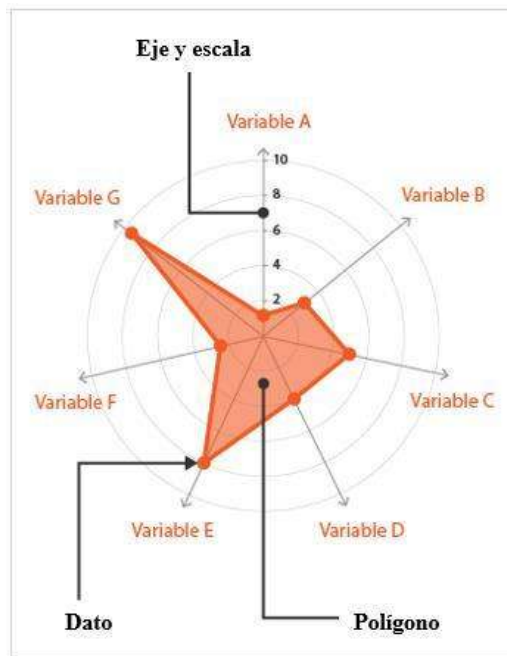


Figura1. 22 Gráfico Radial [20]

Para analizar el desempeño de un controlador por medio de gráficos radiales, se consideran los índices de rendimiento como variable en los ejes. En donde se compara el área obtenida por cada control implementado, estableciendo el mejor control cuya área sea menor.

## 2. METODOLOGÍA

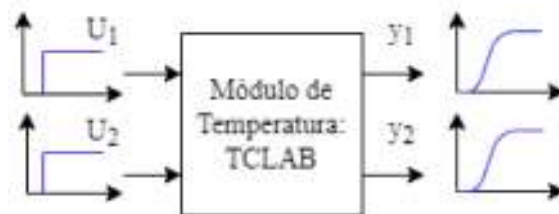
En este capítulo se detallan la metodología y procedimientos necesarios para el cumplimiento de los objetivos propuestos en el presente proyecto, en base a la bibliografía expuesta en el capítulo uno.

Iniciando por el modelamiento del sistema TCLAB, se presenta el análisis de la interacción que existen entre las variables del sistema junto con el diseño de un desacoplador, el diseño de los controladores y finalmente el diseño de la interfaz gráfica.

## 2.1. Modelamiento del Sistema TCLAB

El módulo de temperatura TCLAB, representa un sistema de dos entradas dos salidas (TITO), conformado por dos entradas, determinadas por dos transistores que se comportan como calentadores, y dos salidas de temperatura.[21] Para la determinación del modelo del sistema TCLAB, se considera el método III correspondiente a la aproximación a sistemas tipo FOPDT, presentado en el capítulo 1.

En donde se obtiene una curva de reacción como resultado a una entrada tipo escalón, como se ve en la siguiente Figura 2.1.



**Figura 2. 1** Curva de reacción para sistema TCLAB

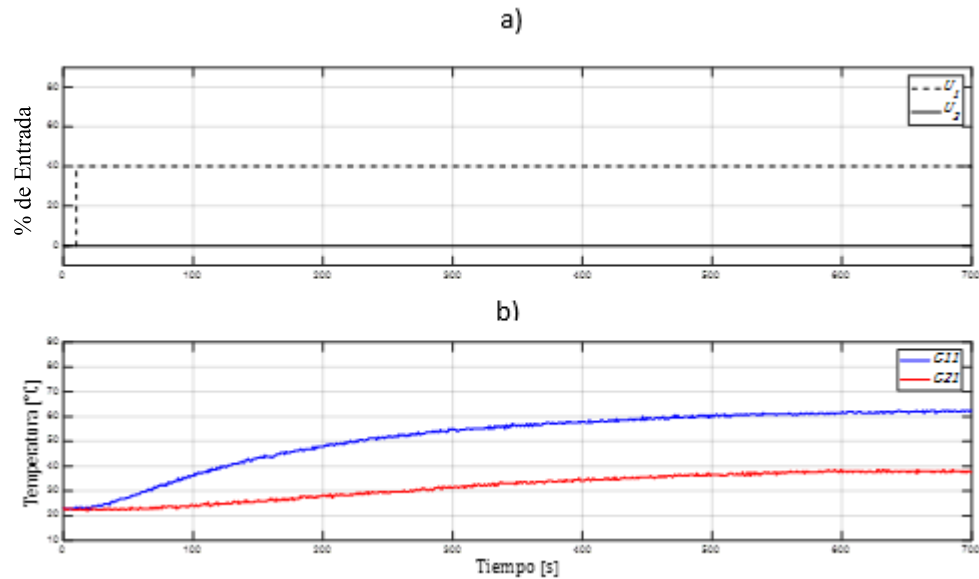
En un sistema TITO es común que ambas salidas se vean afectadas de manera directa o indirecta una sobre otra, debido a la interacción que existe entre las variables del sistema, dando como resultamos un sistema  $2 \times 2$ , representado como:

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

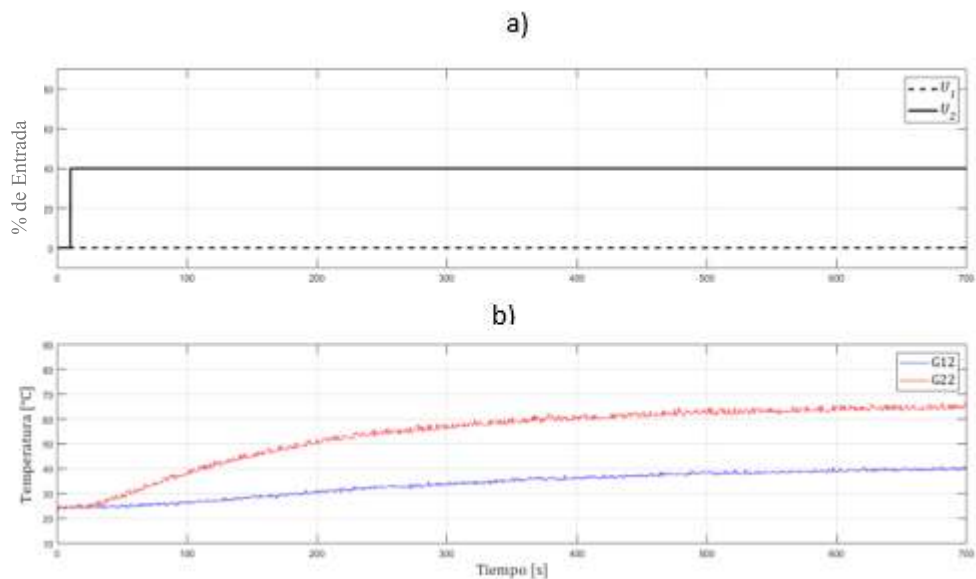
Para determinar el modelo se consideran cuatro porcentajes (20, 40, 60 y 80%), mismo que fueron tomados en cuenta en [16], para la entrada tipo escalón, que serán aplicados a cada entrada de manera independiente, es decir, cuando se aplica una entrada a  $U_1$ ,  $U_2$  permanece en cero.

Al aplicar una entrada tipo escalón a  $U_1$ , ésta afecta directamente a la salida 1 y de manera indirecta a la salida 2, obteniendo las funciones de transferencia  $G_{11}$  y  $G_{21}$ . De igual manera, al aplicar una entrada tipo escalón a  $U_2$ , se afecta de manera directa la salida 2 y

de manera indirecta la salida 1, obteniendo  $G_{22}$  y  $G_{12}$ . A manera de ejemplo, en la Figura 2.2 y 2.3 se presentan las respuestas obtenidas para una entrada escalón del 40%, tanto para  $U_1$ , como para  $U_2$  respectivamente.



**Figura 2. 2** Curva de reacción para  $U_1 = 40\%$ , a) Señal de entrada, b) Señal de salida



**Figura 2. 3** Curva de reacción para  $U_2 = 40\%$ , a) Señal de entrada, b) Señal de salida

Para cada una de las curvas de reacción obtenidas, se determinan los parámetros ( $K, \tau, t_0$ ) del modelo FOPDT en función del 28.3% y 63.2%; y posterior a esto se saca un promedio y se determina el modelo final del sistema.

A continuación, se presentan los parámetros del modelo junto con su función de transferencia FOPDT para  $G_{11}$  y  $G_{21}$ , aplicando una entrada tipo paso a  $U_1$ .

**Tabla 2.1.** Parámetros para  $G_{11}$

U %	K	to	$\tau$
20%	1	25.85	174.51
40%	0.94	24.80	173.61
60%	0.91	29.23	167.91
80%	0.95	31.90	163.11

$$G_{11} = \frac{0.95}{169.76 s + 1} e^{-30.44 s} \quad (2.2)$$

**Tabla 2.2.** Parámetros para  $G_{21}$

U %	K	to	$\tau$
20%	0.43	108.17	240.54
40%	0.38	92.44	253.75
60%	0.37	95.59	248.09
80%	0.41	94.45	240.72

$$G_{21} = \frac{0.405}{245.77 s + 1} e^{-97.66 s} \quad (2.3)$$

De igual manera para  $G_{12}$  y  $G_{22}$ , aplicando una entrada tipo paso a  $U_2$ .

**Tabla 2.3.** Parámetros para  $G_{12}$

U %	K	to	$\tau$
20%	0.48	99.04	233.94
40%	0.37	93.07	234.88
60%	0.42	75.71	252.88
80%	0.48	86.56	226.50

$$G_{12} = \frac{0.43}{237.05 s + 1} e^{-88.59 s} \quad (2.4)$$

**Tabla 2.3.** Parámetros para  $G_{22}$

U %	K	to	$\tau$
20%	1.07	33.64	194.32
40%	0.96	32.70	174.51
60%	0.97	34.27	167.91
80%	1.02	36.33	163.01



$$G_{22} = \frac{1}{174.93 s+1} e^{-34.23 s} \quad (2.5)$$

Finalmente, el sistema TCLAB, es representado por:

$$TCLAB = \begin{bmatrix} \frac{0.95}{169.76 s+1} e^{-30.44 s} & \frac{0.43}{237.05 s+1} e^{-88.59 s} \\ \frac{0.4015}{245.77 s+1} e^{-97.66 s} & \frac{1}{174.93 s+1} e^{-34.23 s} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

## 2.2. Interacción de variables

Una vez obtenido el modelo del sistema TCLAB, es necesario analizar la interacción que existe entre las variables, para determinar la necesidad de implementar un sistema que permita reducir o eliminar dicha interacción.

El análisis se lo realiza por medio de la matriz RGA, determinada por el valor en estado estable del sistema, como se muestra en 2.7.

$$G(0) = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) \quad (2.7)$$

$$G(0) = \begin{bmatrix} 0.95 & 0.43 \\ 0.40 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Siguiendo con la ecuación 2.9, se determina la matriz RGA del sistema TCLAB presentada en 2.10.

$$\Lambda = G(0) \circ (G(0)^{-1})^T \quad (2.9)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1.22 & -0.22 \\ -0.22 & 1.22 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Como se mencionó en el capítulo uno, para medir o cuantificar el grado de interacción entre variables se analiza el valor de los índices obtenidos en la RGA. En donde se estable que: Si el índice es positivo y cercano a la unidad se establecen las variables controladas y su paridad y; si el valor se aleja del valor unitario, indica una mayor interacción entre las variables[10].

Mencionado lo anterior, se determina la paridad de las variables entre  $U_1$  con  $T_1$  y  $U_2$  con  $T_2$ . Además, se observa que existe un grado de interacción considerable en el sistema, por lo que es necesario la implementación de un desacoplador en serie al sistema TCLAB.

## 2.3. Desacoplamiento de variables

Para el desacoplamiento de variables se considera la implementación de un desacoplador dinámico ideal simplificado. Este tipo de desacoplador es generalmente usado en sistemas TITO, en donde se pretende determinar un sistema aparente que no presente interacción entre las variables, como se ve en la ecuación 2.11.

$$Q(s) = G(s)D(s) \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} q_{11} & 0 \\ 0 & q_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Para llegar a un proceso aparente sin interacción es necesario cumplir con las condiciones presentadas en el capítulo uno, se obtienen las siguientes relaciones:

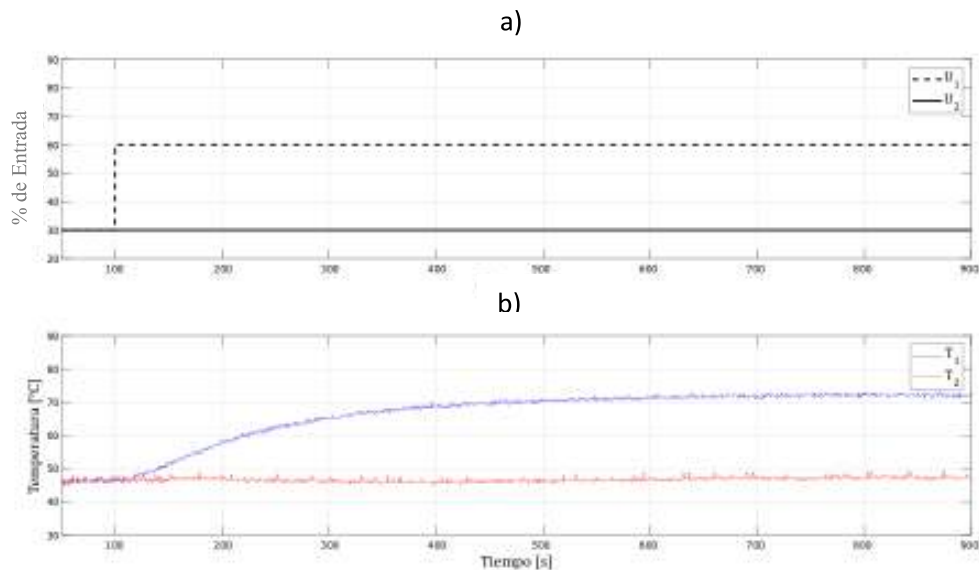
$$\frac{D_{12}}{D_{22}} = -\frac{G_{12}}{G_{11}} \quad (2.13)$$

$$\frac{D_{21}}{D_{11}} = -\frac{G_{21}}{G_{22}} \quad (2.14)$$

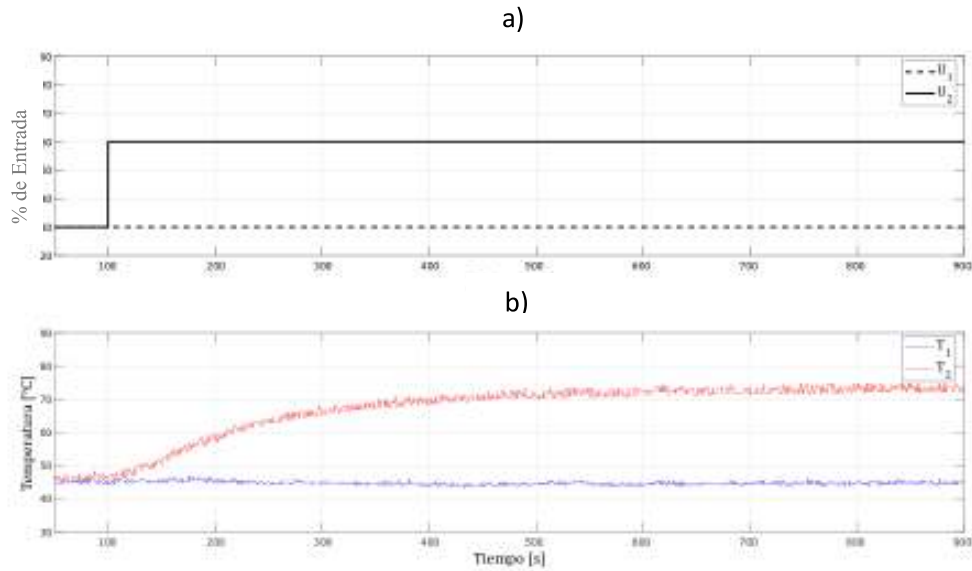
Aplicando al sistema TCLAB, se toman en consideración los grados de libertad del sistema, para fijar el valor de dos de los elementos presentes en el desacoplador. Siendo estos  $D_{11}$  y  $D_{22}$  que tendrán un valor igual a 1, dando como resultado:

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-74.35 s - 0.44}{225.2 s + 0.95} e^{-58.157s} \\ \frac{-70.23 s - 0.40}{247.2 s + 1.00} e^{-63.43s} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Una vez diseñado el desacoplador, es implementado en el sistema TCLAB para verificar su correcto funcionamiento. Las pruebas se realizaron de la siguiente manera: Una vez que el sistema se encuentra estable en una temperatura, a los 100 segundos se procede a realizar un cambio de referencia tanto en  $U_1$  como en  $U_2$ , como se ven las Figuras 2.4 y 2.5 respectivamente, evidenciando el desacoplamiento de las variables en el sistema.

