

**HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA SIMULACIÓN DEL AJUSTE
DE CONTROLADORES**

**SERGIO ANDRÉS MERCHÁN DOMINGUEZ
JORGE MARIO QUIROZ DE LA OSSA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2007

**HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA SIMULACIÓN DEL AJUSTE
DE CONTROLADORES**

**SERGIO ANDRÉS MERCHÁN DOMINGUEZ
JORGE MARIO QUIROZ DE LA OSSA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

Director

Ph.D CARLOS RODRIGO CORREA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2007**

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que hicieron posible el desarrollo de este trabajo de grado, en especial a nuestro director con sus consejos y recomendaciones.

Agradecemos también al profesor Víctor Alfaro de la Universidad de Costa Rica, quien con su amabilidad nos facilitó material indispensable para nuestro trabajo.

Primero que todo quiero agradecer a Dios todo poderoso, quien nos da el privilegio de existir en este mundo y con su poder me permitió llegar a este gran logro.

Agradezco también a mi señora madre MARTHA LUCIA DOMINGUEZ, quien con todo su amor y apoyo logró hacer de mi, una gran persona; capaz de alcanzar el título de profesional y corresponder así a su gran esfuerzo; gracias mamá por tantos hermosos días, gracias por permitirme ser tú hijo y por apoyarme incondicionalmente, te amo mamá, así me separe de tu lado jamas dejaras de ser lo más bello de mi vida y nunca e olvidaré de ti; de igual manera, agradezco a JOSÉ ALVARO HERNANDEZ, que sin ser mi padre biológico se ha comportado como tal, gracias por tantas veces en las que me brindo su apoyo, éste logro que hoy alcanzo no hubiera sido posible sin su colaboración.

Otras personas a quienes les estoy eternamente agradecido, son mi difunta abuela JOSEFA DURAN, quien me mantuvo siempre a su lado durante mis primeros años de vida; y a mi tía OMAIRA SERRANO LEON, quien se encargo de mi formación durante la infancia.

De la misma manera quiero hacer partícipes de mi triunfo a todas las personas cercanas a mí, quienes cada día me generaban motivaciones para seguir adelante, incluidos todos los maestros presentes durante mi formación profesional.

Por último quiero agradecer, a una persona que si bien no ha estado conmigo toda la vida, se ha convertido en una parte indispensable de ella; a ti mi amor, JENNY CAROLINA ALARCON HERNANDEZ, que eres el pilar de mi vida. Te amo Caro, y deseo estar a tu lado siempre.

Sergio Andrés Merchán Domínguez

En primer lugar quiero agradecerle a Dios, quien me colmó de fe y fortaleza durante el transcurso de mis estudios.

También agradezco a mis padres, Gladis De la Ossa y Eudaldo Quiroz, que siempre me apoyaron durante el curso de mi carrera, además de darme sus consejos y ánimo cada vez que lo necesitaba. Asimismo a mi hermano José Leonardo, quien fue una persona que estuvo a mi lado apoyándome y orientándome desde que empecé mi carrera, y por último, a mi otro hermano Emilio José, que desde la distancia siempre creyó en mi y también me brindó su respaldo.

Jorge Mario Quiroz De la Ossa

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	19
1. MARCO TEÓRICO.....	23
1.1 CONTROL AUTOMÁTICO [2], [6], [11], [12].....	23
1.1.1 Introducción.....	23
1.1.2 Definiciones Básicas.....	24
1.1.3 Componentes de un Sistema de Control.....	24
1.1.4 Sistemas de control en lazo abierto.....	25
1.1.5 Sistemas de control en lazo cerrado o realimentado.....	25
1.1.6 Tipos de Controladores.....	27
1.1.6.1 Controlador P.....	27
1.1.6.2 Controlador PD.....	27
1.1.6.3 Controlador PI.....	28
1.1.6.4 Controlador PID.....	28
1.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS PARA LOS PROCESOS	
CONTROLADOS [1], [4], [8], [12].....	29
1.2.1 Modelos.....	30
1.2.2 Métodos que emplean la curva de reacción.....	31
1.2.2.1 Identificación de sistemas sobreamortiguados de segundo orden o mayor.....	32
1.2.2.1.1 Métodos que emplean la recta tangente.....	33
1.2.2.1.2 Métodos que emplean dos puntos de la curva de reacción.....	34
1.2.2.1.3 Método que emplea tres puntos de la curva de reacción.....	38
1.2.2.2 Identificación de sistemas subamortiguados de segundo orden o mayor.....	40
1.2.2.2.1 Método que emplea tres puntos de la curva de reacción.....	41
1.2.2.2.2 Método de identificación con base en el sobrepaso máximo.....	41
1.2.2.2.3 Método de identificación con base en el decaimiento.....	43
1.2.3 Métodos basados en la información última para sistemas sobreamortiguados.....	44
1.2.4 Métodos de control P.....	46
1.2.4.1 Método de Yuwana y Seborg.....	46
1.2.4.2 Método de Jutan y Rodríguez.....	48
1.3 MÉTODOS DE AJUSTE DE CONTROLADORES PI Y PID [2], [3], [8], [10], [11], [12].....	49

1.3.1	MÉTODOS BASADOS EN LA CURVA DE REACCIÓN DEL PROCESO	51
1.3.1.1	Método de Ziegler y Nichols.....	51
1.3.1.2	Método de Chien, Hrones y Reswick.....	52
1.3.1.3	Método de Cohen - Coon	53
1.3.1.4	Método de Shinskey (PI).....	54
1.3.1.5	Método de Liptak.....	54
1.3.1.6	Método de O'Dwyer	55
1.3.1.7	Método de Tan	56
1.3.1.8	Método de Shinskey (PID Clásico).....	56
1.3.2	MÉTODOS BASADOS EN EL MÍNIMO ÍNDICE DE DESEMPEÑO	57
1.3.2.1	Mínimo Índice de Desempeño: Ajuste Regulator.....	58
1.3.2.1.1	Método de Lopez, Murrill	58
1.3.2.1.2	Método de Arrieta.	60
1.3.2.1.3	Método de Alfaro.....	61
1.3.2.1.4	Método de Ho, Lim y Xu.	61
1.3.2.1.5	Método de Shinskey.....	62
1.3.2.1.6	Método de Syrcos y Kookos.....	62
1.3.2.1.7	Método de Haalman	63
1.3.2.1.8	Método de Bohl y McAvoy.....	63
1.3.2.1.9	Método de Smith y Corripio.....	64
1.3.2.1.10	Método de Kaya y Scheib	64
1.3.2.1.11	Método de Shinskey (PID Clásico)	65
1.3.2.1.12	Método de Chao	66
1.3.2.2	Mínimo Índice de Desempeño: Ajuste Servomecanismo.	67
1.3.2.2.1	Método de Rovira.....	67
1.3.2.2.2	Método de Arrieta.	68
1.3.2.2.3	Método de Alfaro.....	69
1.3.2.2.4	Método de Ho, Lim y Xu.	69
1.3.2.2.5	Método de Smith.....	70
1.3.2.2.6	Método de Smith y Corripio.....	70
1.3.2.2.7	Método de Kaya y Scheib.....	71
1.3.2.2.8	Método de Chao.....	72
1.3.3	SÍNTESIS DIRECTA.	72
1.3.3.1	Método de Vitecková (PI)	73

1.3.3.2 Método de Vitecková (PID).....	73
1.3.3.3 Método de Ho, Hang y Cao.....	75
1.3.3.4 Método de Ho, Hang y Zhou.....	76
1.3.3.5 Método de Vitecková.....	76
1.3.3.6 Método de Sree.....	77
1.3.3.7 Método de Hägglund y Åström.....	79
1.3.3.8 Método de Leva.....	79
1.3.3.9 Método de Pomeleau y Poulin.....	80
1.3.3.10 Método de Skogestad.....	80
1.3.3.11 Método de Chiu.....	81
1.3.3.12 Método de Gorez y Klän.....	81
1.3.3.13 Método de Arvanitis.....	82
1.3.3.14 Método de Haeri.....	82
1.3.3.15 Método de O'Dwyer.....	83
1.3.3.16 Método de Wang.....	83
1.3.3.17 Método de Poulin.....	84
1.3.4 REGLAS DE AJUSTE ROBUSTAS.....	85
1.3.4.1 Método de Smith.....	85
1.3.4.2 Método de Kristiansson.....	86
1.3.5 MÉTODOS BASADOS EN EL CICLO ÚLTIMO.....	86
1.3.5.1 Método de Ziegler y Nichols.....	86
1.3.5.2 Método de Robbins.....	87
1.3.5.3 Método de Corripio.....	88
1.3.5.4 Método de Åström y Hägglund.....	88
1.3.5.5 Método de McMillan.....	89
1.3.5.6 Método de Tan (PID Ideal).....	89
1.3.5.7 Método de Yu.....	89
1.3.5.8 Método de Smith.....	90
1.3.5.9 Método de Pessen.....	90
1.3.5.10 Método de Bohl y McAvoy.....	91
1.3.5.11 Método de Tan (PID Serie).....	91
1.3.5.12 Método de O'Dwyer.....	92
1.3.5.13 Método de Corripio (PID Clásico).....	92
1.3.5.14 Método de Harrold.....	93

1.3.5.15 Método de Edgar	93
1.4 CRITERIOS DE ESTABILIDAD DE UN SISTEMA DE CONTROL [3], [11], [12]	93
1.4.1 Diagrama de Nyquist	94
1.4.2 Diagrama de Bode	95
1.4.3 Lugar Geométrico de las Raíces	95
1.5 CRITERIOS DE ROBUSTEZ DE UN SISTEMA DE CONTROL [2], [10], [11], [12]	95
1.5.1 Índices de Robustez en la Frecuencia	96
1.5.2 Índices de Robustez en la ganancia y el tiempo	96
<i>Figura 9. Curva de Robustez</i>	97
<i>2. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA [9], [14]</i>	99
2.1 Herramientas de MATLAB utilizadas	99
2.2 Diseño de la Interfaz	100
2.2.1 Ventana de Inicio	101
2.2.2 Ventana de Introducción	102
2.2.3 Ventana Datos del Proceso	103
2.2.4 Ventana de Identificación del proceso	106
2.2.5 Ventana de Sintonización del controlador	110
<i>3. PRUEBAS Y RESULTADOS [4], [13]</i>	116
3.1 Planta del Motor DC	116
3.2. Planta con tiempo muerto [4]	123
3.3. Planta circuito de control de temperatura	126
<i>CONCLUSIONES</i>	131
<i>RECOMENDACIONES</i>	133
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	134
<i>ANEXOS</i>	137
Anexo A. Manual del usuario	137

Anexo B. Código fuente del programa152

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Operaciones básicas de un lazo de control.....	25
Figura 2. Lazo de control realimentado.....	26
Figura 3. Curva de reacción de un sistema de segundo orden mas tiempo muerto.....	33
Figura 4. Método de la tangente para sistemas de segundo orden o mayor.....	34
Figura 5. Método de dos puntos.....	35
Figura 6. Método de tres puntos.....	40
Figura 7. Método de Identificación de sistemas subamortiguados.....	42
Figura 8. Métodos de control P.....	47
Figura 9. Curva de Robustez.....	97
Figura 10. Gráfico de robustez para un sistema con el controlador sintonizado con dos diferentes conjuntos de parámetros.....	98
Figura 11. Diagrama de bloques de la Interfaz gráfica.....	101
Figura 12. Ventana de Inicio.....	102
Figura 13. Ventana de Introducción.....	103
Figura 14. Ventana Datos del Proceso.....	104
Figura 15. Ventana en correcto funcionamiento.....	105
Figura 16. Ventana de error cuando se ingresa un dato que no sea numérico.....	105
Figura 17. Ventana de error orden del numerador mayor que el del denominador.....	106
Figura 18. Ventana de Identificación del proceso si la Curva de reacción tiene un comportamiento sobreamortiguado.....	107
Figura 19. Ventana de error si no se escoge un tipo de identificación.....	108
Figura 20. Ventana de error en el método de identificación.....	109
Figura 21. Ventana de identificación en su correcto funcionamiento.....	110
Figura 22. Ventana de sintonización del controlador.....	111
Figura 23. Ventana de sintonización del controlador, escogido el controlador PI.....	113
Figura 24. Ventana de error.....	114
Figura 25. Ventana de advertencia.....	114
Figura 26. Ventana del método de Ho-Lim.....	115
Figura 27. Ventana del método de Vitecková.....	115
Figura 28. Circuito de la armadura y diagrama de cuerpo libre del rotor para un motor DC.....	116
Figura 29. Introducción de datos del proceso.....	117
Figura 30. Curva de reacción.....	118
Figura 31. Identificación de la planta.....	118
Figura 32. Curvas de reacción.....	120

Figura 33. Ajuste del controlador	121
Figura 34. Diagrama de Bode	122
Figura 35. Diagrama de Nyquist.....	122
Figura 36. Diagrama del lugar de las raíces	123
Figura 37. Ingreso de la planta.....	124
Figura 38. Identificación de la planta.....	124
Figura 39. Ajuste del controlador	125
Figura 40. Curva de robustez	126
Figura 41. Curva de reacción circuito control de temperatura.....	127

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Constantes para la identificación de los modelos de 1er orden más tiempo muerto	37
Tabla 2. Constantes para la identificación de los modelos de polo doble más tiempo muerto	38
Tabla 3. Parámetros de controladores del método de Chien	52
Tabla 4. Constantes del método de O'Dwyer para funcionamiento como regulador	55
Tabla 5. Constantes método de Murrill controlador PI	59
Tabla 6. Constantes método de Murrill controlador PI	59
Tabla 7. Constantes método de Arrieta controlador PI.....	60
Tabla 8. Constantes método de Arrieta controlador PID.....	60
Tabla 9. Constantes método de Alfaro controlador PID	61
Tabla 10. Constantes método de Kaya y Scheib controlador PID Clásico.....	65
Tabla 11. Fórmula método de Rovira	67
Tabla 12. Constantes método de Arrieta controlador PI	68
Tabla 13. Constantes método de Arrieta controlador PID	68
Tabla 14. Constantes método de Alfaro controlador PID.....	69
Tabla 15. Fórmulas método de Kaya y Scheib	71
Tabla 16. Constante método de Vitecková controlador PI.....	73
Tabla 17. Constante método de Vitecková controlador PID.....	74
Tabla 18. Constante método de Vitecková controlador PID.....	75
Tabla 19. Fórmula parámetro T_i según método de Sree.....	78
Tabla 20. Fórmula método de Hägglund y Åström.....	79
Tabla 21. Fórmula método de Leva.....	80
Tabla 22. Fórmula método de Wang como regulador	84
Tabla 23. Fórmula método de Wang como servomecanismo	84
Tabla 24. Fórmula método de Åström y Hägglund.....	88
Tabla 25. Fórmula método de O'Dwyer	92
Tabla 26. Identificación motor DC.....	119
Tabla 27. Ajuste como regulador motor DC	120
Tabla 28. Ajuste como servomecanismo motor DC.....	121
Tabla 29. Identificación circuito control de temperatura	127
Tabla 30. Ajuste como regulador circuito control de temperatura	128
Tabla 31. Ajuste como servomecanismo circuito control de temperatura	129

NOMENCLATURA

$c(s)$: variable controlada.

$r(s)$: valor deseado (entrada)

$y(s)$: señal realimentada

$e(s)$: señal de error, $[e(s) = r(s) - y(s)]$.

$G_c(s)$: función de transferencia del controlador.

$G_p(s)$: función de transferencia de la planta.

K_c : ganancia proporcional del controlador.

T_d : tiempo derivativo del controlador.

T_i : tiempo integral del controlador.

N : parámetro que determina el orden del filtro en la parte derivativa del controlador PID Clásico

t_m : tiempo muerto.

τ : constante de tiempo del proceso.

K_u : ganancia última.

T_u : periodo último.

τ_n : período natural.

ζ : razón de amortiguamiento.

ζ^{des} : razón de amortiguamiento deseado de la respuesta en lazo cerrado.

ω_n : frecuencia natural no amortiguada.

τ_1, τ_2 : constantes de tiempo

MG : Margen de ganancia

MF : Margen de fase

M_s : Sensibilidad máxima

λ : Parámetro que determina la robustez del sistema compensado

TÍTULO: HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA SIMULACIÓN DEL AJUSTE DE CONTROLADORES*

AUTORES: MERCHÁN DOMINGUEZ, SERGIO ANDRÉS
QUIROZ DE LA OSSA, JORGE MARIO **

PALABRAS CLAVE: Sintonización o ajuste de controladores, controlador PI, controlador PID Ideal, controlador PID Serie, controlador PID Clásico, identificación, Matlab.