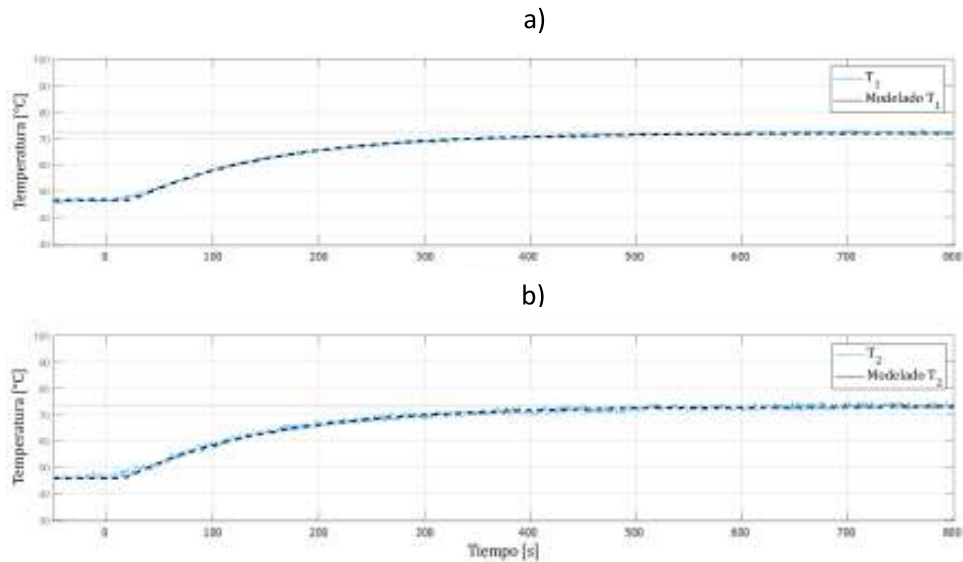


**Figura 2. 4** Sistema desacoplado, a) entrada en  $U_1$ , b) Salida desacoplada.



**Figura 2. 5** Sistema desacoplado, a) entrada en  $U_2$ , b) Salida desacoplada

El desacoplamiento de las variables permite trabajar con las variables del sistema de manera independiente, una vez determinado el modelo FOPDT de cada variable. Para el sistema TCLAB se tienen los modelos correspondientes a las salidas de Temperatura  $T_1$  y  $T_2$ , como se ven en las ecuaciones 2.16 y 2.17 respectivamente. A continuación, se presenta el modelo aproximado para cada variable junto con el modelo real en la Figura 2.6.



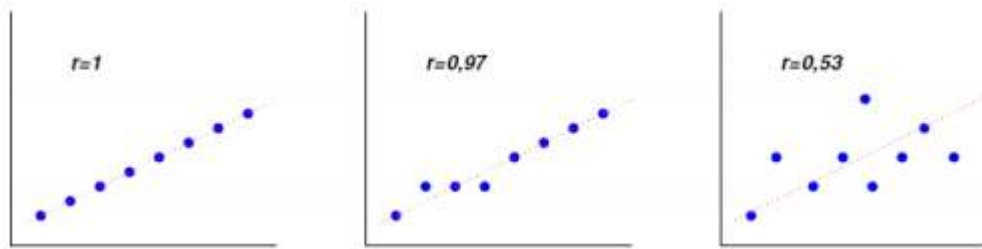
**Figura 2. 6** a) Validación modelo salida  $T_1$  b) Validación modelo salida  $T_2$

$$T_1 = \frac{0.84}{129.6 s + 1} e^{-24.53 s} \quad (2.16)$$

$$T_2 = \frac{0.91}{134.11 s + 1} e^{-17.67 s} \quad (2.17)$$

## Validación del modelo

Para la validación del sistema modelado, se considera el coeficiente de determinación o más conocido como coeficiente  $R^2$ , en donde se refleja la proximidad de un sistema modelado al sistema real, dando valores entre 0 y 1. Si el coeficiente toma valores cercanos a uno, se dice que el sistema es más próximo al sistema real [22], es decir mayor es su ajuste, como se presenta en el diagrama de dispersión en la Figura 2.7.



**Figura 2. 7** Diagrama de dispersión [19]

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad (2.18)$$

En donde:

$\hat{y}$ : Variable estimada.

$\bar{y}$ : Promedio total del número de variables estimadas.

$y$ : variable real

Iniciando con la validación de los sistemas modelados, se consideran los valores tanto del modelo real como del modelo modelado, mismo que serán presentados en el ANEXO A, seguido de esto se determina el promedio total de las variables del sistema modelado como se presenta en la ecuación 2.17 y 2.18 tanto para  $T_1$  como para  $T_2$  respectivamente.

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{l} \sum_1^l y_i = 59.18 \quad (2.19)$$

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{l} \sum_1^l y_i = 59.37 \quad (2.20)$$

Y se continua con el cálculo del numerador como del denominador y se determina el coeficiente  $R^2$ , como se presenta a continuación:

Para  $T_1$  se tiene:

$$\sum(\hat{y} - \bar{y})^2 = 877744.44 \quad (2.21)$$

$$\sum(y - \bar{y})^2 = 880891.16 \quad (2.22)$$

Dando como resultado:

$$R^2 = 0.99 \quad (2.23)$$

Para  $T_2$  se tiene:

$$\sum(\hat{y} - \bar{y})^2 = 998482.74 \quad (2.24)$$

$$\sum(y - \bar{y})^2 = 988955.91 \quad (2.25)$$

Dando como resultado:

$$R^2 = 1.00 \quad (2.26)$$

Como se puede ver en 2.25 y 2.26, los valores obtenidos del coeficiente de determinación reflejan la proximidad del sistema modelado con respecto al sistema real de temperatura, permitiendo realizar un control adecuado sobre el mismo.

## 2.4. Diseño de controladores

Para el diseño de los controladores propuestos en este proyecto, una vez desacoplado el sistema se considera trabajar cada variable de manera independiente, es decir cada una de las variables contará con su propio controlador, como se aprecia en la Figura 2.8. Los controladores considerados son: Tipo PID, SMC y DSMC.

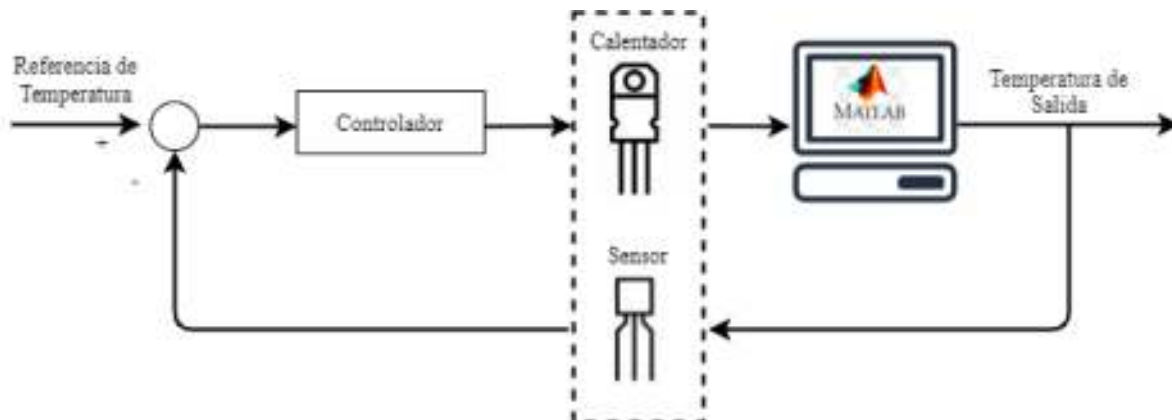


Figura 2. 8 Diagrama general de control

### 2.4.1 Control tipo PID

Considerando que la variable a controlar corresponde a Temperatura, se propone el diseño de control Proporcional Integral (PI). Consiguiendo de esta manera llegar a la referencia establecida en el sistema debido a la parte integral presente en el controlador. Para el diseño del control se considera el diseño de control propuesto por Chen y Seborg en [23], siguiendo los siguientes pasos.

Partiendo del modelo de control PI y del modelo FOPDT, se tiene:

$$G_c = \frac{1}{G} \frac{e^{-tos}}{(\tau_c + to)s} \quad (2.27)$$

$$G = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-tos} \quad (2.28)$$

Reemplazando 2.28 en 2.27 se tiene:

$$G_c = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad (2.29)$$

En donde:

$$\tau_i = \tau \quad (2.30)$$

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{\tau_c + t_o} \quad (2.31)$$

El término  $\tau_c$  permite que el control pueda tener mayor o menor agresividad, y se lo puede determinar en base a tres criterios, que se indican a continuación [23]:

1. Criterio establecido por Rivera en 1986.

$$\frac{\tau_c}{t_o} > 0.8 \text{ y } \tau_c > 0.1\tau \quad (2.32)$$

2. Criterio establecido por Chien y Fruehauf en 1990.

$$\tau > \tau_c > t_o \quad (2.33)$$

3. Criterio establecido por Skogestad en el 2003.

$$\tau_c = t_o \quad (2.34)$$

El criterio que fue considerado corresponde al segundo, tomando un valor de  $\tau_c$  entre  $\tau$  y  $t_o$ , dando como resultado los parámetros para  $T_1$  y para  $T_2$ .

$$K_c = 1.5 \quad (2.35)$$

Y para el  $\tau_i$  se tiene que:

$$\tau_{i1} = 129.6 \quad (2.36)$$

$$\tau_{i2} = 134.11 \quad (2.37)$$

Sin embargo, en base al rendimiento del controlador, establecido por el índice de rendimiento ISE, se obtuvieron mejores resultados con los siguientes valores:

$$\tau_{i1} = 140 \quad (2.36)$$

$$\tau_{i2} = 130 \quad (2.37)$$

#### 2.4.2 Control por Modo Deslizante (SMC)

Para el diseño del controlador SMC, se considera el procedimiento establecido por O. Camacho en [24], mismo que se describe a continuación, considerando su estructura definida por:

$$U_{SMC} = U_c + U_D \quad (2.38)$$

En donde:

La parte discontinua está definida por

$$U_D = K_D \frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)| + \delta} \quad (2.39)$$

Antes de iniciar con el diseño de la parte continua del controlador, es necesario trabajar el retardo del modelo FOPDT, usando la aproximación del retardo por Taylor, dando como resultado un sistema de segundo orden, como se ve en la ecuación 2.40.

$$e^{-tos} = \frac{1}{tos+1} \quad (2.40)$$

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{(\tau s+1)(tos+1)} \quad (2.41)$$

Iniciando con el diseño, se determina la ecuación diferencial del sistema.

$$to\tau \left( \frac{d^2y(t)}{dt^2} \right) + (to + \tau) \left( \frac{dy(t)}{dt} \right) + y(t) = Ku(t) \quad (2.42)$$

se estable el tipo de superficie con la que se va a trabajar, para el caso de estudio se propone una superficie tipo integral, presentada en 2.43.

$$\sigma(t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^n \int e(t) dt \quad (2.43)$$

Desarrollando se tiene:

$$\sigma(t) = \frac{de(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int e(t) dt \quad (2.44)$$

Para mantener la superficie en un valor constante dando como resultado un valor de cero en el error, se debe cumplir la siguiente relación.

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} = 0 \quad (2.45)$$

Sustituyendo la definición del error,  $e(t) = r(t) - y(t)$  en 2.44, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} = \frac{d^2r(t)}{dt^2} - \frac{d^2y(t)}{dt^2} + \lambda_1 \left( \frac{dr(t)}{dt} - \frac{dy(t)}{dt} \right) + \lambda_0 e(t) = 0 \quad (2.46)$$

Considerando:  $\frac{d^2r(t)}{dt^2} = \frac{dr(t)}{dt} = 0$ , se tiene:

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -\lambda_1 \frac{dy(t)}{dt} + \lambda_0 e(t) \quad (2.47)$$

Finalmente, 2.47 reemplazado en la ecuación 2.42, determina la parte continua del controlador.

$$U_C(t) = \left( \frac{to\tau}{K} \right) \left[ \left( \frac{to+\tau}{to\tau} - \lambda_1 \right) \frac{dy(t)}{dt} + \frac{y(t)}{to\tau} + \lambda_0 e(t) \right] \quad (2.48)$$

$$U_{SMC}(t) = \left( \frac{to\tau}{K} \right) \left[ \left( \frac{to+\tau}{to\tau} - \lambda_1 \right) \frac{dy(t)}{dt} + \frac{y(t)}{to\tau} + \lambda_0 e(t) \right] + K_D \frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)|+\delta} \quad (2.49)$$

Los valores de  $K_D$ ,  $\delta$ ,  $\lambda_1$  y  $\lambda_0$  se determinan en base a las siguientes expresiones:

$$K_D = \frac{0.51}{|K|} \left( \frac{\tau}{to} \right)^{0.76} 1.25 \quad (2.50)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12(KK_D\lambda_1) \quad (2.51)$$

$$\lambda_1 = \frac{to+\tau}{to\tau} \quad (2.52)$$

$$\lambda_0 \leq \frac{\lambda_1^2}{4} \quad (2.53)$$

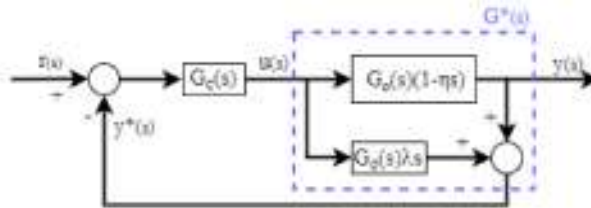
A continuación, en la tabla 2.4 se presentan los valores de los parámetros para los sistemas  $T_1$  y  $T_2$ .

**Tabla 2.4.** Parámetros para controlador SMC

Sistema	$K_D$	$\delta$	$\lambda_1$	$\lambda_0 (* 10^{-4})$
$T_1$	3.81	0.69	0.03	4.25
$T_2$	3.66	0.69	0.03	4.40

### 2.4.3 Control Dinámico por Modo Deslizante (DSMC)

Para el diseño del controlador DSMC, se considera el desarrollo propuesto en [16], mismo que está basado en el controlador de linoya & Alpeter, el cual se indica en la Figura 2.9.



**Figura 2. 9** Diagrama control de linoya & Alpeter

Considerando el retardo presente en el modelo de la planta (FOPDT), es necesario trabajar con la aproximación de Padé, representada en la ecuación 2.54.

$$e^{-tos} = \frac{1 - \frac{to}{2}s}{1 + \frac{to}{2}s} \quad (2.54)$$

Reemplazando la aproximación del retardo en el modelo FOPDT y considerando la estructura del controlador de linoya y Alpeter, se tiene:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \frac{1 - \frac{to}{2}s}{1 + \frac{to}{2}s} = G_o(s)(1 - \eta s) \quad (2.55)$$

En donde:

$G(s)$ : Representa la aproximación total del modelo.

$G_o(s)$ : Representa la aproximación del modelo sin el cero en el plano derecho.

El sistema se lo trabaja de la siguiente manera:

$$G_o(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)(1 + \frac{to}{2}s)}; (1 - \eta s) = 1 - \frac{to}{2}s \quad (2.56)$$

Desarrollando  $G^*(s)$ , del diagrama de control de la Figura 2.9 y considerando el parámetro de ajuste  $\lambda > \eta$ , se tiene:

$$G^*(s) = \frac{y^*(s)}{u(s)} = \frac{K[(\lambda - \eta)s + 1]}{(\tau s + 1)(1 + \frac{to}{2}s)} \quad (2.57)$$

Y representado en ecuación diferencial se tiene:



$$\frac{t\tau}{2} \frac{d^2 y^*(t)}{dt} + \left( \tau + \frac{t\tau}{2} \right) \frac{dy^*(t)}{dt} + y^*(t) = K(\lambda - \eta) \frac{du(t)}{dt} + Ku(t) \quad (2.58)$$

Una vez establecido el sistema, se inicia con el diseño del controlador, partiendo de su estructura general.

$$\frac{dU_{DSMC}(t)}{dt} = \frac{dU_C(t)}{dt} + \frac{dU_D(t)}{dt} \quad (2.59)$$

En donde:

La parte discontinua está definida por:

$$\frac{dU_d(t)}{dt} = K_D \text{sgn}(\sigma(t)) \quad (2.60)$$

$\sigma$ : representa la superficie con la que se va a trabajar.

Para iniciar con el diseño de la parte continua del controlador  $U_C$ , se determina la superficie con la que trabajará el sistema, la misma que fue tomada de [16]:

$$\sigma(t) = \frac{de^*(t)}{dt} + \lambda_1 e^*(t) + \lambda_0 \int e^*(t) dt \quad (2.61)$$

Cumpliendo con  $\frac{d\sigma(t)}{dt} = 0$ , y reemplazando  $e^*(t) = r(t) - y^*(t)$ , se tiene:

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} = \left( \frac{d^2 r(t)}{dt} - \frac{d^2 y^*(t)}{dt} \right) + \lambda_1 \left( \frac{dr(t)}{dt} - \frac{dy^*(t)}{dt} \right) + \lambda_0 e^*(t) = 0 \quad (2.62)$$

Considerando:  $\frac{d^2 r(t)}{dt} = \frac{dr(t)}{dt} = 0$ , se tiene:

$$\frac{d^2 y^*(t)}{dt} = -\lambda_1 \frac{dy^*(t)}{dt} + \lambda_0 e^*(t) \quad (2.63)$$

Finalmente, la ecuación 2.63 es reemplazada en 2.58, dando como resultado la parte continua del controlador en 2.64 y el diseño del controlador final en 2.65

$$\frac{dU_C(t)}{dt} = \frac{1}{2K(\lambda - \eta)} [(-\lambda_1 t\tau + 2\tau + t\tau) \frac{dy^*}{dt} + \lambda_0 t\tau e^*(t) + 2y^*(t) - 2Ku(t)] \quad (2.64)$$

$$\frac{dU_{DSMC}(t)}{dt} = \frac{1}{2K(\lambda - \eta)} [(-\lambda_1 t\tau + 2\tau + t\tau) \frac{dy^*}{dt} + \lambda_0 t\tau e^*(t) + 2y^*(t) - 2Ku(t)] + K_D \text{sgn}(\sigma(t)) \quad (2.65)$$

Los valores de  $\lambda_1$  y  $\lambda_0$  se los determina en base a las siguientes expresiones:

$$\lambda_1 = \frac{t\tau + 2\tau}{t\tau} \quad (2.65)$$

$$\lambda_0 \leq \frac{\lambda_1^2}{4} \quad (2.67)$$

Sin embargo, los parámetros  $\lambda$  y  $K_D$ , son sintonizados por el método de sintonización MVMO. Para la sintonización es necesario considerar los siguientes parámetros:

- *N.variables* = 2
- *N.particulas* = 1
- *N.de valores a guardar* = 4
- *N.máximo de iteraciones* = 200
- *N.variables a mutar* = 2
- *Factor de escalamiento de forma inicial* = 0.9

- Factor de escalamiento de forma final = 1.3
- Factor de forma = 1
- Incremento del factor de forma Inicial = 0.1
- Incremento del factor de forma Final = 0.4

Una vez definidas las variables, se inicia con la evaluación de una partícula por medio de la cual se obtiene el mejor valor de la función objetivo, la cual corresponde al índice de rendimiento ISE.

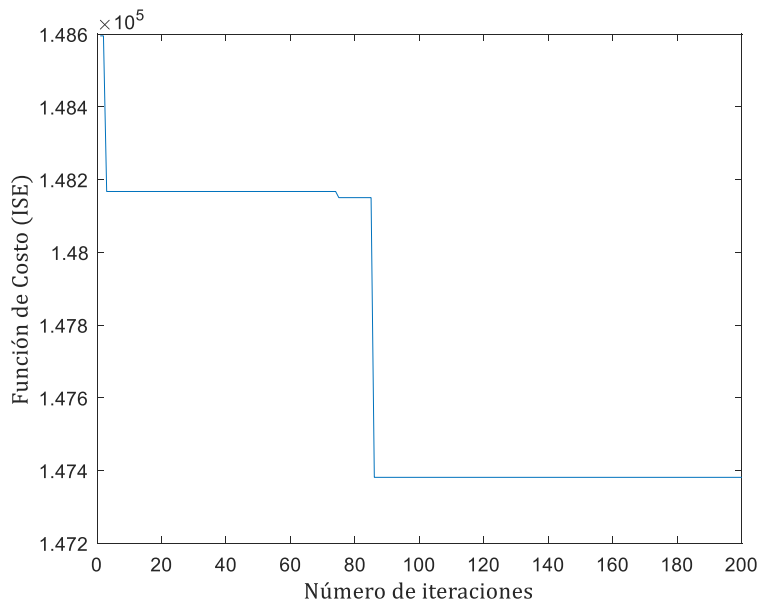
Las partículas que presenten un mejor valor de ISE se van almacenando, para obtener las mejores soluciones, como se indica en los parámetros, el número de valor a almacenar es de 4. Para cada iteración se realiza la asignación de padres, obtenido por la mejor solución como  $X_{best}$ . Para cada padre se determina una descendencia por medio de la selección, cruce y mutación[25].

Ejecutando la sintonización por MVMO en el controlador DSMC, se obtuvieron los siguientes valores junto con la función objetivo.

Para  $T_1$  se tiene:

$$K_D = 0.0002 \quad (2.68)$$

$$\lambda = 118.10 \quad (2.69)$$

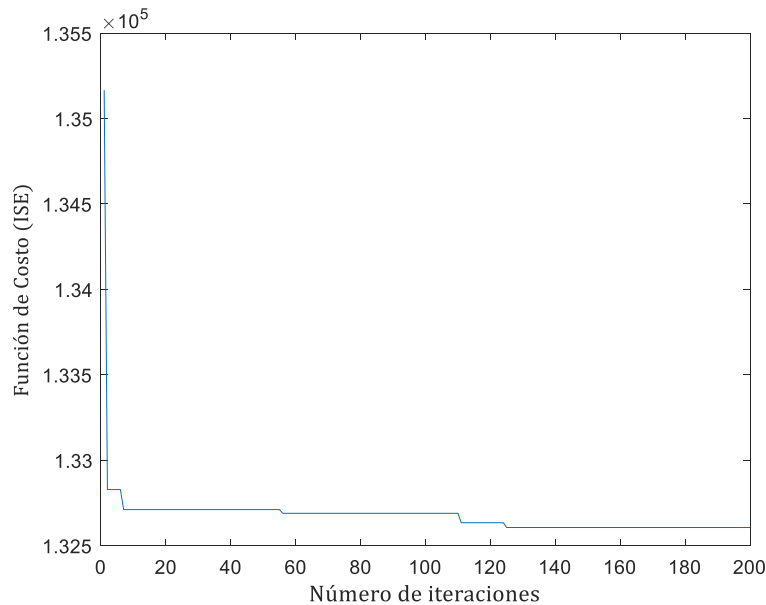


**Figura 2. 10** Función de Costo ISE para  $T_1$

Para  $T_2$  se tiene:

$$K_D = 0.0002 \quad (2.70)$$

$$\lambda = 94.39 \quad (2.71)$$



**Figura 2. 11** Función de Costo ISE para  $T_2$

#### 2.4.4 Desarrollo de Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica está orientada a la visualización de resultados previamente obtenidos para pruebas de: cambio de referencia, incertidumbre en el retardo de tiempo y de perturbación externa, al aplicar las tres estrategias de control mencionadas. Además de permitir al usuario realizar pruebas en línea, implementando el control que seleccione para cada una de las pruebas.

El desarrollo de esta considera las características que debe tener una interfaz gráfica, mencionadas a continuación basadas en las normas ISO 9241 y EN 29241[26].

- Contar con actividades y habilidades variadas.
- Brindar al usuario autonomía para monitorear la interfaz.
- Tener una interfaz autodescriptiva, es decir que cada una de sus ventanas sea comprensible.
- Cumplir con las expectativas del usuario considerando la información que tenga acerca del proyecto.
- Transmitir la información al usuario de manera precisa, evitando errores de interacción.
- Asegurar que la interfaz sea intuitiva y fácil de entender para el usuario.
- Permitir que el usuario realice o deshaga diferentes acciones sobre la interfaz de usuario.
- Es importante que la interfaz sea de agrado visual y de esta manera asegurar una mejor experiencia para el usuario.
- Una interfaz de usuario debe contener un botón de ayuda que permita al usuario el manejo de esta.

Para el desarrollo de la Interfaz Gráfica se considera el software MATLAB – Simulink junto con su extensión en App Designer.

App Designer permite crear aplicaciones profesionales, colocando componentes visuales para estructurar y crear el diseño de una interfaz gráfica de usuario (GUI), adicionalmente el editor integrado permite programar rápidamente su comportamiento [27]. La Interfaz Gráfica correspondiente al presente proyecto, cumple con el objetivo de visualizar en línea el comportamiento del sistema con diferentes esquemas de control, además de presentar resultados previamente obtenidos.

La Interfaz Gráfica cuenta con 11 ventanas, mismas que se enlistan a continuación:

1. Inicio
2. Menú
3. Prueba Cambio de Referencia
  - 3.1. Índices de Rendimiento
  - 3.2. Prueba en línea
4. Prueba de Incertidumbre en el modelado
  - 4.1. Índices de Rendimiento
  - 4.2. Prueba en línea
5. Prueba de Perturbación Externa
  - 5.1. Índices de Rendimiento
  - 5.2. Prueba en línea

En las siguientes figuras se presentan 5 de las ventanas indicadas, mismas que permitirán dar una idea de la Interfaz total. Para cada pestaña se tiene un botón de Salir, mismo que permite salir y cerrar la interfaz.

En la ventana de Inicio (Figura 2.12), contempla el título correspondiente al Proyecto, la Universidad, Ingeniería y nombre del estudiante. Además de un botón de ayuda en donde se brinda información correspondiente a la interfaz y al proyecto de titulación.

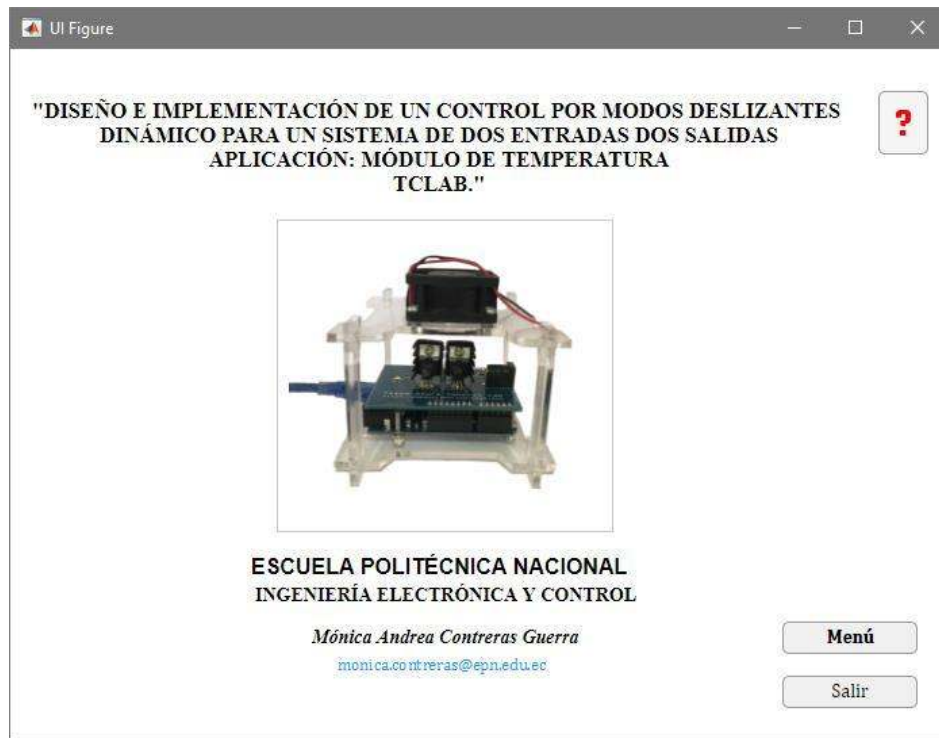


Figura 2. 12 Pestaña de Inicio

Para la ventana de Menú (Figura 2.13), se presenta una breve descripción del módulo de Temperatura con el que se trabajó, el modelo del sistema desacoplado y los controladores que fueron implementados sobre el mismo. Adicionalmente, se presentan tres botones que permiten ingresar a las ventanas de cada una de las pruebas realizadas.

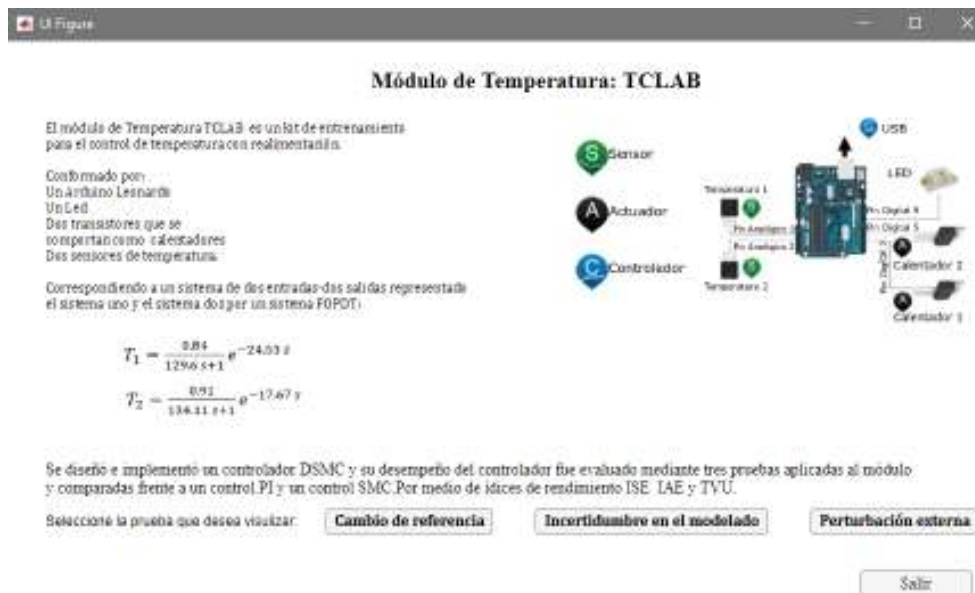
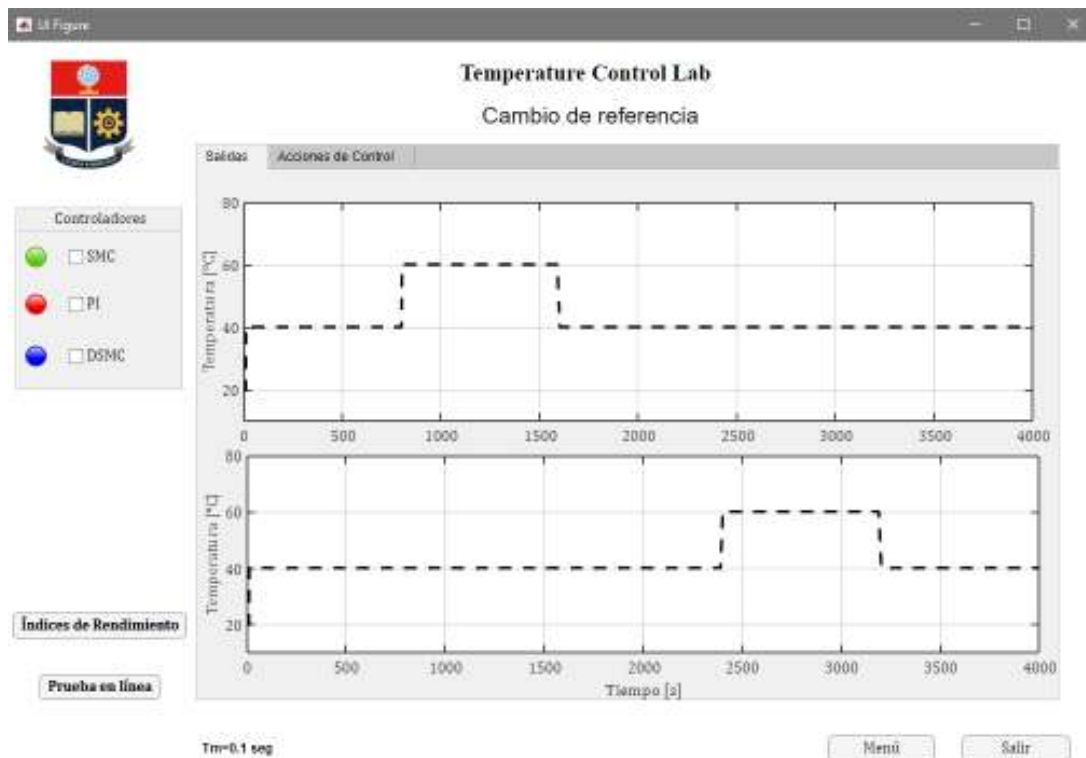


Figura 2. 13 Pestaña de Menú

En la Figura 2.14, se presenta un ejemplo de cómo son cada una de las ventanas previstas para las pruebas de Cambio de referencia, Incertidumbre en el modelado y de Perturbación Externa.

En esta ventana se podrá visualizar las salidas de temperatura junto con la señal de referencia vista en línea negra punteada, y las acciones de control para cada uno de los controladores desarrollados. Además, se tiene dos botones que permiten ingresar a las ventanas de Índices de Rendimiento y de Simulación que serán presentados en las siguientes Figuras.

En la esquina inferior izquierda se tienen dos botones que permite regresar a la ventana de Menú y también poder salir y cerrar la Interfaz Gráfica.