DESCRIPCIÓN:

En el presente documento se expone el desarrollo de una interfaz gráfica implementada en MATLAB, la cual tiene como propósito el ajuste de diferentes tipos de controladores como son: PI, PID Ideal, PID Serie y PID Clásico. Además de la sintonización del controlador, el programa realiza una identificación del proceso mediante aproximaciones a modelos de primer o segundo orden más tiempo muerto, a través de pruebas de lazo abierto o lazo cerrado.

La herramienta realiza una habilitación de diferentes métodos de identificación y sintonización, dependiendo de si el comportamiento en el tiempo de la respuesta al escalón de la planta originalmente ingresada es sobre o subamotiguada.

Durante el proceso de identificación, el programa genera un espacio en el cual se pueden visualizar diferentes tipos de errores entre la planta identificada y la planta real, además se puede apreciar la respuesta en el tiempo de cada una de éstas.

Por otro lado, el programa muestra la respuesta transitoria en el tiempo ante una entrada de tipo escalón en el sistema de control, operando como regulador o como servomecanismo, al mismo tiempo se obtienen y son mostradas las principales características de estas respuestas, como son: sobrepaso, tiempo pico, tiempo de retardo, tiempo de subida, tiempo de asentamiento al dos y al cinco por ciento, error en estado estable, error máximo, tiempo al error máximo. Otros aspectos de posible visualización son: margen de fase, margen de ganancia y los índices de robustez en ganancia, tiempo muerto, combinado y absoluto.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Ingeniería Electrónica.
Director: Carlos Rodrigo Correa.

TITLE: COMPUTATIONAL TOOL FOR THE SIMULATION OF THE CONTROLLERS TUNING[♦]

AUTHORS: MERCHÁN DOMINGUEZ, SERGIO ANDRÉS QUIROZ DE LA OSSA, JORGE MARIO^{♦♦}

KEYWORDS: Controller tuning, PI controller, Ideal PID controller, Series PID controller, Classical PID controller

DESCRIPTION:

In the present document is exposed the development of a graphic interface implemented in MATLAB, which has as purpose the tuning of different types of controllers like they are: PI, Ideal PID, Series PID and Classical PID. Besides of the tuning controller, the program makes an identification of the process by means of approaches to models of first or second order more time delay, through tests of open loop or closed loop.

The tool makes a qualification of different identification methods and tuning rules, depending of if the behavior in the time of the answer to the step of the originally entered plant is overdamped or underdamped.

During the identification process, the program generates a space in which different types of errors can be visualized between the identified plant and the real plant, besides can be appreciate the answer in the time of each one of these.

On the other hand, the program shows the transitory answer in the time for an entrance of type step in the control system, operating as regulator or as servomechanism, at the same time are obtained and the main characteristics of these answers are shown, like they are: Overshoot, time pick, time of retard, time of ascent, time of establishment for two and five percent, error in stable state, maximum error, time to the maximum error. Other aspects of possible visualization are: phase margin, gain margin and the indexes of robustness in gain, time delay, mixed and absolute.

[♦] Trabajo de grado.

^{♦♦} Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Ingeniería Electrónica.
Director: Carlos Rodrigo Correa.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de cumplir con los requerimientos de calidad, de aumentar la eficiencia en el uso de la energía y de las materias primas, además de mantener unos estándares de seguridad para las máquinas y el recurso humano encargado de estas, ha conllevado a que en gran cantidad de procesos industriales se implemente un alto grado de automatización, en el que juega un papel indispensable el sistema de control de procesos, pues es éste el directamente encargado de mantener los niveles de presión, caudal, temperatura, y demás variables que requieran ser controladas en diferentes procesos.

Para lograr mantener la variable controlada en el punto deseado durante el proceso, es indispensable la correcta elección del controlador que se requiere utilizar. Para realizar una buena escogencia de éste, es necesario tener los conocimientos básicos acerca de los funcionamientos de los controladores, sus principales puntos a favor y sus desventajas; no obstante, para disponer de un correcto sistema de control de determinado proceso, es de vital importancia conocer el comportamiento dinámico y estático del mismo, que generalmente se obtiene de manera experimental en los procesos industriales.

Para cada sistema de control se debe realizar la escogencia del controlador dependiendo de sus necesidades; se sabe que en la actualidad los controladores PI y PID son los de mayor aplicación, aunque obedeciendo al proceso que se desee controlar es factible el uso de los demás tipos de controladores.

Una vez elegido el tipo de controlador se debe efectuar el ajuste de los parámetros del mismo, para que la respuesta del sistema en lazo cerrado tenga unas características determinadas. El ajuste de parámetros se convierte así en una

tarea indispensable en plantas industriales, pues es mediante esta sintonía que se logra mantener un comportamiento deseado en el proceso controlado, aún bajo efectos de perturbaciones. Al igual que en la identificación del proceso, el ajuste de controladores se realiza normalmente mediante métodos empíricos, los cuales están especialmente orientados al mundo industrial. ♦

En síntesis para obtener el correcto funcionamiento de un sistema de control es necesaria la correcta sintonización de los parámetros del controlador. Ésta se lleva a cabo mediante dos etapas:

1. La identificación de la planta a controlar: por medio de aproximaciones de la misma con modelos de primer o segundo orden más tiempo muerto.
2. El ajuste o escogencia de los parámetros del controlador: a partir del método que se desee utilizar teniendo en cuenta las necesidades que se vayan a satisfacer en el proceso.

Igualmente, se debe tener en cuenta la necesidad que tiene el curso “Sistemas de Control (Clásico y Digital)”, del plan de estudios en Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Industrial de Santander, de disponer de una herramienta didáctica de cómputo, que permita la identificación de procesos y el ajuste de controladores PI y PID utilizando los métodos mas comunes y actualizados. El presente trabajo de grado abordará los temas mencionados con miras a satisfacer estas expectativas.

Apelando a lo establecido se hizo necesario el planteamiento de los siguientes objetivos:

♦ DORMIDO BENCOMO, Sebastián y MORILLA GARCÍA, Fernando. Controladores PID, Fundamentos, sintonía y autosintonía. 2000. Departamento de informática y automática UNED, P 27.

Objetivo General

Desarrollar una herramienta didáctica con interfaz gráfica en SCILAB™ y/o MATLAB® que permita simular el ajuste de controladores utilizando los métodos mas comunes y actualizados en los procesos de control lineales y estables.

Objetivos Específicos

- Documentar los fundamentos teóricos acerca de las diferentes reglas de ajuste de controladores PI y PID, aplicadas en los procesos aproximados mediante modelos de primer y segundo orden con tiempo muerto: FOLDP (First Order Lag Plus Delay), SOLDP (Second Order Lag Plus Delay).
- Desarrollar un programa con interfaz gráfica en MATLAB® que permita introducir la función de transferencia de la planta calculando su correspondiente aproximación (FOLDP o SOLDP), seleccionar el controlador (PI o PID de varios tipos) mostrando los parámetros obtenidos del respectivo ajuste de los mismos, desplegar la curva de respuesta en el tiempo, entre otras.
- Implementar un manual del usuario para la utilización del programa.

Metodología

Para cumplir con los objetivos antes propuestos se hizo necesario implementar una metodología que permitió desarrollar con éxito el presente trabajo de grado, ésta consta de las siguientes etapas:

Revisión bibliográfica: Hace referencia a la búsqueda bibliográfica de todos los temas tratados en el presente proyecto de grado, como fueron: la fundamentación en identificación de procesos controlados, los métodos de ajuste de controladores

PI y PID y las herramientas de simulación para sistemas de control del software MATLAB®.

Selección de métodos: Correspondió a la escogencia de los métodos de identificación de procesos y de ajuste de controladores, esto se basó en un estudio de las diferentes técnicas que se encuentra en la literatura del control de procesos, éstas fueron usadas para implementar la herramienta gráfica de simulación.

Aprendizaje y adaptación a MATLAB®: Consistió en una etapa de aprendizaje, adaptación y práctica de las distintas herramientas que posee el software MATLAB® para la simulación de sistemas de control y el desarrollo de una interfaz gráfica.

Implementación de la herramienta: En esta etapa se desarrolló el diseño de la herramienta con interfaz gráfica en MATLAB®; fue puesta en marcha haciendo pruebas con diferentes plantas, varios métodos de identificación y ajustando los parámetros del controlador PI o PID escogido.

El presente trabajo comienza con la presentación del marco teórico, en donde se abordan temas como el control automático, la caracterización de modelos, el ajuste de controladores, la estabilidad y la robustez de un sistema de control, además de los fundamentos para el desarrollo de interfaces gráficas en MATLAB, todo esto se encuentra comprendido en el capítulo I. En el capítulo II, se plantea el desarrollo del programa, describiendo la forma como éste fue implementado. Pruebas y resultados de la herramienta hechas con dos diferentes modelos de plantas son mostradas en el capítulo III; se finaliza con las Conclusiones, Recomendaciones y Anexos.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 CONTROL AUTOMÁTICO [2], [6], [11], [12]

1.1.1 Introducción

Desde su origen el control automático ha venido desempeñando una función de vital importancia en el desarrollo significativo de nuevas aplicaciones en tecnología, como por ejemplo la importancia del control en la industria espacial, militar, avances en la robótica, entre otros. Además de las aplicaciones mencionadas, el control automático ha permitido un mejoramiento en el manejo de variables tratadas en las industrias de procesos tales como: el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad, etc. Este perfeccionamiento en los procesos ha conllevado a una mayor rentabilidad en las empresas, eficiencia y calidad en sus productos y un aumento en la seguridad para los recursos humanos y materiales de la misma.

Al igual que muchas tecnologías, el control sufrió un gran avance durante los conflictos bélicos mundiales en sus aplicaciones debido a la necesidad del posicionamiento rápido y preciso de masas, pilotos automáticos para aeronaves, sistemas de seguimiento para radar, etc. Alrededor de 1920, Minorsky desarrolló los primeros servomecanismos.

Debido al gran desarrollo industrial en las últimas décadas y a la aparición de procesos cada vez mas complejos, se crearon nuevas teorías de control, como las

encargadas del estudio de sistemas con múltiples entradas y salidas, contribuyendo así a la formación de la teoría moderna del control automático.

Gracias a la disponibilidad de las computadoras digitales, fue posible el análisis en el dominio del tiempo de estos sistemas; esto ha permitido enfrentar la creciente complejidad de las plantas modernas y los requerimientos limitativos como la precisión, el peso y el costo en aplicaciones militares, espaciales e industriales.♦

1.1.2 Definiciones Básicas

Variable controlada y variable manipulada: La *variable controlada* es la cantidad controlada. La *variable manipulada* es la cantidad que el controlador modifica para mantener el valor de la variable controlada en un punto deseado.

Plantas: Consiste en un conjunto de máquinas, herramientas, y demás partes que influyen en la ejecución de una acción.

Sistemas: Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado.

Perturbaciones: Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema.

1.1.3 Componentes de un Sistema de Control

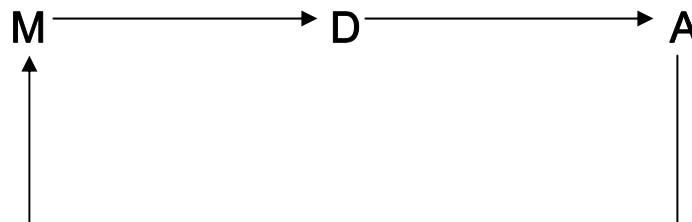
♦ OGATA Katsuhiko. INGENIERIA DE CONTROL MODERNA, Cuarta edición, Prentice Hall, 2003, P 1,2.

Los cuatro componentes básicos de todo sistema de control son:

1. Sensor.
2. Transmisor.
3. Controlador.
4. Elemento final de control.

La importancia de estos elementos radica en que realizan las operaciones básicas que están presentes en todo sistema de control; estas son: *Medición* (realizada entre sensor y transmisor), *Decisión* (tomada por el controlador) y *Acción* (desarrollada por el elemento final de control).

Figura 1. Operaciones básicas de un lazo de control.



1.1.4 Sistemas de control en lazo abierto

En esta clase de sistema de control no se realizan comparaciones entre las señales de salida y entrada, por lo tanto la acción del controlador no se ve afectada por variaciones que pueda presentar el sistema debido a perturbaciones.

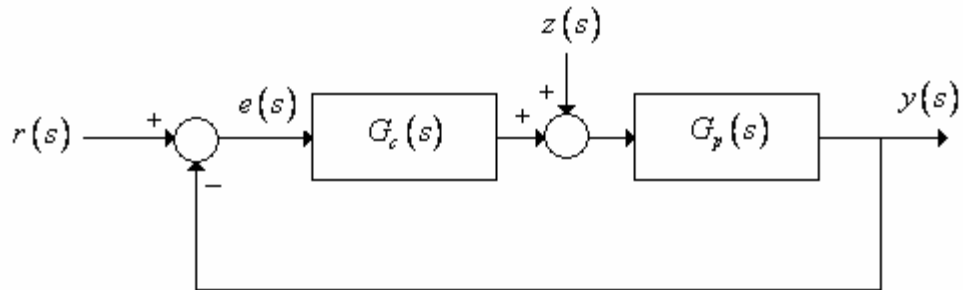
1.1.5 Sistemas de control en lazo cerrado o realimentado

En un sistema de control en lazo cerrado se realiza la diferencia entre las señales de salida y entrada del sistema; esta diferencia es con la cual se alimenta el controlador lo que quiere decir que éste está funcionando según la señal de error existente entre estas dos señales. La principal virtud que ofrece el empleo de los

sistemas de control en lazo cerrado es la compensación sobre el efecto de las perturbaciones.

Un esquema en el que se puede apreciar el lazo de realimentación y el efecto de una variable de perturbación es el mostrado en la figura 2.

Figura 2. Lazo de control realimentado



Fuente: Autores

Aplicando las respectivas manipulaciones algebraicas sobre el diagrama de bloques podemos obtener la función de transferencia del sistema debido a las dos posibles entradas del mismo, ellas son: el valor deseado $r(s)$ y la perturbación $z(s)$.

$$y(s) = \frac{G_C(s)G_P(s)}{1 + G_C(s)G_P(s)} r(s) + \frac{G_P(s)}{1 + G_C(s)G_P(s)} z(s) \quad (1.1.5-1)$$

Existen dos formas de operación del sistema de control, la primera es como servomecanismo, en la cual se requiere un buen seguimiento del valor deseado, es decir, la principal perturbación del sistema es el mismo valor deseado; y la otra manera de operar es como regulador, en donde lo importante es minimizar el efecto de las perturbaciones sobre el sistema.

- *Servomecanismo* ($z = 0$):

$$y(s) = \frac{G_C(s)G_P(s)}{1 + G_C(s)G_P(s)} r(s) \quad (1.1.5-2)$$

- *Regulador* ($r = 0$):

$$y(s) = \frac{G_P(s)}{1 + G_C(s)G_P(s)} z(s) \quad (1.1.5-3)$$

1.1.6 Tipos de Controladores

1.1.6.1 Controlador P

El controlador proporcional es en esencia, un amplificador con una ganancia ajustable, la mayor desventaja de este tipo de control es su error (offset) en estado estable, éste es eliminado mediante la inclusión de un integrador en el controlador.

La función de transferencia del controlador P es:

$$G_C(s) = K_C \diamond \quad (1.1.6-1)$$

1.1.6.2 Controlador PD

El control proporcional derivativo es considerado un controlador predictivo, puesto que mide la velocidad instantánea del error, en otras palabras, debido a la parte derivativa el controlador analiza la pendiente de la señal de error permitiéndole así tener un conocimiento “anticipado” sobre el comportamiento del mismo, realizando entonces una adecuada respuesta para evitar que el error sea demasiado grande; sin embargo, al igual que el controlador proporcional, el controlador PD no elimina el error en estado estable. La función de transferencia de este modo de control es:

$$G_C(s) = K_C (1 + T_d s) \quad (1.1.6-2)$$

♦ El significado de cada una de las variables usadas en ésta y las demás ecuaciones del presente proyecto, se encuentran en la Nomenclatura.

1.1.6.3 Controlador PI

La principal ventaja de este controlador radica en la inclusión de la parte integral, pues es ésta la encargada de la eliminación del error en estado estable, su función de transferencia es:

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1.1.6-3)$$

1.1.6.4 Controlador PID

Como lo indica su nombre el controlador tipo PID es originado de la combinación de las acciones de los controladores, proporcional, integral y derivativo, aprovechando así las ventajas que cada uno tiene.