**Figura 2. 14** Pestaña correspondiente a prueba Cambio de Referencia

En la Figura 2.15, se contempla un ejemplo de la ventana correspondiente a los Índices de Rendimiento de la prueba de Cambio de Referencia en donde se podrá analizar el desempeño de cada uno de los controladores.

En la Figura 2.16. se tiene la ventana que permitirá realizar cada una de las pruebas en línea, con la opción de seleccionar el controlador que se desea aplicar al Módulo de Temperatura, una vez verificada la conexión del módulo de temperatura con la interfaz.

Para estas dos últimas ventanas se tiene el botón de Retornar, mismo que permitirá regresar a la ventana principal de cada una de las pruebas consideradas.

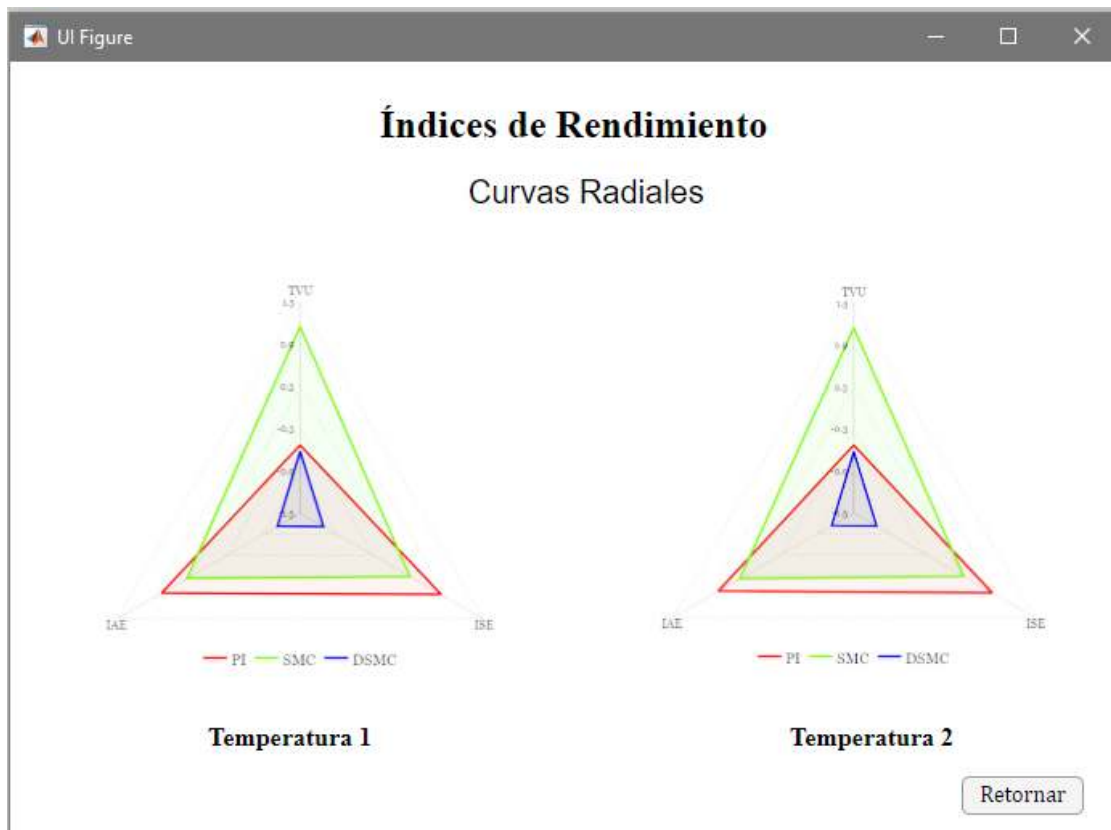


Figura 2. 15 Pestaña de Índices de Rendimiento



Figura 2. 16 Pestaña que permite realizar prueba de Cambio de Referencia en línea

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la presente sección se dan a conocer los resultados obtenidos al aplicar diferentes estrategias de control en el módulo de temperatura TCLAB, para tres tipos de pruebas. Las pruebas fueron realizadas en el software Matlab 2016b, con un hardware Intel (R), Core (TM) i7-7500U @ 2.70 GHz PC, con un tiempo de muestreo de 0.1 [seg] y con el solver auto(Automatic solver selection).

Las pruebas realizadas se detallan a continuación:

- Prueba de cambio de referencia, en donde se lleva a una temperatura de 40[°C] a ambas salidas del sistema  $T_1$  y  $T_2$ , hasta que se estabilice el sistema. Seguido de esto se realizan cambios de referencia a cada salida.
- Prueba de incertidumbre en el modelo, se altera el tiempo de retardo en ambos sistemas, añadiendo un 75% de la constante de tiempo de  $T_1$  y  $T_2$  al tiempo de retardo.
- Prueba de perturbación externa, una vez que el sistema se encuentra a una temperatura seteada, se aplica una perturbación externa por medio de un ventilador ubicada a 5cm sobre el módulo de temperatura TCLAB, por un tiempo de 15 [seg].

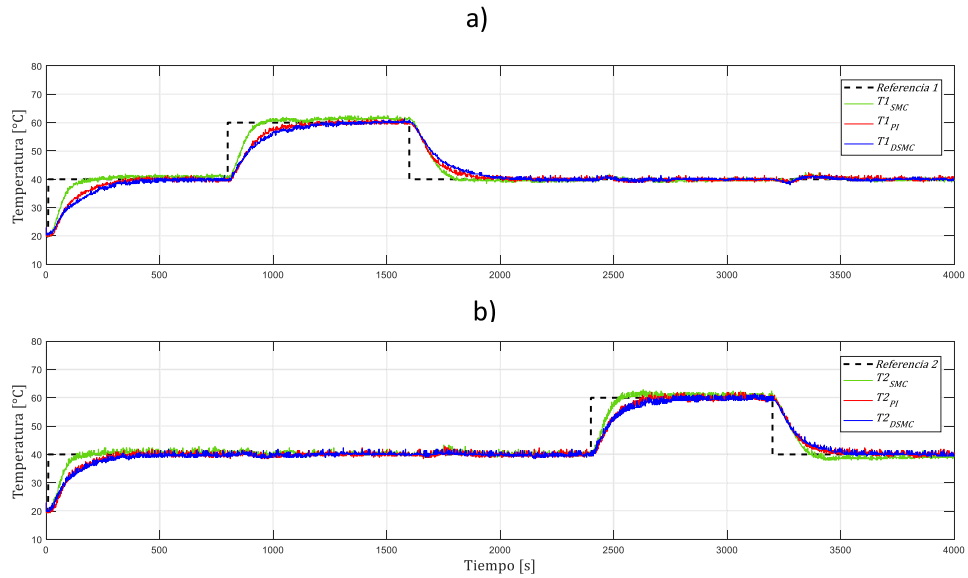
Para cada una de las pruebas realizadas se presenta una comparación del rendimiento de cada controlador por medio de los siguientes índices de rendimiento: ISE, IAE, TVU. Para la comparación se considera el uso de curvas radiales, normalizando los valores de cada índice a una normalización Z-SCORE.

#### 3.1. Cambio de referencia

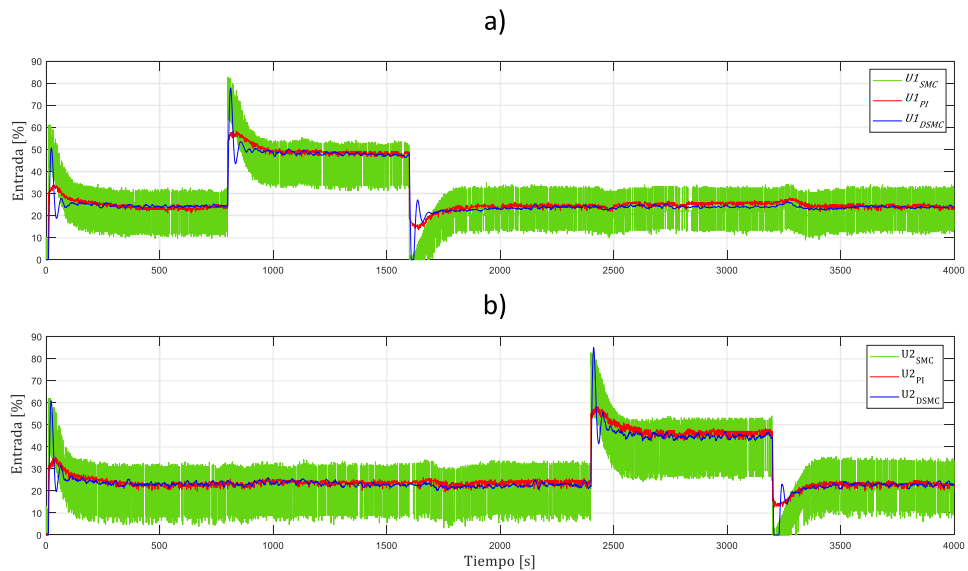
En esta prueba se aplica un cambio de referencia inicial para ambos sistemas, en donde se los lleva a una temperatura de 40 [°C], a partir de los 10 [seg] hasta que el sistema se mantenga estable. Seguido de esto a un tiempo de 800 [seg] se aplica un cambio de referencia de 20 [°C] a  $T_1$ , mientras que  $T_2$  se mantiene en 40 [°C]. Una vez que  $T_1$  llega a su nueva referencia, se mantiene en 60 [°C] hasta un tiempo de 1600 [seg], en donde se aplica nuevamente un cambio de referencia de -20 [°C], manteniendo  $T_1$  y  $T_2$  en 40 [°C]. Para  $T_2$  a un tiempo de 2400 [seg] se aplica un cambio de referencia de 20 [°C], mientras  $T_1$  se mantiene estable en 40 [°C]. Siguiendo la misma lógica aplicada en  $T_1$ , a un tiempo de 3200 [seg] se aplica un nuevo cambio de referencia y se llega a los 40 [°C] nuevamente.

En la Figura 3.1 se presentan las respuestas de ambas salidas del sistema junto con la señal de referencia.





**Figura 3. 1** Respuesta del Sistema ante cambios de referencia, a) Salida  $T_1$  b) Salida  $T_2$   
 Como se puede ver, para los tres controladores propuestos, el desacoplamiento de las variables es evidente. En donde al realizar un cambio de referencia a  $T_1$ , esta no afecta sobre el comportamiento de  $T_2$ . Además, se puede ver que para el control SMC la respuesta es más rápida en comparación a las salidas con control PI y DSMC.



**Figura 3. 2** Acciones de control

En la Figura 3.2, se presentan las acciones de control obtenidas para cada tipo de controlador, en donde la señal de control correspondiente al SMC presenta altas frecuencias de switcheo, conocidas como “chattering”, que no favorece al sistema. En la acción de control del DSMC se reduce notablemente el chattering y la respuesta más suave en comparación a la acción de control para el PI, que presenta una pequeña cantidad de

ruido. En las tablas 3.1 y 3.2, se dan a conocer los valores de los índices de rendimiento de cada controlador.

**Tabla 3.1** Índices de Rendimiento para cambio de referencia,  $T_1$

<b>Control</b>	<b>TVU</b>	<b>ISE</b>	<b>IAE</b>
PI	236.8	80510	7798
SMC	2839	61670	6515
DSMC	98.13	9139	1940

**Tabla 3.2** Índices de Rendimiento para cambio de referencia,  $T_2$

<b>Control</b>	<b>TVU</b>	<b>ISE</b>	<b>IAE</b>
PI	348.4	73090	7329
SMC	3856	57390	6422
DSMC	153.5	9565	2524

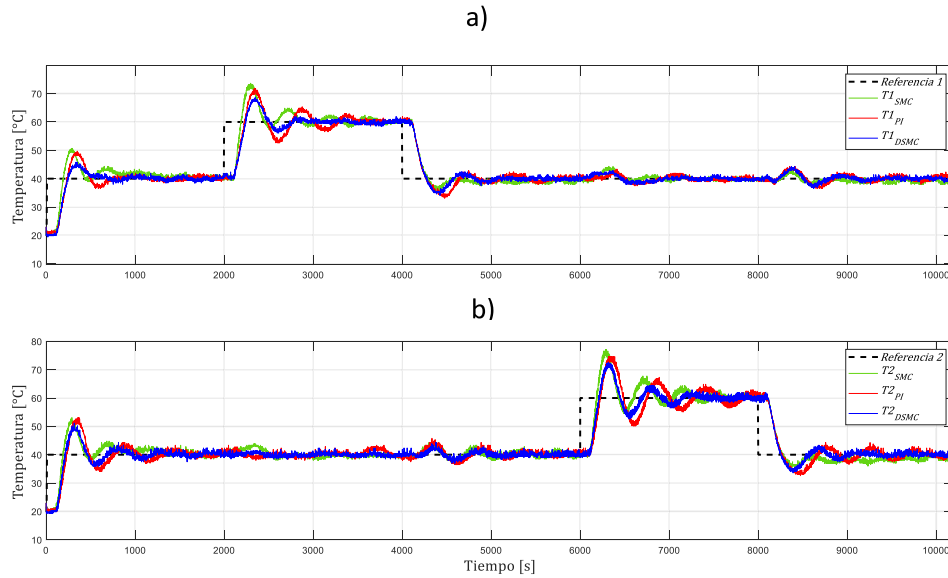
Como se puede ver en las tablas, para cada uno de los índices de rendimiento considerados, el control DSMC presenta un mejor desempeño, además al analizar los valores de TVU, es mucho menor obteniendo una reducción notable del chattering presente en el control SMC.

### 3.2. Incertidumbre en el modelado

Para este tipo de prueba, se añade al tiempo de retardo el 75% del valor de la constante de tiempo ( $\tau$ ) de ambos sistemas, alterando el modelo total del módulo de temperatura TCLab, generando incertidumbre en el modelado. El objetivo de esta prueba es ver cómo se comporta cada controlador y analizar el control que realiza frente al modelo modificado.

La prueba se la realizó con la misma metodología usada en la prueba anterior, estableciendo cambios de referencia para cada salida, considerando un mayor tiempo entre cada cambio, hasta que el sistema llegue a estabilizarse.

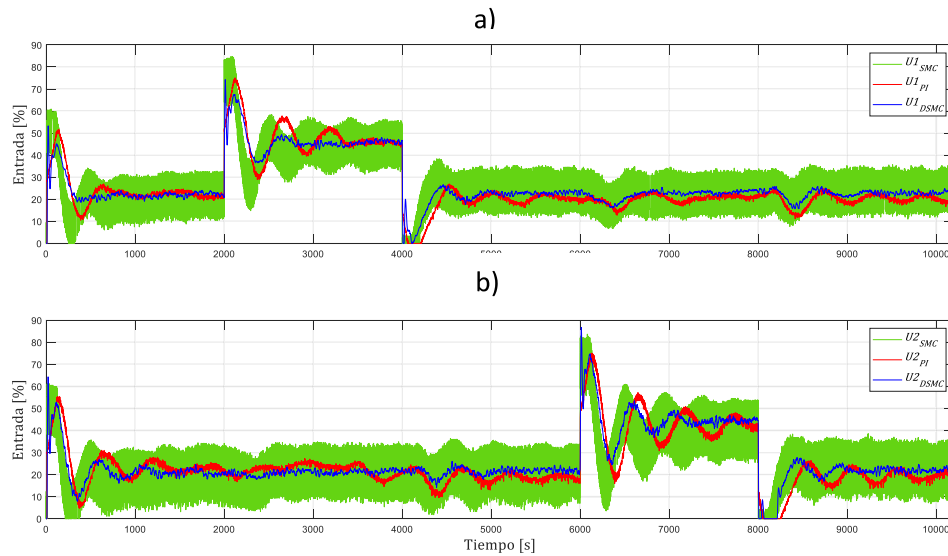
Para  $T_1$  el 75% de  $\tau$  es 97.21 [seg] y para  $T_2$  es 100.58 [seg] en el retardo de tiempo. En la Figura 3.3 se presentan las respuestas de ambas salidas junto con su señal de referencia. Es importante mencionar que, a pesar de alterar el modelo del sistema total, el desacoplador continúa cumpliendo su función, en donde el cambio de referencia de una salida no afecta a la otra.



**Figura 3. 3** Respuesta del Sistema ante incertidumbre en el modelado, a) Salida  $T_1$  b) Salida  $T_2$

Como se puede ver, al alterar el modelo del sistema, las salidas del sistema presentan un comportamiento oscilatorio, sin embargo, el control DSMC oscila menos con respecto al control PI y al SMC, presentando un mejor desempeño.

En la Figura 3.4, se presentan las acciones de control obtenidas para cada salida aplicando los tres tipos de control propuestos.



**Figura 3. 4** Acciones de control

En las acciones de control, como se mencionó anteriormente, el control DSMC presenta menos oscilación, además de no presentar mayor ruido como en el caso del control PI y no existe chattering en comparación al SMC.

En las tablas 3.3 y 3.4 se dan a conocer los índices de rendimiento obtenidos para cada controlador en ambas salidas del sistema.

**Tabla 3.3** Índices de Rendimiento para Incertidumbre en el retardo de tiempo,  $T_1$

<b>Control</b>	<b>TVU</b>	<b>ISE</b>	<b>IAE</b>
PI	614.2	229500	23950
SMC	7531	214100	24240
DSMC	236.3	11090	4665

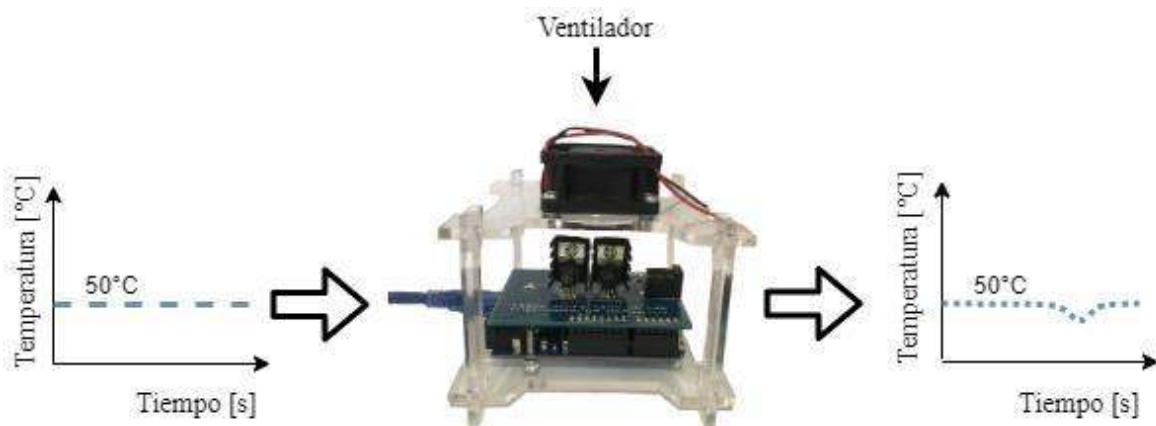
**Tabla 3.4** Índices de Rendimiento para Incertidumbre en el retardo de tiempo,  $T_2$

<b>Control</b>	<b>TVU</b>	<b>ISE</b>	<b>IAE</b>
PI	865.1	268300	29010
SMC	9913	236200	25500
DSMC	367.2	13910	6279

De igual manera que en la prueba anterior, el DSMC presenta un mejor desempeño, reflejado en los valores bajos de sus índices de rendimiento, en comparación al control PI y SMC.

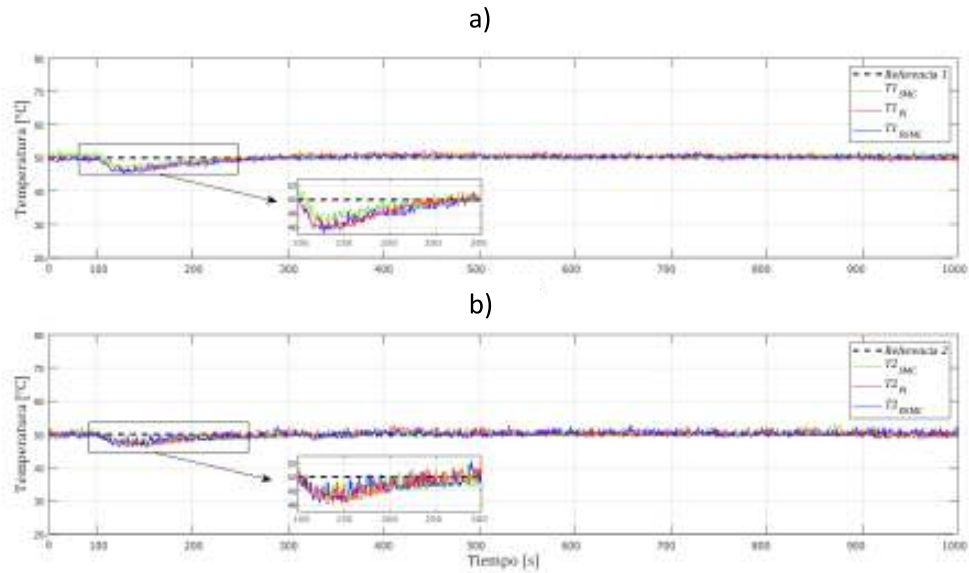
### 3.3. Perturbación externa

En esta prueba se inicia con el sistema a una temperatura de 50 [°C], y a los 100 [seg] se aplica una perturbación externa por medio de un ventilador, ubicado a 5 [cm] sobre el módulo de temperatura, como se muestra en el esquema de la Figura 3.5. El ventilador es conectado a una fuente de 5 [V], por un tiempo de 15 [seg].



**Figura 3. 5** Esquema de Prueba Perturbación externa

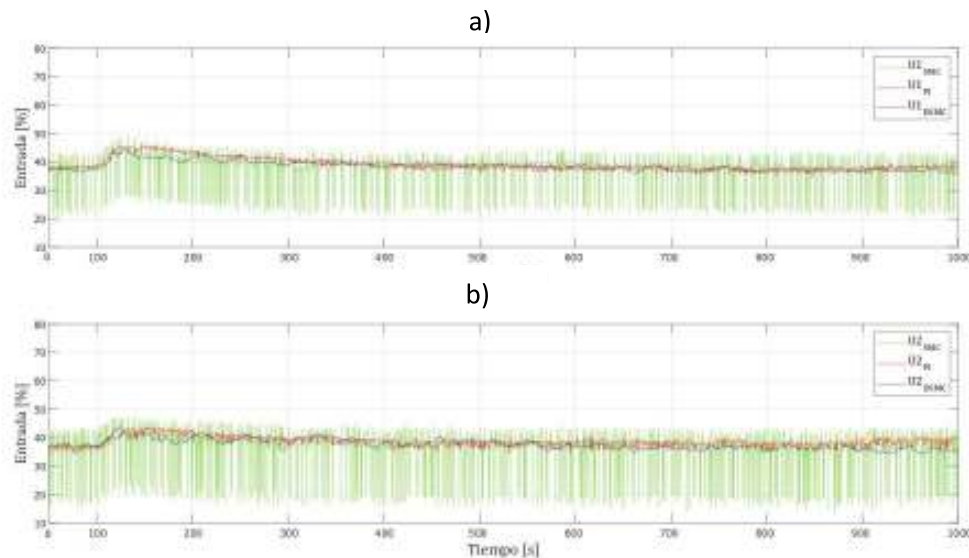
En la Figura 3.6 se presentan las respuestas para ambas salidas al aplicar una perturbación externa al sistema.



**Figura 3. 6** Respuesta del Sistema ante perturbación externa, a) Salida  $T_1$  b) Salida  $T_2$

Analizando las respuestas del sistema, el control SMC responde más rápido a la perturbación, mientras que la respuesta del control PI y DSMC toma un poco más de tiempo.

En la Figura 3.7, se presentan las acciones de control obtenidas para cada salida. En donde se puede observar que, a pesar de tener una respuesta rápida ante perturbaciones, en el control SMC se mantiene presente el chattering. Analizando la acción de control presente en el control DSMC, se tiene una señal suave, sin mayor cantidad de ruido como se ve en el control PI y reduciendo en su totalidad el chattering.



**Figura 3. 7** Acciones de control

En las tablas 3.5 y 3.6 se dan a conocer los índices de rendimiento obtenidos para cada controlador en ambas salidas del sistema.

**Tabla 3.5** Índices de Rendimiento para Perturbación externa,  $T_1$

<b>Control</b>	<b>TVU</b>	<b>ISE</b>	<b>IAE</b>
PI	26.0	1070.8	477.3
SMC	144.6	411.5	215
DSMC	8.7	82.0	97.4

**Tabla 3.6** Índices de Rendimiento para Perturbación externa,  $T_2$

<b>Control</b>	<b>TVU</b>	<b>ISE</b>	<b>IAE</b>
PI	38.4	805.2	418.5
SMC	202.7	485.8	247.1
DSMC	11.6	136.2	134.0

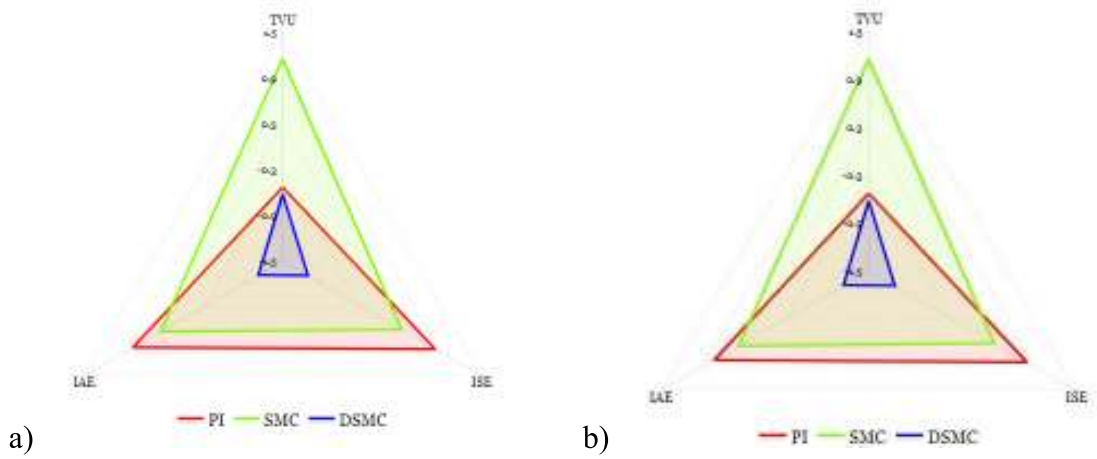
Al igual que el resto de las pruebas realizadas, los valores de los índices de rendimiento en el control DSMC, continúan evidenciando un mejor desempeño con respecto al control PI y SMC.

### 3.4. Curvas Radiales

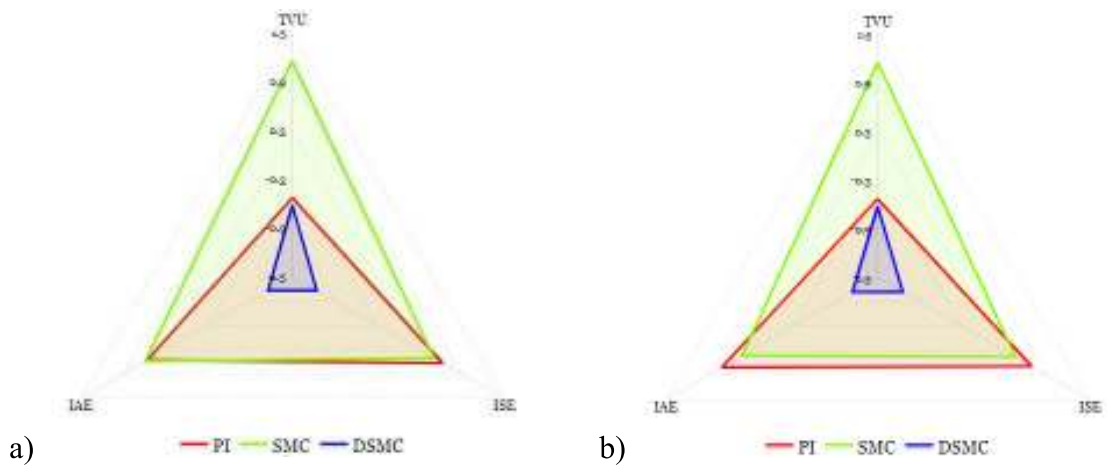
Para realizar un análisis más detallado de los resultados obtenidos por medio de los índices de rendimiento IAE, ISE y TVU, se considera el uso de curvas radiales. En donde la curva con menor área va a indicar un mejor desempeño entre los controladores a comparar. Previo al análisis se considera una normalización de los valores presentados en las tablas 3.1 a la 3.6, ya que para cada uno de los índices se tienen valores distantes unos de otros. La normalización de los valores se la presentará en el Anexo B.

La normalización que se considera es la normalización Z-SCORE, en donde se estandarizan los valores de un grupo de medidas, y se da a conocer que tan lejos se encuentra un dato específico con respecto a la media del grupo de valores[28], dentro de un rango establecido de [-1.5 a 1.5]. En las siguientes figuras se presentan las curvas radiales para cada una de las pruebas realizadas.

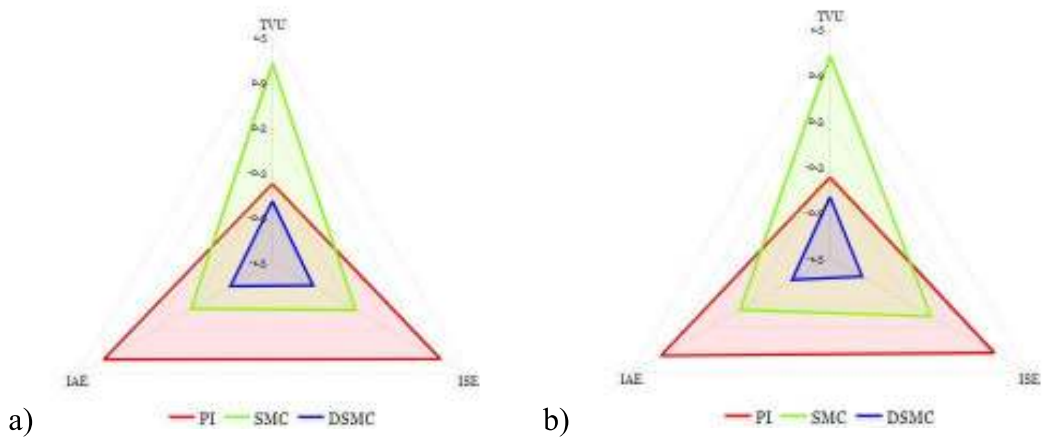
En la Figura 3.8, se presentan las curvas radiales de ambas salidas para la prueba de cambio de referencia, en la Figura 3.9 se presentan las curvas radiales correspondientes a la prueba de incertidumbre en el modelado y finalmente en la curva Figura 3.10 se presentan las curvas correspondientes a la prueba de perturbación externa. En los tres casos se puede ver que el control DSMC presenta una menor área, reflejando un mejor desempeño con respecto al control PI y SMC. También debido al chattering presente en el control SMC, se tienen valores muy altos en el índice de rendimiento TVU.



**Figura 3. 8** Curvas Radiales. Cambio de referencia a) Salida  $T_1$  b) Salida  $T_2$



**Figura 3. 9** Curvas Radiales. Incertidumbre en el modelado a) Salida  $T_1$  b) Salida  $T_2$



**Figura 3. 10** Curvas Radiales. Perturbación externa a) Salida  $T_1$  b) Salida  $T_2$

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. CONCLUSIONES

- Se determinó el modelo del sistema TCLAB utilizando la aproximación a un sistema de primer orden más retardo basado en el método de curva de reacción, dando como resultado un sistema TITO. Usando el criterio establecido por Bristol, se determinó que dicho sistema posee un alto grado de interacción entre sus variables, misma que afectaría el desempeño de los controladores aplicados al sistema indicando la necesidad de desacoplar las variables previo a la aplicación de los controladores.
- Para la interacción presente en el sistema, se diseñó e implementó un desacoplador dinámico simplificado en serie al sistema TCLAB, consiguiendo el desacoplamiento de las variables y posterior a esto, se determinó el modelo del sistema desacoplado, utilizando la aproximación a un sistema de primer orden más retardo basado en el método de curva de reacción, además de validar el modelo por medio del coeficiente  $R^2$ , obteniendo un modelo muy semejante al real.
- Se diseñó e implementó un esquema de control DSMC utilizando el sistema desacoplado aplicado al sistema TCLAB, la sintonización de los parámetros del controlador se la realizó por medio de MVMO, en función del índice de rendimiento ISE, en donde mientras más bajo es su valor, mejores son los parámetros del controlador.
- Se realizó pruebas experimentales de: cambio de referencia paso, incertidumbre en el modelado y la perturbación externa. Comparando el rendimiento del controlador DSMC diseñado contra un esquema de controlador tipo PID y un SMC mediante índices de rendimiento ISE, IAE, TVU por medio de curvas radiales. En cada prueba realizada el mejor desempeño se vio reflejado por el control DSMC, mismo que obtuvo valores menores con respecto a los otros dos controladores, favoreciendo al sistema TCLAB.
- Se diseñó e implementó una interfaz gráfica en MATLAB por medio del entorno App Designer, para la visualización del comportamiento del sistema con diferentes esquemas de control, aplicando pruebas de cambio de referencia, incertidumbre en el modelado y perturbación externa.