Es importante mencionar que no existe una única ecuación para representar todos los controladores PID existentes. La función de transferencia de un PID ideal es:

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1.1.6-4)$$

Algunas de las funciones de transferencia de controladores PID que se encuentran habitualmente y que utilizan los autores para el ajuste de sus métodos son:

- *Controlador PID Ideal*

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1.1.6-5)$$

- *Controlador PID Serie*

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) (1 + T_d s) \quad (1.1.6-6)$$

- *Controlador PID Clásico*

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \left(\frac{1 + sT_d}{1 + \frac{sT_d}{N}} \right) \quad (1.1.6-7)$$

1.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS PARA LOS PROCESOS CONTROLADOS [1], [4], [8], [12]

Como se ha tratado de dar a entender, las dos principales etapas para el diseño de un correcto sistema de control son: la identificación del proceso y la sintonización del controlador; sin embargo, para poder aplicar las reglas de ajustes de controladores *PI* y *PID* es necesario realizar primero la identificación de la dinámica del proceso controlado, para así obtener los parámetros del controlador (K_c , T_i , T_d). En este numeral se abordará el tema de la caracterización de los procesos.

Las técnicas de caracterización dinámica, normalmente utilizadas para la identificación de los procesos y aproximación mediante modelos de primer o segundo orden más tiempo muerto, se pueden clasificar como:

1. Métodos basados en la curva de reacción del proceso (respuesta al escalón).
2. Métodos basados en la información última.
3. Métodos de control P.

Los métodos basados en la curva de reacción del proceso, son métodos de lazo abierto donde el controlador puede o no estar instalado, en el caso en el que lo esté, deberá operar en modo manual durante la prueba; los demás métodos de identificación son de lazo cerrado.

1.2.1 Modelos

Normalmente, los métodos basados en la curva de reacción permiten la aproximación del proceso mediante modelos de primer o segundo orden más tiempo muerto, mientras que los métodos de oscilación mantenida, obtienen los valores de ganancia y período último, estos valores pueden ser utilizados directamente en un método de sintonización o para la identificación de un modelo para el sistema. Los métodos de control P aproximan al proceso mediante un modelo de primer orden más tiempo muerto.

Los modelos utilizados mas comúnmente para la identificación de los procesos son:

- Primer orden

$$G_p(s) = \frac{K_p}{\tau^* s + 1} \quad (1.2-1)$$

- Primer orden más tiempo muerto

$$G_p(s) = \frac{K_p * e^{-t_m s}}{\tau^* s + 1} \quad (1.2-2)$$

- Polo doble más tiempo muerto

$$G_p(s) = \frac{K_p * e^{-t_m s}}{(\tau^* s + 1)^2} \quad (1.2-3)$$

- Segundo orden sobreamortiguado

$$G_p(s) = \frac{K_p}{(\tau_1^* s + 1)(\tau_2^* s + 1)} \quad (1.2-4)$$

- Segundo orden subamortiguado

$$G_p(s) = \frac{\omega_n^2 K_p}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{K_p}{\tau_n^2 s^2 + 2\zeta\tau_n s + 1} \quad (1.2-5)$$

- Segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto

$$G_p(s) = \frac{K_p * e^{-t_m s}}{(\tau_1 * s + 1)(\tau_2 * s + 1)} \quad (1.2-6)$$

- Segundo orden subamortiguado más tiempo muerto

$$G_p(s) = \frac{\omega_n^2 K_p * e^{-t_m s}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{K_p * e^{-t_m s}}{\tau_n^2 s^2 + 2\zeta\tau_n s + 1} \quad (1.2-7)$$

Durante el desarrollo del presente trabajo de grado se le dará prioridad a los sistemas aproximados mediante un modelo de primer y segundo orden más tiempo muerto. Esto debido a que los procesos pueden ser modelados correctamente mediante estas aproximaciones.

1.2.2 Métodos que emplean la curva de reacción

Algunos de los métodos que utilizan la respuesta del sistema a una entrada escalón para la identificación del proceso son:

- Para sistemas de segundo orden o mayor sobreamortiguados:
 1. Métodos de la tangente.
 2. Métodos de dos puntos.
 3. Métodos de tres puntos.

- Para sistemas subamortiguados:
 - ✓ Obtención de los parámetros mediante una observación directa de la curva de reacción del proceso de un sistema de segundo orden.

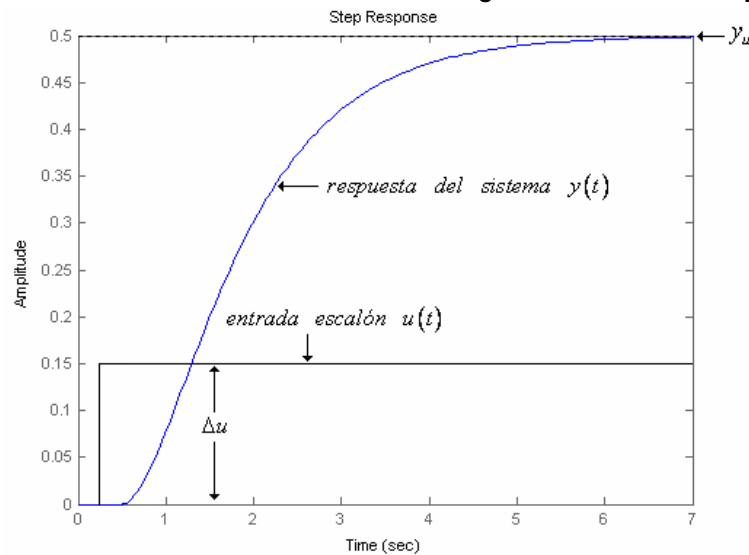
El procedimiento de la prueba de escalón se lleva a cabo mediante los siguientes pasos:

1. Colocar el circuito del sistema de control en lazo abierto, o lo que es equivalente el controlador funcionando en forma manual, para un sistema como el mostrado en la figura 2 (con realimentación unitaria).
2. Con el sistema en las condiciones indicadas en el primer paso, se aplica un cambio escalón en la salida del controlador (entrada a la planta) registrando esta señal y la de la salida del proceso desde el mismo instante en que se aplicó el escalón de entrada, hasta que el sistema alcance un nuevo punto de operación estable.

1.2.2.1 Identificación de sistemas sobreamortiguados de segundo orden o mayor

Los sistemas de segundo orden o mayor pueden ser aproximados mediante un modelo de primero orden más tiempo muerto (1.2-2); la gran mayoría de los procesos son identificados mediante esta forma, pero algunos pocos necesitan ser modelados por un sistema de segundo orden más tiempo muerto (1.2-6). La obtención de los parámetros para la identificación de estos sistemas, se hace mediante la curva de reacción, ésta presenta un comportamiento característico en forma de S.

Figura 3. Curva de reacción de un sistema de segundo orden mas tiempo muerto



Fuente: Autores.

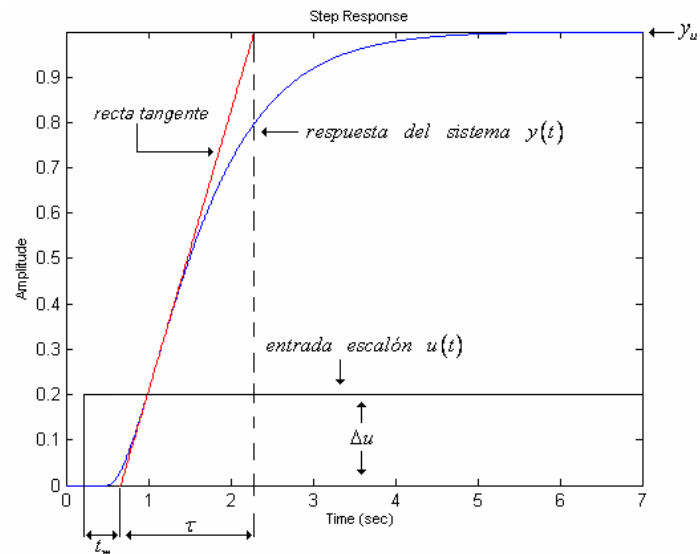
1.2.2.1.1 Métodos que emplean la recta tangente

- **Método de la tangente de Ziegler y Nichols**

El método de la tangente permite aproximar la respuesta a un escalón de un proceso, mediante un modelo de primer orden más tiempo muerto (1.2-2), para la completa identificación de este modelo es necesario obtener la ganancia k_p , la constante de tiempo τ y el tiempo muerto t_m . Este método requiere que se trace una recta tangente a la curva de reacción del proceso en su punto de inflexión o máxima pendiente, el valor de la ganancia está determinada mediante la relación entre el cambio total de la salida y el cambio en la entrada: $K_p = y_u / \Delta u$, el tiempo entre el instante en el que fue aplicada la entrada escalón y el punto en que la tangente corta el eje del tiempo es el tiempo muerto t_m , en cuanto al valor de la constante de tiempo, se obtiene como el intervalo de tiempo a partir del instante en que la tangente corta el eje del tiempo y el instante en que corta el valor final de la salida, debido a la manera como se obtiene la constante de tiempo, ésta será

mayor que la del sistema real, haciendo que el modelo tenga una respuesta mas lenta que la del sistema original.