## 4.2. RECOMENDACIONES

- Es importante analizar diferentes métodos de sintonización además del aplicado en el presente proyecto, para poder estimar los parámetros de los controladores de manera eficaz, sin recurrir a métodos heurísticos de prueba y error.
- Para determinar el modelo del módulo de temperatura y realizar diferentes pruebas, se recomienda hacerlo en un ambiente cerrado sin corrientes de aire, ya que éstas pueden alterar en el primer caso el modelo del sistema y para el segundo caso los resultados obtenidos no corresponden al sistema modelado.
- Para la comparación de controladores aplicados en el módulo de temperatura es importante que la configuración dentro del Simulink, estén con el Solver en “*Fixed-Step*”, para cada una de las pruebas. Además de mantener un tiempo de muestreo constante.
- Para el tiempo de muestro es recomendable un valor de 0.1[s], y en caso de su configuración del tiempo de muestreo en el Simulink, debido a las características técnicas del módulo, ya que éste no debe ser mayor a 0.5 [s] y debe ser múltiple del mismo valor.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Garrido Jurado, “Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID”, Universidad de Córdoba, Madrid, 2012.
- [2] F. Morilla, J. Garrido, y F. Vázquez, “Control Multivariable por Desacoplo”, *Rev. Iberoam. Automática E Informática Ind.*, vol. 10, n° 1, Art. n° 1, 2013, doi: 10.1016/j.riai.2012.11.001.
- [3] J. Park, R. A. Martin, J. D. Kelly, y J. D. Hedengren, “Benchmark temperature microcontroller for process dynamics and control”, *Comput. Chem. Eng.*, vol. 135, p. 106736, abr. 2020, doi: 10.1016/j.compchemeng.2020.106736.
- [4] J. D. Hedengren, “Temperature Control Lab”, *Dynamics and Control*, nov. 05, 2019. <http://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/ArduinoTemperatureControl> (accedido abr. 28, 2020).
- [5] L. Liu, S. Tian, D. Xue, T. Zhang, Y. Chen, y S. Zhang, “A Review of Industrial MIMO Decoupling Control”, *Int. J. Control Autom. Syst.*, vol. 17, n° 5, pp. 1246–1254, may 2019, doi: 10.1007/s12555-018-0367-4.
- [6] B. Wayne Baquette, “Empirical Model”, en *Process Control Modeling, Design and Simulation*, Prentice Hall PTR, 2002, pp. 168–202.
- [7] C. A. Smith y A. B. Corripio, *Control Automático de Procesos*. 1991.
- [8] T. E. Marlin, “Empirical Model Identification”, en *Process Control Designing Processes and Control*, Second., McGraw-Hill, 2014, p. 32.
- [9] J. Garrido, F. Vázquez, y F. Morilla, “Diseño de Sistemas de Control Multivariable por Desacoplo con Controladores PID”, p. 8, 2012.
- [10] R. Orellana Prato, M. Coronel Méndez, y R. Rojas Sulbaran, “Effect of decoupling techniques in multivariable systems”, *Ing. Desarro.*, vol. 35, n° 2, pp. 471–490, jun. 2017, doi: 10.14482/inde.35.2.10166.
- [11] D. Seborg, T. Edgar, D. Mellichamp, y F. Doyle III, *Process Dynamics and Control*, 3rd ed. .
- [12] R. Hernández Gaviño, “Modos de control y diseño de controladores”, en *Introducción a los sistemas de control Conceptos, aplicación y simulación con MATLAB*, 1era ed., vol. 1, 2010, pp. 361–399.
- [13] O. Camacho y R. Rojas, “A General Sliding Mode Controller for Nonlinear Chemical Processes”, *J. Dyn. Syst. Meas. Control-Trans. Asme*, vol. 122, dic. 2000, doi: 10.1115/1.1318351.
- [14] F. De la Cruz y O. Camacho, “Controlador de Modos Deslizantes basado en Predictor de Smith y Modelo de Segundo Orden para Procesos con Elevado Retardo”, *Rev. Politécnica*, vol. 35, n° 2, Art. n° 2, feb. 2015.
- [15] E. Catsigeras, “Estabilidad según Liapunov”, en *Teoría Cualitativa de la Ecuaciones Diferenciales*, 1998, p. 17.
- [16] M. Herrera, O. Camacho, H. Leiva, y C. Smith, “An approach of dynamic sliding mode control for chemical processes”, *J. Process Control*, vol. 85, pp. 112–120, ene. 2020, doi: 10.1016/j.jprocont.2019.11.008.
- [17] W. Acevedo, J. Rodríguez, y J. Saldarriaga, “Estimación de Parámetros del Suelo de dos Capas usando el Algoritmo de Optimización de Mapeo Media-Varianza”, *Inf. Tecnol.*, feb. 2019.
- [18] L. Toro y R. Ximena, “Reconfiguración de redes de distribución de energía eléctrica basada en optimización de mapeo media – varianza”, jul. 2014, Accedido: may 21, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8176>.
- [19] A. Rodríguez-Mariano, G. Reynoso-Meza, D. Páramo Calderón, E. Chávez-Conde, M. García-Alvarado, y J. Carrillo-Ahumada, “Análisis del desempeño de controladores lineales sintonizados en diferentes estados estacionarios del biorreactor de cholette mediante técnicas de decisión multi-criterio”, *Rev. Mex. Ing. Quím.*, vol. 14, p. 167, abr. 2015.

- [20] "Radar Charts - Learn about this chart and tools to create it". [https://datavizcatalogue.com/methods/radar\\_chart.html](https://datavizcatalogue.com/methods/radar_chart.html) (accedido may 21, 2020).
- [21] P. M. Oliveira y J. D. Hedengren, "An APMonitor Temperature Lab PID Control Experiment for Undergraduate Students", en *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, sep. 2019, pp. 790–797, doi: 10.1109/ETFA.2019.8869247.
- [22] "R Cuadrado (Coeficiente de determinación) - Definición, qué es y concepto", *Economipedia*, oct. 02, 2017. <https://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-coeficiente-determinacion.html> (accedido jun. 27, 2020).
- [23] L. Oliveira Gomes, "SEBORG 3rd Edition Process Dynamics and Control", Accedido: jul. 01, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/38620114/SEBORG\\_3rd\\_Edition\\_Process\\_Dynamics\\_and\\_Control](https://www.academia.edu/38620114/SEBORG_3rd_Edition_Process_Dynamics_and_Control).
- [24] L. Belá, "2.30 Sliding Mode Control in Process Industry", en *Process Control and Optimization*, vol. II, 2005, pp. 351–359.
- [25] E. I. S. Zambrano, "Análisis comparativo de técnicas de optimización para la sintonización de controladores PID adaptativos.", Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [26] J. A. S. Merinero, "Las Normas Técnicas ISO 9241 y EN 29241 sobre pantallas de visualización", p. 11.
- [27] The MathWorks, "MATLAB App Designer - MATLAB", *Mathworks*, 2020 1994. <https://www.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html> (accedido oct. 03, 2020).
- [28] O. enlace, Facebook, Twitter, Pinterest, C. electrónico, y O. aplicaciones, "Iniciándome en R: concepto de Z-Score". [http://www.lauranalytics.com/2016/03/iniciandome-en-r-concepto-de-z-score\\_29.html](http://www.lauranalytics.com/2016/03/iniciandome-en-r-concepto-de-z-score_29.html) (accedido ago. 07, 2020).

# **ANEXOS**

Se presentan los siguientes anexos:

ANEXO A. Validación de modelo  $T_1$  y  $T_2$  por coeficiente  $R^2$

ANEXO B. Normalización Z-SCORE

ANEXO C. Manual de Interfaz

## ANEXO A

Para la validación del modelo de primer orden más tiempo muerto con respecto al modelo real del sistema TCLAB, se consideró el método por el coeficiente  $R^2$ . En donde por medio de este coeficiente se determina un porcentaje de similitud entre el modelo obtenido y el modelo real del sistema.

A continuación, se presente un rango de valores tanto del sistema real como del sistema modelado. En la siguiente tabla A.1, se presentan los valores del sistema real junto con los valores del sistema modelado, para ambas salidas. Y en la tabla A.2 se presentan los valores que se requieren calcular para obtener el coeficiente.

En donde:

$y$ : Valores del sistema TCLAB

$\hat{y}$ : Valores del sistema modelado

$\bar{y}$ : Promedio de los valores reales del sistema TCLAB

**Tabla A.1.** Valores del sistema real y modelado

$T_1$		$T_2$	
$y$	$\hat{y}$	$y$	$\hat{y}$
71.84207	72.18964	72.9745	73.65591
71.84212	72.18964	72.97456	73.65591
71.84217	72.18964	72.97462	73.65591
71.84222	72.18964	72.97468	73.65591
71.84227	72.18964	72.97474	73.65591
71.84233	72.18964	72.97481	73.65591
71.84238	72.18964	72.97487	73.65591
71.84243	72.18964	72.97493	73.65591
71.84248	71.70088	72.97499	73.65591
71.84253	71.70088	72.97505	72.18964
71.84258	71.70088	72.97512	72.18964
71.84263	71.70088	72.97518	72.18964
71.84268	71.70088	72.97524	72.18964
71.84274	71.70088	72.9753	72.18964
71.84279	71.70088	72.97536	72.18964
71.84284	71.70088	72.97542	72.18964
71.84289	71.70088	72.97549	72.18964
71.84294	71.70088	72.97555	72.18964
71.84299	71.70088	72.97561	72.18964
71.84304	71.70088	72.97567	72.18964
71.84309	71.70088	72.97573	72.18964
71.84314	71.70088	72.97579	72.18964
71.84319	71.70088	72.97585	72.18964
71.84324	71.70088	72.97592	72.18964

71.8433	71.70088	72.97598	72.18964
71.84335	71.70088	72.97604	72.18964
71.8434	71.70088	72.9761	72.18964
71.84345	71.70088	72.97616	72.18964
71.8435	71.70088	72.97622	72.18964
71.84355	71.70088	72.97628	73.16716
71.8436	71.70088	72.97634	73.16716
71.84365	71.70088	72.9764	73.16716
71.8437	71.70088	72.97646	73.16716
71.84375	71.70088	72.97653	73.16716
71.8438	71.70088	72.97659	73.16716
71.84385	71.70088	72.97665	73.16716
71.8439	71.70088	72.97671	73.16716
71.84395	71.70088	72.97677	73.16716
71.844	71.70088	72.97683	73.16716
71.84405	71.70088	72.97689	73.65591
71.8441	71.70088	72.97695	73.65591
71.84415	71.70088	72.97701	73.65591
71.8442	71.70088	72.97707	73.65591
71.84425	71.70088	72.97713	73.65591
71.8443	71.70088	72.97719	73.65591
71.84435	71.70088	72.97725	73.65591
71.8444	71.70088	72.97731	73.65591
71.84445	71.70088	72.97737	73.65591
71.8445	72.6784	72.97743	73.65591
71.84455	72.6784	72.97749	72.18964
71.8446	72.6784	72.97755	72.18964
71.84465	72.6784	72.97761	72.18964
71.8447	72.6784	72.97767	72.18964
71.84475	72.6784	72.97773	72.18964
71.8448	72.6784	72.97779	72.18964
71.84485	72.6784	72.97785	72.18964
71.8449	72.6784	72.97791	72.18964
71.84495	72.6784	72.97797	72.18964
71.845	72.18964	72.97803	72.18964

**Tabla A.2.** Valores para determinar coeficiente  $R^2$

$T_1$		$T_2$	
$(y - \bar{y})^2$	$(\hat{y} - \bar{y})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(\hat{y} - \bar{y})^2$
160.2646887	169.1856925	184.9722644	203.971786
160.2659957	169.1856925	184.9739574	203.971786
160.2673017	169.1856925	184.9756492	203.971786
160.2686067	169.1856925	184.9773397	203.971786

160.2699108	169.1856925	184.9790289	203.971786
160.2712138	169.1856925	184.9807169	203.971786
160.2725158	169.1856925	184.9824037	203.971786
160.2738168	169.1856925	184.9840892	203.971786
160.2751169	156.7098755	184.9857734	203.971786
160.2764159	156.7098755	184.9874564	164.239436
160.2777139	156.7098755	184.9891382	164.239436
160.279011	156.7098755	184.9908187	164.239436
160.280307	156.7098755	184.992498	164.239436
160.2816021	156.7098755	184.994176	164.239436
160.2828961	156.7098755	184.9958528	164.239436
160.2841892	156.7098755	184.9975283	164.239436
160.2854812	156.7098755	184.9992026	164.239436
160.2867723	156.7098755	185.0008757	164.239436
160.2880624	156.7098755	185.0025475	164.239436
160.2893515	156.7098755	185.0042181	164.239436
160.2906396	156.7098755	185.0058874	164.239436
160.2919267	156.7098755	185.0075555	164.239436
160.2932129	156.7098755	185.0092224	164.239436
160.294498	156.7098755	185.010888	164.239436
160.2957822	156.7098755	185.0125524	164.239436
160.2970653	156.7098755	185.0142156	164.239436
160.2983475	156.7098755	185.0158775	164.239436
160.2996287	156.7098755	185.0175382	164.239436
160.300909	156.7098755	185.0191977	164.239436
160.3021882	156.7098755	185.0208559	190.2499
160.3034665	156.7098755	185.022513	190.2499
160.3047437	156.7098755	185.0241687	190.2499
160.30602	156.7098755	185.0258233	190.2499
160.3072953	156.7098755	185.0274766	190.2499
160.3085697	156.7098755	185.0291287	190.2499
160.3098431	156.7098755	185.0307796	190.2499
160.3111154	156.7098755	185.0324293	190.2499
160.3123868	156.7098755	185.0340777	190.2499
160.3136573	156.7098755	185.0357249	190.2499
160.3149267	156.7098755	185.0373709	203.971786
160.3161952	156.7098755	185.0390157	203.971786
160.3174627	156.7098755	185.0406593	203.971786
160.3187293	156.7098755	185.0423016	203.971786
160.3199948	156.7098755	185.0439427	203.971786
160.3212594	156.7098755	185.0455827	203.971786
160.3225231	156.7098755	185.0472214	203.971786
160.3237857	156.7098755	185.0488588	203.971786
160.3250474	156.7098755	185.0504951	203.971786

160.3263081	182.1392793	185.0521302	203.971786
160.3275679	182.1392793	185.053764	164.239436
160.3288267	182.1392793	185.0553966	164.239436
160.3300845	182.1392793	185.057028	164.239436
160.3313413	182.1392793	185.0586583	164.239436
160.3325972	182.1392793	185.0602873	164.239436
160.3338521	182.1392793	185.0619151	164.239436
160.3351061	182.1392793	185.0635417	164.239436
160.3363591	182.1392793	185.065167	164.239436
160.3376112	182.1392793	185.0667912	164.239436
160.3388622	169.1856925	185.0684142	164.239436



## ANEXO B

La normalización de los valores obtenidos en los índices de rendimiento de cada controlador, se realizó por medio de la normalización Z-SCORE, de la siguiente manera:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

En donde:

$x$ : valor no normalizado

$\mu$ : media de la distribución de valores a normalizar

$\sigma$ : desviación estándar

En las siguientes tablas se presentan los índices de rendimiento normalizados en un rango de [-1.5 a 1.5], para cada una de las pruebas.

**Tabla B.1.** Índices de Rendimiento

Cambio de referencia

	$T_1$				$T_2$		
	TVU	ISE	IAE		TVU	ISE	IAE
<b>PI</b>	-0.53186	0.812995	0.773009	<b>PI</b>	-0.52995	0.798109	0.745806
<b>SMC</b>	1.153536	0.303628	0.356357	<b>SMC</b>	1.153437	0.323626	0.39053
<b>DSMC</b>	-0.62167	-1.11662	-1.12937	<b>DSMC</b>	-0.62349	-1.12173	-1.13634

**Tabla B.2.** Índices de Rendimiento

Incertidumbre en el modelado

	$T_1$				$T_2$		
	TVU	ISE	IAE		TVU	ISE	IAE
<b>PI</b>	-0.53073	0.639365	0.564377	<b>PI</b>	-0.5304	0.689315	0.714799
<b>SMC</b>	1.153478	0.513029	0.590227	<b>SMC</b>	1.153461	0.45761	0.427964
<b>DSMC</b>	-0.62275	-1.15239	-1.1546	<b>DSMC</b>	-0.62306	-1.14693	-1.14276

**Tabla B.3.** Índices de Rendimiento

Perturbación externa

	$T_1$				$T_2$		
	TVU	ISE	IAE		TVU	ISE	IAE
<b>PI</b>	-0.45631	1.091144	1.100707	<b>PI</b>	-0.4431	0.984589	1.06086
<b>SMC</b>	1.14676	-0.21838	-0.24814	<b>SMC</b>	1.144992	0.030141	-0.13555
<b>DSMC</b>	-0.69045	-0.87276	-0.85257	<b>DSMC</b>	-0.7019	-1.01473	-0.92531

## ANEXO C

### Manual de Usuario

El presente manual tiene como objetivo brindar un direccionamiento al usuario.