Figura 4. Método de la tangente para sistemas de segundo orden o mayor



Fuente: Autores.

- **Método de la tangente, modificado de Murrill**

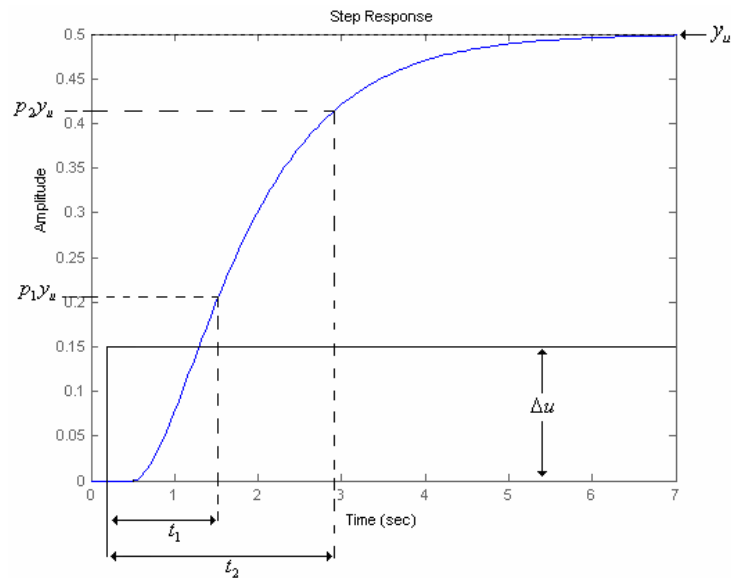
Al igual que en el método de la tangente de Ziegler y Nichols, este método se fundamenta en el trazo de una tangente en el punto de inflexión, los valores de la ganancia y el tiempo muerto se obtienen de la misma forma como la expuesta en el método de Ziegler y Nichols, la principal diferencia entre estos dos métodos radica en la obtención de la constante de tiempo. Murrill propuso que la constante de tiempo sea igual al tiempo requerido para que la respuesta alcance el 63.2% del cambio total a partir del tiempo muerto, esta forma de obtención de la constante de tiempo asegura que la respuesta del modelo y la del sistema real coincidan en al menos un punto.

1.2.2.1.2 Métodos que emplean dos puntos de la curva de reacción

Los métodos que requieren del trazo de la recta tangente no siempre son fáciles de realizar, debido a que algunos procesos pueden contener ruido y la obtención

del punto de máxima pendiente no será tan fácil de obtener; esto puede llevar a que la recta tangente trazada no sea la ideal, lo que afecta tanto el valor del tiempo muerto como el de la constante de tiempo del modelo.

Figura 5. Método de dos puntos



Fuente: Autores.

➤ Modelo de la planta primer orden más tiempo muerto

Los siguientes métodos de identificación realizan una aproximación del proceso a un modelo de primer orden más tiempo muerto, mediante la utilización de dos puntos de la curva de reacción escogidos por el autor de cada método.

• Método de Smith

Este fue el primer método propuesto en el que no se requiere el trazo de la recta tangente, y consiste en calcular los valores de tiempo muerto y constante de tiempo mediante dos puntos concretos sobre la curva de reacción, como lo muestra la figura 5.

La respuesta de un sistema de primer orden más tiempo muerto a una entrada escalón es:

$$y(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } 0 \leq t < t_m \\ K_p \left[1 - e^{-(t-t_m)/\tau} \right] \Delta u & \end{cases} \quad (1.2.2-1)$$

De donde el valor final es $y_u = K_p \Delta u$; a partir de este valor se obtiene el correspondiente valor de la ganancia, en cuanto a los valores del tiempo muerto y la constante de tiempo, se utiliza la siguiente expresión:

$$t_x = t_m - \tau \ln(1-x) \quad (1.2.2-2)$$

La cual permite encontrar el tiempo requerido para que la respuesta alcance una fracción de su valor final, donde x es el valor fraccional deseado de la respuesta. Seleccionando dos puntos cualesquiera sobre la curva de reacción se puede establecer un sistema de ecuaciones de dos incógnitas y dos ecuaciones, del cual se obtienen los valores de tiempo muerto y constante de tiempo, garantizando así que la respuesta del modelo coincida en al menos dos puntos con la respuesta del sistema real. Smith propuso tomar los tiempos para los cuales la respuesta del sistema alcance el 28.3% (t_{28}) y el 63.2% (t_{63}) del valor final.

- **Método “1/4-3/4” de Alfaro.**

Alfaro en el año de 1999 propone hacer coincidir la respuesta del modelo con la del sistema en los instantes correspondientes al 25% y al 75% del cambio en la salida.

Otros métodos de dos puntos encontrados en la literatura incluyen el método de:

- ✓ Bröida
- ✓ Chen y Yang (2000)
- ✓ Ho, Hang y Cao (1995)
- ✓ Vitecková, Vitecek y Smitny (2000)

El cálculo de la ganancia del modelo se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$K_p = y_u / \Delta u \quad (1.2.2-3)$$

En cuanto al cálculo del tiempo muerto y la constante de tiempo, se pueden formular ecuaciones generales estableciendo dos puntos porcentuales según el criterio del método, y utilizando la ecuación (1.2.2-2) con la cual se calcula los tiempos (t_1 y t_2) requeridos para alcanzar los puntos, las fórmulas obtenidas son las siguientes:

$$\tau = a(t_2 - t_1) \quad (1.2.2-4)$$

$$t_m = bt_1 + (1-b)t_2 \quad (1.2.2-5)$$

Donde los valores de a y b están dados dependiendo de los puntos porcentuales establecidos en cada método. En la tabla 1, se muestra un resumen de los diferentes métodos de dos puntos nombrados anteriormente.

Tabla 1. Constantes para la identificación de los modelos de 1er orden más tiempo muerto

Método	% $p_1(t_1)$	% $p_2(t_2)$	a	b
Alfaro ($\frac{1}{4} - \frac{3}{4}$)	25	75	0.91	1.262
Bröida	28	40	0.55	2.8
Ho et al.	35	85	0.67	1.29
Chen y Yang	33	67	0.14	1.54
Smith	28	63	0.15	1.5
Vitecková	33	70	1.245	1.498

➤ **Modelo de la planta polo doble más tiempo muerto**

La utilización de dos puntos de la curva de reacción no sólo son usados para obtener un modelo de primer orden más tiempo muerto, éstos también son utilizados para la identificación del proceso mediante un modelo de polo doble más

tiempo muerto, debido a que este modelo posee los mismos parámetros que el de primer orden.

La respuesta de un modelo de polo doble más tiempo muerto dada por la ecuación (1.2-3) ante una entrada de tipo escalón es de la forma:

$$y(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } 0 < t < t_m \\ K_p \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{t-t_m}{\tau} \right) e^{-(t-t_m)/\tau} \right] \right\} \Delta u & \text{para } t \geq t_m \end{cases} \quad (1.2.2-6)$$

Al igual que en el caso de la identificación mediante un modelo de primer orden más tiempo muerto, en el caso de polo doble, también se escogen dos puntos porcentuales de la respuesta del sistema a un cambio escalón en la entrada, determinando los tiempos requeridos para que la respuesta alcance estos valores. Los parámetros del modelo se obtienen mediante las ecuaciones (1.2.2-3) para la ganancia, (1.2.2-4) para la constante de tiempo y (1.2.2-5) para el tiempo muerto, pero con las siguientes constantes dadas por los autores de los diferentes métodos.

Tabla 2. Constantes para la identificación de los modelos de polo doble más tiempo muerto

Método	% $p_1(t_1)$	% $p_2(t_2)$	a	b
Alfaro (¼ – ¾)	25	75	0.578	1.555
Ho et. al.	35	85	0.463	1.574
Vitecková	33	70	0.794	1.937

1.2.2.1.3 Método que emplea tres puntos de la curva de reacción

Al igual que los métodos de dos puntos, el método de tres puntos no necesita del trazo de la recta tangente a la curva de reacción del proceso, para la identificación del mismo.

➤ **Modelo de la planta de segundo orden más tiempo muerto**

- **Método de Stark (Sobreamortiguado)**

Para llevar a cabo la identificación del proceso mediante un modelo de segundo orden más tiempo muerto sobreamortiguado dado por la fórmula (1.2-6), se requiere identificar además de la ganancia y del tiempo muerto dos constantes de tiempo adicionales. Para poder obtener estos parámetros Stark propone la utilización de tres puntos correspondientes a los tiempos requeridos por el sistema para alcanzar el 15% (t_{15}), el 45% (t_{45}), y el 75% (t_{75}) del valor de la respuesta final del sistema a un cambio de tipo escalón en la señal de entrada.