#### Manual de Usuario de Hardware

Para el correcto uso del módulo de temperatura TCLAB, se debe considerar la conexión de los elementos en base a la siguiente figura:



Figura A. 1 Diagrama de conexión

Se tienen dos cables con puerto USB. El cable de color blanco permite entregar energía a los calentadores y se conecta directo a un cubo de carga y el cable azul se lo conecta directamente al puerto USB de la computadora y permite la comunicación con el Arduino además de brindar energía al mismo. Una vez considerado los tipos de cables, la conexión en el módulo se la realiza de la siguiente manera:

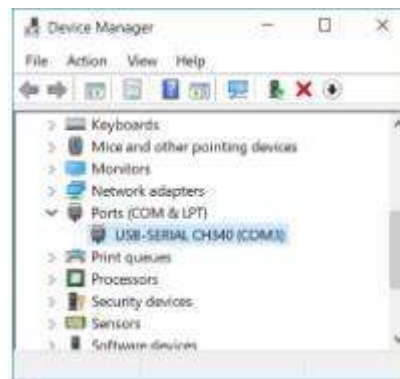


Figura A. 2 Conexión de cables al módulo de temperatura TCLAB



**Figura A. 3** Conexión del Módulo de temperatura TCLAB

Finalmente se verifica la conexión del Arduino con la computadora, en el Administrador de dispositivos, en donde se le asigna un puerto serial COM, como se muestra a continuación:



**Figura A. 4** Conexión Arduino - Computador

### **Manual de Usuario de Software**

Antes de iniciar con el programa propuesto, se requiere una versión de Matlab 2015A o mayores a esta. Seguido de esto es necesario instalar las librerías provistas por el fabricante, mismas que se encuentran en la página Web: “Dynamics and Control”, accedida por medio del siguiente link:

<http://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/ArduinoTemperatureControl>

Una vez que se ingresa a la página Web se pueden descargar los archivos, como se muestra a continuación:

1. Seleccionar “Download TCLab Files”



Figura A. 5 Vista de pantalla principal al ingresar al link

2. Guardar la descarga en su ordenador:

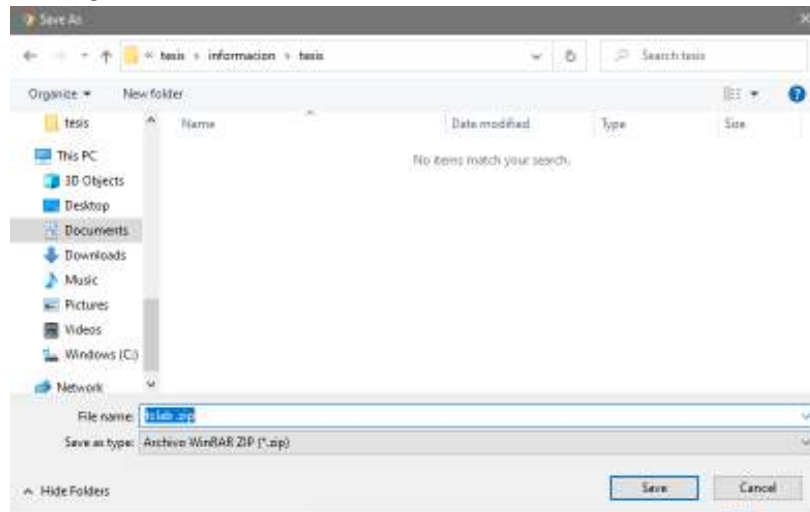
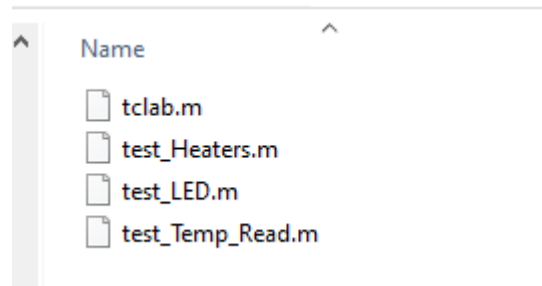
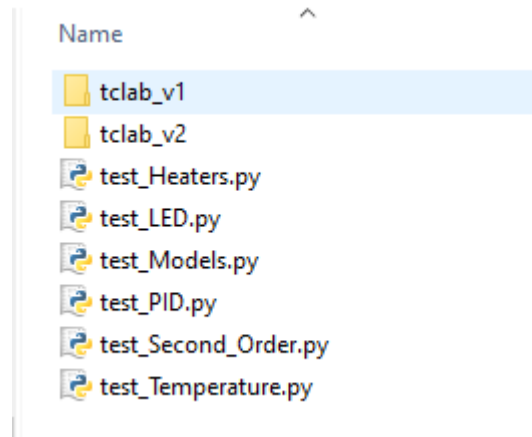


Figura A. 6 Guardar descarga en el ordenador

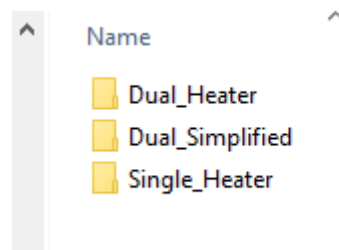
3. Una vez que se descarga, se procede a descomprimir los archivos, en donde se encontrarán los archivos base tanto para Matlab/Simulink y para Python, sobre los cuales se podrá trabajar y realizar las diferentes pruebas de temperatura en el módulo. En las siguientes figuras se presentan los archivos contenidos en: Matlab, Python y Simulink.



**Figura A. 7** Archivos base Matlab



**Figura A. 8** Archivos base Python



**Figura A. 9** Archivos base Simulink

Para poder visualizar los resultados obtenidos y realizar las diferentes pruebas junto con los controladores desarrollados en el presente trabajo de titulación, es necesario que el usuario disponga de los siguientes requisitos de software.

- Matlab R2019a
- App Designer R2019a
- Carpeta HMI Tesis

Previo al uso de la Interfaz, es importante cargar los archivos de la carpeta HMI Tesis dentro del Matlab para poder correr el programa sin ningún inconveniente.

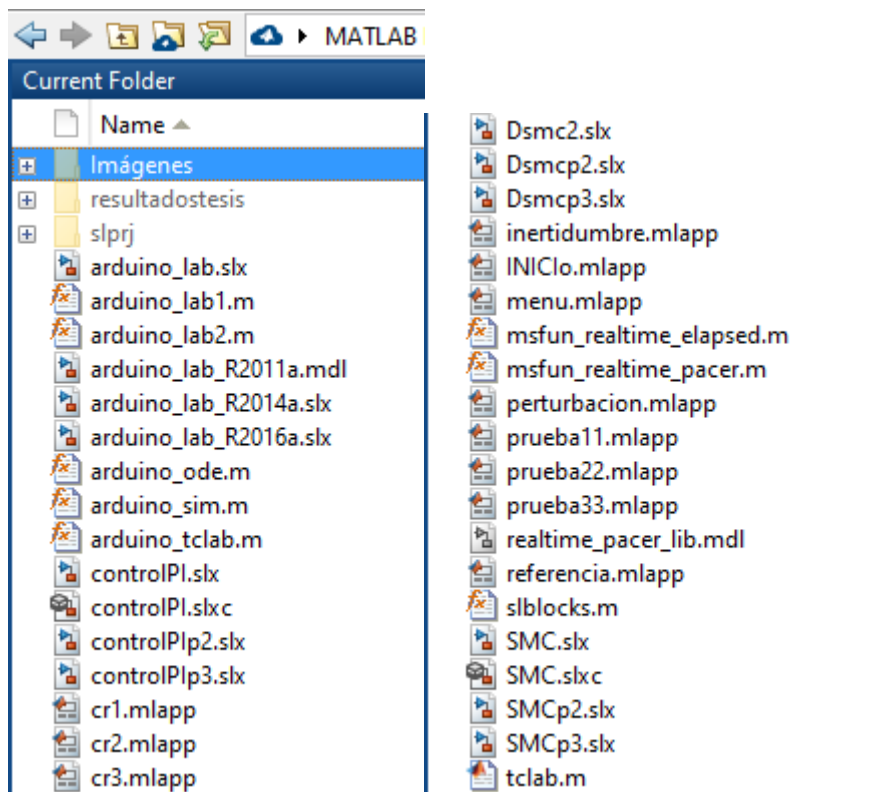


Figura A. 10 Carpeta HMI Tesis

Una vez cargada la carpeta, se inicia el programa dando doble clic en el archivo **INIClo.mlapp**, una vez que se abre el archivo, se presenta como se ve en la Figura A.11, y se procede a dar clic en RUN, mismo que se encuentra señalado en el recuadro rojo.

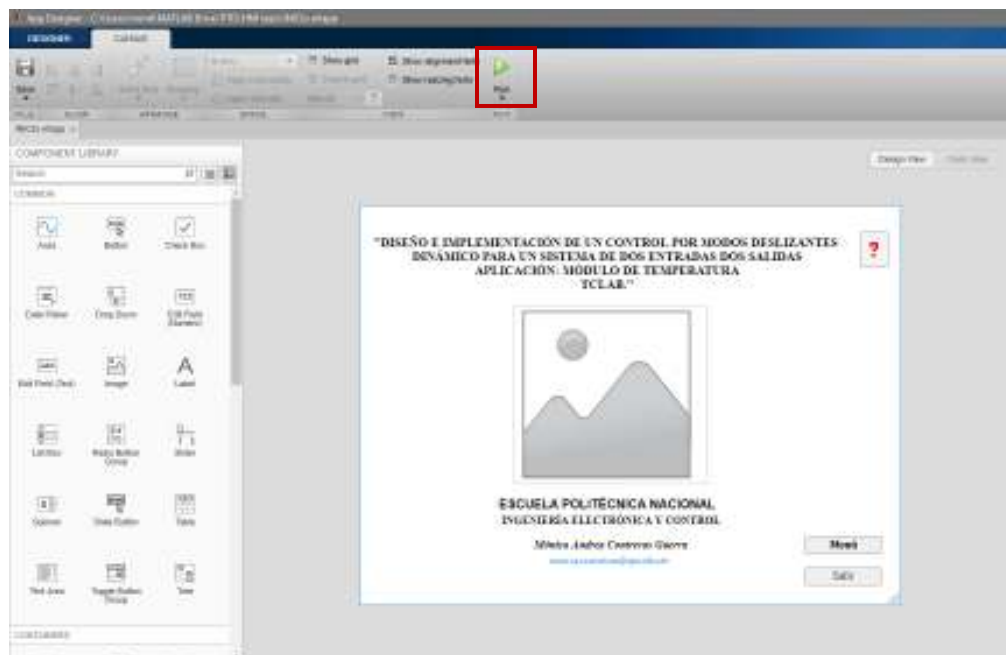
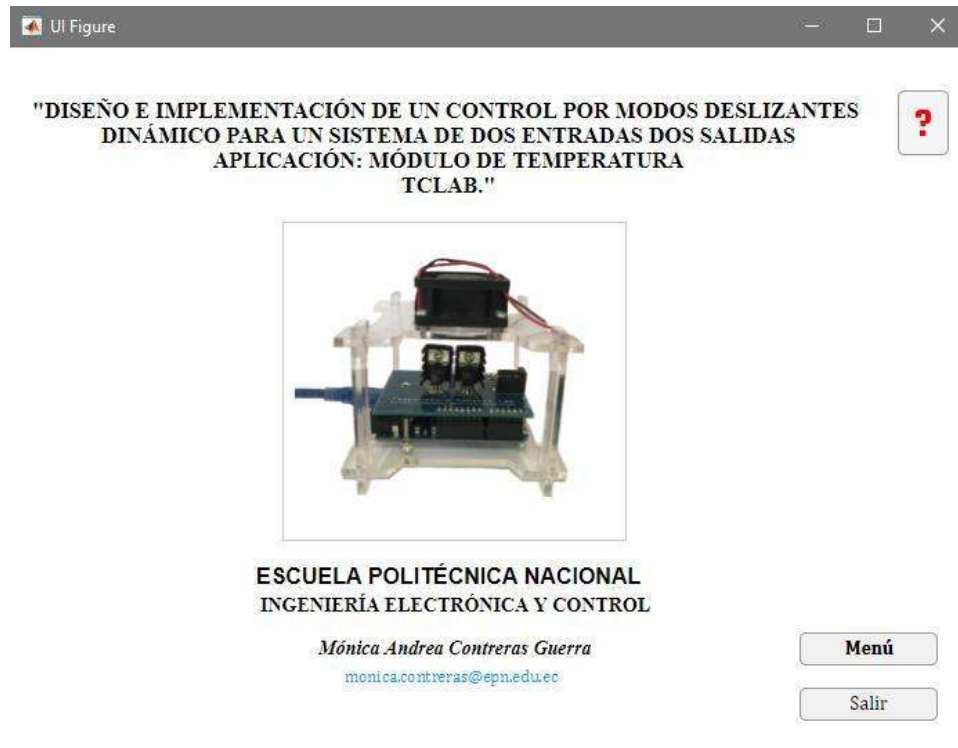


Figura A. 11 Inicialización de la Interfaz Gráfica

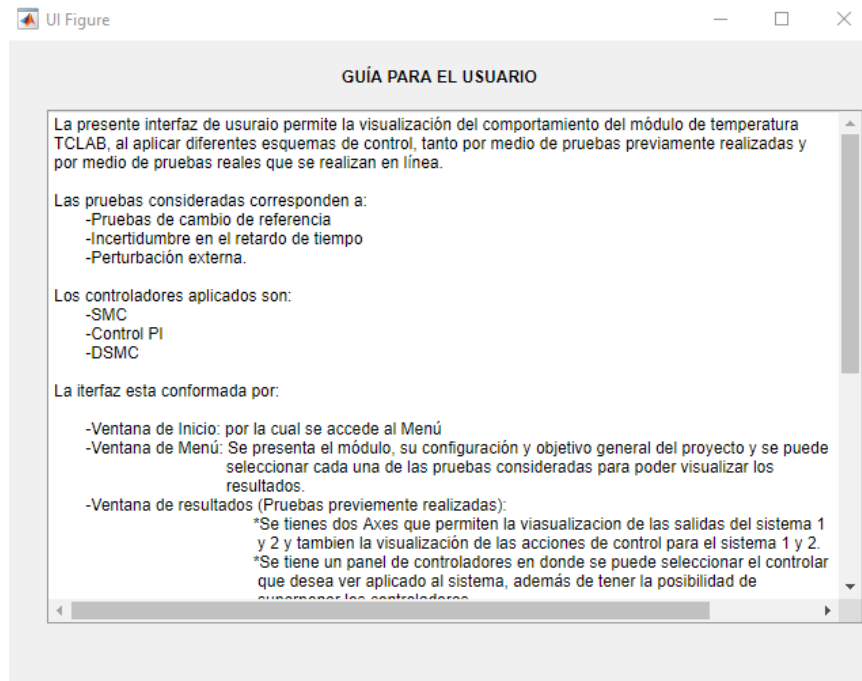
Seguido de esto, se carga la ventana de Inicio como se ve en la Figura A.12, misma que contiene información correspondiente al proyecto de titulación. Además, presenta dos botones, mismos que se detallan a continuación.

- Botón de ayuda (?): Brinda información acerca de la interfaz y del proyecto de titulación.
- Botón de Menú: Permite ingresar al menú del programa.
- Botón de Salir: Permite salir y cerrar la Interfaz Gráfica.



**Figura A. 12** Ventana de Inicio

En el botón de Ayuda se da a conocer cómo se encuentra conformada la interfaz, los controladores considerados para el sistema y las pruebas que se realizaron. Además de indicar el funcionamiento de la interfaz como se muestra en la figura A.13.