La obtención de los parámetros del modelo se realiza mediante las siguientes expresiones:

$$x = \frac{t_{45} - t_{15}}{t_{75} - t_{15}} \quad (1.2.2-7)$$

$$\zeta = \frac{0.0805 - 5.547(0.475 - x)^2}{x - 0.356} \quad (1.2.2-8)$$

$$f_2(\zeta) = 2.6 * \zeta - 0.60 \quad \text{para } \zeta > 1 \quad (1.2.2-9)$$

$$\omega_n = \frac{f_2(\zeta)}{t_{75} - t_{15}} \quad (1.2.2-10)$$

$$f_3(\zeta) = 0.922(1.66)^\zeta \quad (1.2.2-11)$$

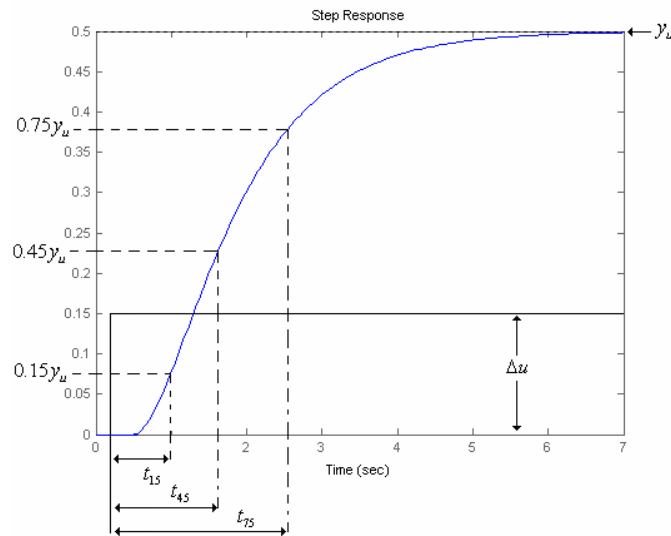
$$t_m = t_{45} - \frac{f_3(\zeta)}{\omega_n} \quad (1.2.2-12)$$

$$\tau_1 = \frac{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}{\omega_n} \quad \text{para } \zeta > 1 \quad (1.2.2-13)$$

$$\tau_2 = \frac{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}{\omega_n} \quad \text{para } \zeta > 1 \quad (1.2.2-14)$$

La ganancia del modelo es obtenida de la misma forma que en los anteriores métodos de identificación, es decir, empleando la expresión definida en la ecuación (1.2-3).

Figura 6. Método de tres puntos



Fuente: Autores.

1.2.2.2 Identificación de sistemas subamortiguados de segundo orden o mayor

Cuando la respuesta del sistema a un cambio de tipo escalón en la señal de entrada, posee un comportamiento subamortiguado, no es correcta la utilización de los modelos de primer orden o segundo orden con polos reales para llevar a cabo una identificación del proceso; por el contrario, es necesario la utilización de un modelo de identificación que incluya polos complejos conjugados como los dados por las ecuaciones: (1.2-5) para el caso de sistemas segundo orden y la (1.2-7) para representar sistemas de orden superior a dos.

1.2.2.2.1 Método que emplea tres puntos de la curva de reacción

- **Método de Stark**

El método de Stark no sólo permite identificar un proceso mediante el modelo de segundo orden más tiempo muerto sobreamortiguado, sino que también facilita la identificación de plantas cuya respuesta en el tiempo a cambios de tipo escalón en la señal de entrada sean dominadas por comportamientos subamortiguados.

El modelo identificado a partir de este método es de segundo orden más tiempo muerto como el mostrado en la expresión (1.2-7).

Los puntos porcentuales (tres puntos) definidos en la identificación de sistemas sobreamortiguados, son igualmente utilizados en la identificación de plantas subamortiguadas.

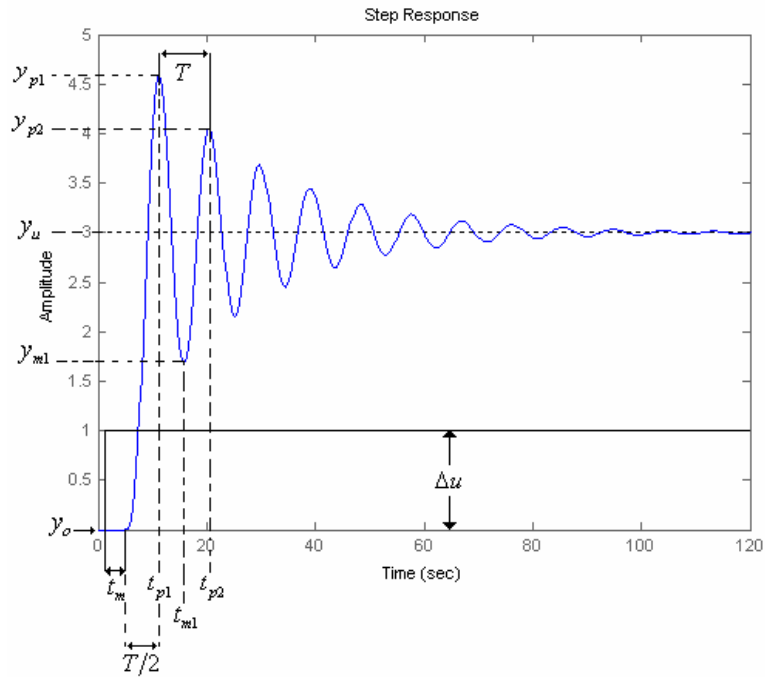
Para realizar la identificación de sistemas subamortiguados mediante el método de Stark, es necesario la obtención de las variables definidas en las ecuaciones (1.2-3), (1.2.2-7), (1.2.2-8) y las siguientes:

$$\begin{aligned}f_2(\zeta) &= 0.708(2.811)^\zeta \quad \text{para } \zeta < 1 & (1.2.2-15) \\f_3(\zeta) &= 0.922(1.66)^\zeta \\ \omega_n &= \frac{f_2(\zeta)}{t_{75} - t_{15}} \\ t_m &= t_{45} - \frac{f_3(\zeta)}{\omega_n}\end{aligned}$$

1.2.2.2.2 Método de identificación con base en el sobrepaso máximo.

Este método fue presentado por Coughanour y Koppel (1965) y por Kuo (1982), el cual permite identificar sistemas subamortiguados de orden superior o igual a dos.

Figura 7. Método de Identificación de sistemas subamortiguados



Fuente: Autores.

Los datos de la curva de reacción del proceso que el método requiere, para llevar a cabo la identificación, son: el valor y el tiempo al primer pico (y_{p1}, t_{p1}), el valor y el tiempo al primer mínimo (y_{m1}, t_{m1}), y el valor final de la respuesta y_u , mediante el reemplazo de estos datos en las siguientes expresiones se obtienen los parámetros del modelo representado por la fórmula (1.2-7):

$$K_p = (y_u - y_o) / \Delta u \quad (1.2.2-16)$$

$$\delta = \frac{y_{p1} - y_u}{y_u - y_o} \quad (1.2.2-17)$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{\ln^2 \delta}{\pi^2 + \ln^2 \delta}} \quad (1.2.2-18)$$

$$T = 2(t_{m1} - t_{p1}) \quad (1.2.2-19)$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (1.2.2-20)$$

$$t_m = t_{p1} - \frac{T}{2} \quad (1.2.2-21)$$

1.2.2.2.3 Método de identificación con base en el decaimiento.

La identificación de un sistema subamortiguado también se puede realizar con un método basado en el decaimiento de la respuesta. Los datos de la curva de reacción del proceso que el método necesita para llevar a cabo la identificación son: el valor y el tiempo al primer pico (y_{p1}, t_{p1}), el valor y el tiempo al primer mínimo (y_{m1}, t_{m1}), el valor y el tiempo al segundo pico (y_{p2}, t_{p2}), y el valor final de la respuesta y_u , mediante el reemplazo de estos datos en las siguientes expresiones se obtienen los parámetros del modelo representado por la fórmula (1.2-7):

$$\phi = \frac{y_{p2} - y_u}{y_{p1} - y_u} \quad (1.2.2-22)$$

$$\phi = \zeta\omega_n = \frac{-\ln \phi}{T} \quad (1.2.2-23)$$

El valor de T se obtiene de la expresión (1.2.2-19)

$$\omega_n = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 + \phi^2} \quad (1.2.2-24)$$

$$\zeta = \phi/\omega_n \quad (1.2.2-25)$$

El coeficiente de amortiguamiento también se puede calcular como:

$$\zeta = \sqrt{\frac{\ln^2 \phi}{4\pi^2 + \ln^2 \phi}} \quad (1.2.2-26)$$

El tiempo muerto para este método de identificación se obtiene de la misma forma que el del método de sobrepaso máximo, determinado por la ecuación (1.2.2-21).