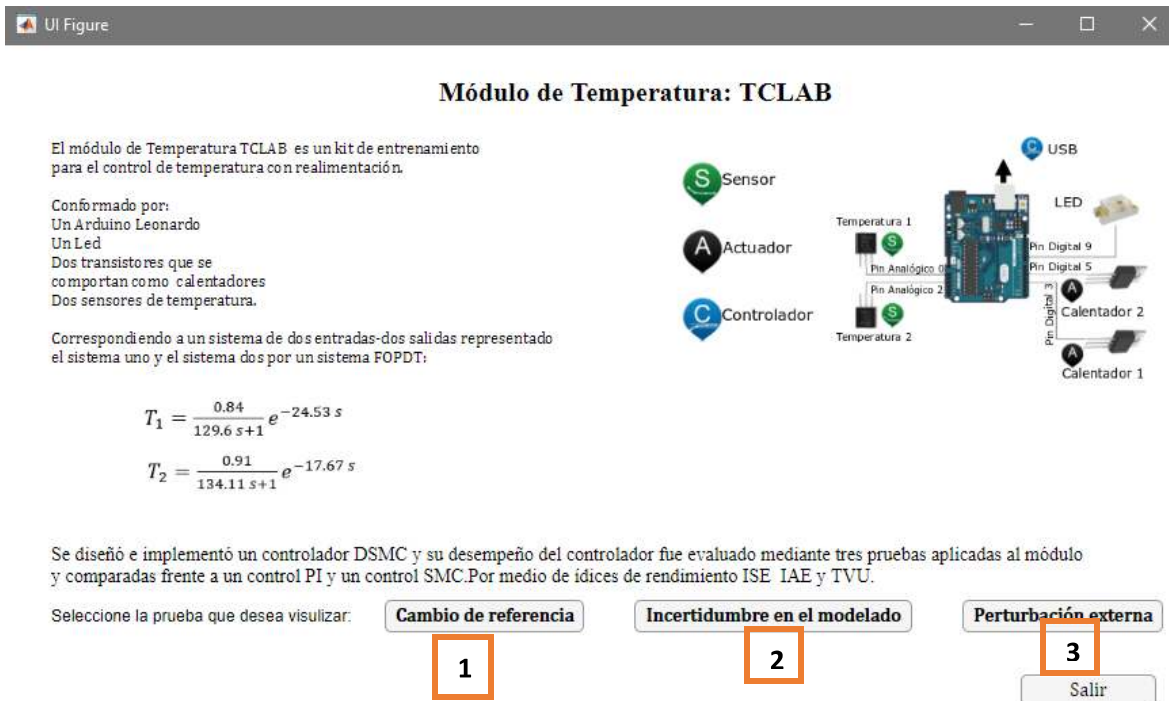


**Figura A. 13** Guía para el usuario

En la ventana de Menú se tiene una breve descripción acerca del módulo de Temperatura y de los controladores que fueron implementados. Para poder visualizar los resultados obtenidos mediante diferentes pruebas, se tiene tres botones que permiten el ingreso a las diferentes ventanas de:

- Prueba de Cambio de Referencia (1)
- Prueba de Incertidumbre en el Modelado (2)
- Prueba de Perturbación externa (3)





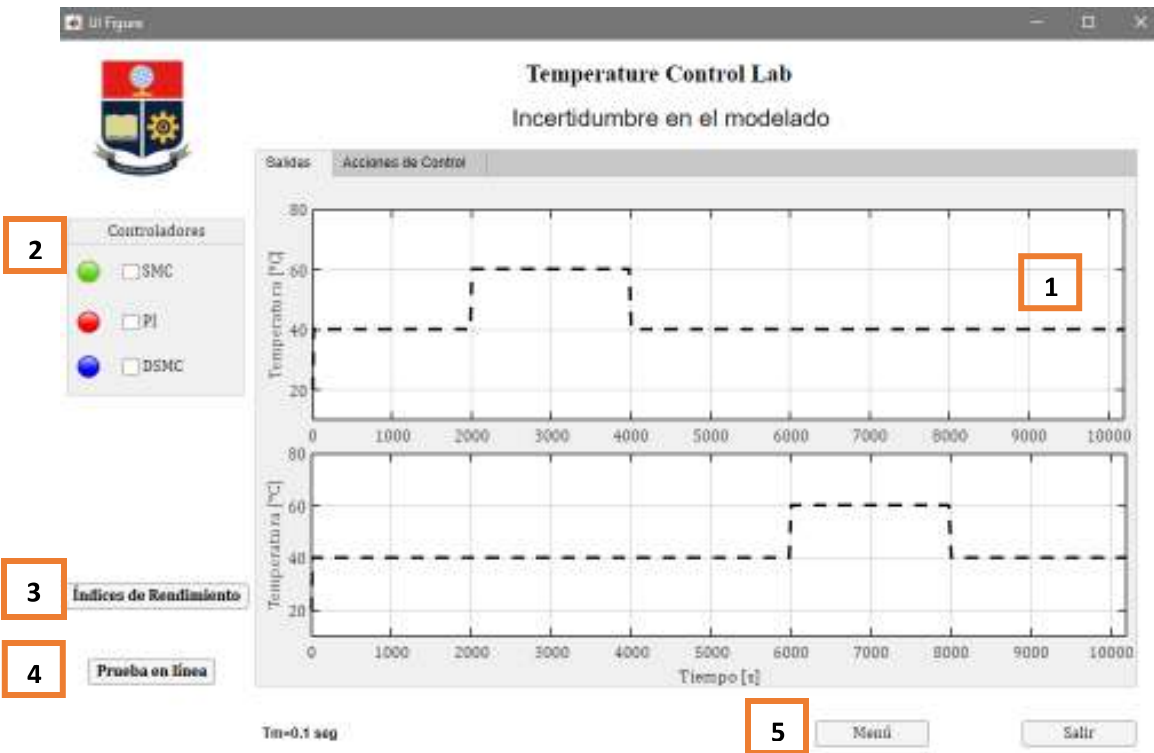
**Figura A. 14** Ventana de Menú

Cada una de las pruebas realizadas presenta las opciones mencionadas anteriormente, que son:

- Visualización de resultados
- Tiempo de muestreo
- Visualización de Índices de rendimiento
- Pruebas en línea.
- Retornar al Menú
- Salir

A manera de ejemplo, se presentará con una de las pruebas realizadas el procedimiento a seguir una vez seleccionada la prueba que desee ver el usuario.

Seleccionado el botón de la prueba de Incertidumbre en el modelado, se despliega la ventana con 2 "Axes" (1), un panel para seleccionar el tipo de controlador (2), un botón para visualizar los Índices de rendimiento (3) y un botón para realizar las pruebas en línea (4), además de los botones de Menú y Salida (5).



**Figura A. 15** Ventana para visualizar resultados obtenidos.

Para seleccionar que tipo de controlador se desea visualizar, únicamente se debe dar click en el recuadro que se encuentra junto al panel de controladores, como se presenta en la figura.



**Figura A. 16** Panel de Controladores

Una vez que se selecciona el controlador o controladores, se puede visualizar tanto las salidas en la pestaña de “Salidas” (1), y las acciones de control en la pestaña de “Acciones de control” (2), como se muestra a continuación.

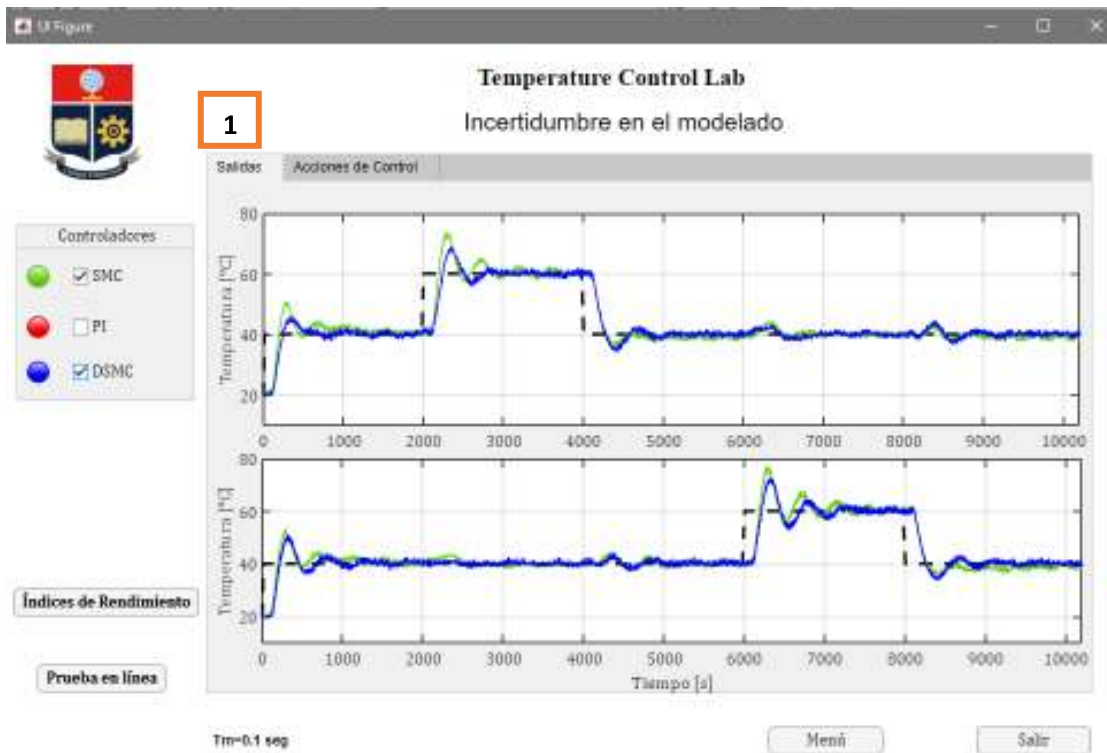


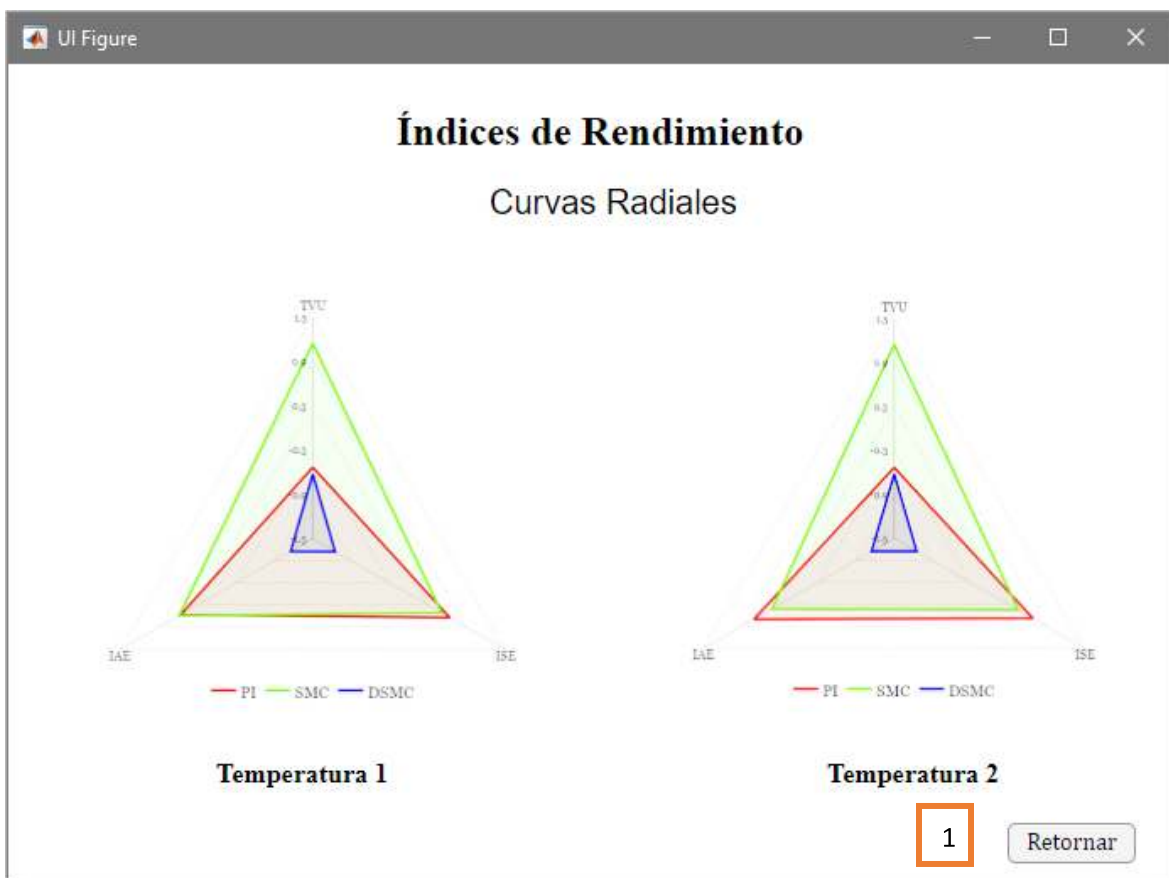
Figura A. 17 Señales de Salida



Figura A. 18 Acciones de Control

Seguido de la visualización de resultados, se puede observar por medio de curvas radiales los índices de rendimiento de los controladores implementados, y evaluar el desempeño de los mismos, seleccionando el botón “Índices de rendimiento”.

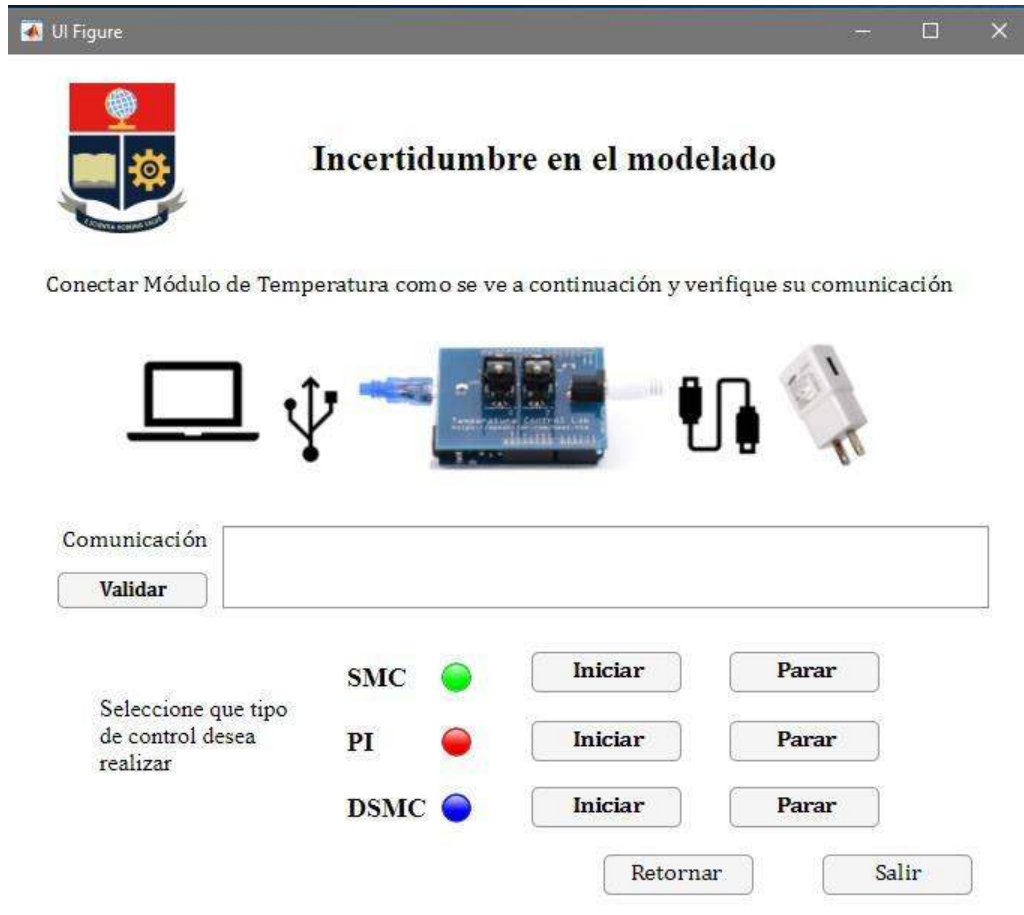
Al desplegarse la ventana de Índices de rendimiento, se podrá visualizar las curvas radiales obtenidas para ambas salidas, en donde se consideraron los índices de rendimiento de IAE, ISE y TVU, y poder evaluar el desempeño de los controladores implementados. Además, se tiene el botón de Retornar (1), mismo que permite regresar a la ventana de resultados.



**Figura A. 19** Índices de Rendimiento

Finalmente, en la ventana de resultados al seleccionar el botón de “prueba en línea”, se despliega una ventana en donde se debe primero realizar la conexión del módulo como se ve en la figura y seguido de esto se valida la conexión. Una vez conectado el módulo con la interfaz se debe seleccionar el controlador que se desea implementar en el módulo de Temperatura. En la Figura A.20 se puede ver que para cada controlador se tienen dos botones, uno para iniciar la prueba en línea y el otro para detenerla.

Una vez que se selecciona un controlador y se da "Iniciar", se abrirá un archivo de Simulink correspondiente a la prueba en la que se encuentre y controlador seleccionado. En donde se podrá visualizar como se va comportando el sistema y las señales de salida y de control en línea, por medio del "Scope" del Simulink.



**Figura A. 20** Ventana Simulación

En la Figura A.21, se puede visualizar la forma en la que se visualizaría las señales de entrada, de salida y acciones de control. En caso de querer detener la prueba, se da click en el botón parar y la prueba se detiene de inmediato.

También existe la posibilidad de retornar a la ventana de resultados por medio del botón Retornar o la opción de Salir y cerrar la Interfaz del sistema.



**Figura A. 21** Vista del Scope de Prueba en Línea

Una vez terminada la prueba, la simulación se detiene automáticamente y se puede proceder a realizar otras pruebas una vez que el sistema se haya enfriado.

## **ORDEN DE EMPASTADO**