1.2.3 Métodos basados en la información última para sistemas sobreamortiguados

Para la identificación de plantas mediante métodos basados en la información última, es necesario hallar los valores de ganancia última y período de oscilación último. Esta información corresponde a la ganancia del controlador proporcional que lleva el sistema de control al límite de su estabilidad -oscilación mantenida- y al período de la oscilación del sistema.

Los valores de los parámetros últimos K_u , T_u pueden ser utilizados directamente en un método de ajuste de controladores o para estimar los parámetros de un modelo de la planta que es lo que se va a tratar a continuación.

➤ Método de Chen

Para la utilización de este método de identificación es necesario desarrollar una prueba de lazo cerrado en el sistema, utilizando un controlador proporcional cuyo valor de ganancia puede ser elegido arbitrariamente siempre y cuando el sistema no se haga inestable debido a éste, la ganancia del modelo de identificación está dada por:

$$K_p = \frac{\Delta y}{k_c (\Delta u - \Delta y)} \quad (1.2.3-1)$$

Donde Δy es el cambio del valor en estado estable que presenta la respuesta del sistema a una entrada tipo escalón, Δu es el cambio en el escalón de entrada y k_c es la ganancia escogida del controlador para la prueba de lazo cerrado. El método de Chen aproxima el proceso mediante un modelo de primer orden más tiempo

muerto dado por (1.2-2). La ecuación característica del sistema de control utilizando un controlador proporcional junto al modelo de identificación es:

$$1 + \frac{k_c K_p e^{-t_m s}}{1 + \tau s} = 0 \quad (1.2.3-2)$$

En la anterior fórmula se reemplazan los valores del límite de la estabilidad, que son: $k_c = K_u$, $s = j\omega_u$ y $T_u = 2\pi/\omega_u$, lo que permite obtener las ecuaciones necesarias para identificar los parámetros del modelo de primer orden más tiempo muerto. Estas expresiones son:

$$\tau = \frac{T_u}{2\pi} \sqrt{K_u^2 K_p^2 - 1} \quad (1.2.3-3)$$

$$t_m = \frac{T_u}{2\pi} \left[\pi - \tan^{-1} \left(\frac{2\pi\tau}{T_u} \right) \right] \quad (1.2.3-4)$$

➤ Método de Ho

A diferencia del método de Chen, Ho identifica el proceso mediante un modelo de polo doble más tiempo muerto, debido a esto la ecuación característica del sistema está determinada ahora por:

$$1 + \frac{k_c K_p e^{-t_m s}}{(1 + \tau s)^2} = 0 \quad (1.2.3-5)$$

Siguiendo un procedimiento similar al usado en el método de Chen, para las condiciones del límite de estabilidad, se pueden deducir las siguientes ecuaciones para la identificación de los parámetros de segundo orden:

$$\tau = \frac{T_u}{2\pi} \sqrt{K_u K_p - 1} \quad (1.2.3-6)$$

$$t_m = \frac{T_u}{2\pi} \left[\pi - 2 \tan^{-1} \left(\frac{2\pi\tau}{T_u} \right) \right] \quad (1.2.3-7)$$

La ganancia del modelo de identificación se obtiene de igual forma que en el caso del método de Chen.

1.2.4 Métodos de control P

Los métodos basados en la información última presentan el inconveniente de tener que llevar el sistema al límite de la estabilidad, por lo que pueden presentar una operación inestable en presencia de perturbaciones externas.

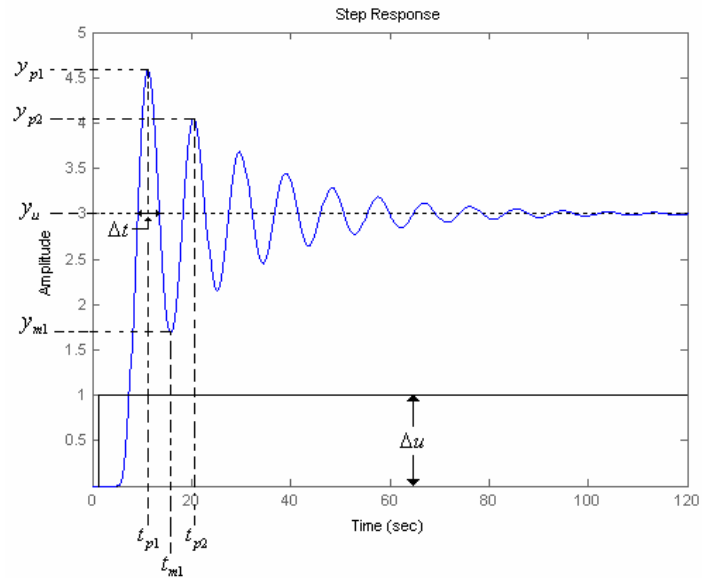
Los métodos de control P se desarrollaron con el objetivo de tener que realizar sólo una prueba de lazo cerrado, éstos identifican un modelo para el proceso a partir de la respuesta del sistema ante un cambio en el valor deseado, cuando éste es controlado por un controlador proporcional: $G_c(s) = K_c$, sin necesidad de llevar al sistema al límite de la estabilidad.

1.2.4.1 Método de Yuwana y Seborg

Para la aplicación de este método se requiere que la respuesta del sistema ante una entrada de tipo escalón presente un comportamiento subamortiguado. Ésta se modela como la respuesta de un sistema de segundo orden más tiempo muerto, y se identifica para el proceso un modelo de primer orden más tiempo muerto.

La utilización del método obliga a obtener los siguientes valores de la respuesta del sistema: y_{p1} , y_{p2} , y_{m1} , y_u y Δt , que corresponden a los valores del primer y segundo pico de la respuesta, el primer mínimo, el valor final y el semiperiodo, respectivamente, como se puede apreciar en la figura 8.

Figura 8. Métodos de control P



Fuente: Autores.

Para la aproximación del tiempo muerto del modelo de SOLPTD (second order lag plus time delay) que representa la respuesta del sistema de lazo cerrado, Yuwana y Seborg utilizaron la aproximación de Padé de primer orden que está dada por:

$$e^{-t_m s} = \frac{1 - 0.5 t_m s}{1 + 0.5 t_m s} \quad (1.2.4-1)$$

La ganancia del modelo se identifica utilizando la ecuación (1.2.3-1), la constante de tiempo y el tiempo muerto usando las siguientes expresiones:

$$K = K_c K_p \quad (1.2.4-2)$$

$$\tau = \frac{\Delta t}{\pi} \left[\zeta \sqrt{K+1} + \sqrt{\zeta^2 (K+1) + K} \right] \sqrt{(1-\zeta^2)(K+1)} \quad (1.2.4-3)$$

$$t_m = \frac{2\Delta t \sqrt{(1-\zeta^2)(K+1)}}{\pi \left[\zeta \sqrt{K+1} + \sqrt{\zeta^2 (K+1) + K} \right]} \quad (1.2.4-4)$$

Donde

$$\zeta = (\zeta_1 + \zeta_2)/2$$

$$\zeta_1 = \frac{-\ln\left[\frac{(y_u - y_{m1})}{(y_{p1} - y_u)}\right]}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left[\frac{(y_u - y_{m1})}{(y_{p1} - y_u)}\right]}} \quad (1.2.4-5)$$

$$\zeta_2 = \frac{-\ln\left[\frac{(y_{p2} - y_u)}{(y_{p1} - y_u)}\right]}{\sqrt{4\pi^2 + \ln^2\left[\frac{(y_{p2} - y_u)}{(y_{p1} - y_u)}\right]}} \quad (1.2.4-6)$$

1.2.4.2 Método de Jutan y Rodríguez

A diferencia de Yuwana y Seborg que utilizaron una aproximación de Padé de primer orden para representar el tiempo muerto, Jutan y Rodríguez usaron la siguiente aproximación:

$$e^{-t_m s} = \frac{1 + \gamma_1 t_m s + \gamma_2 t_m^2 s^2}{1 + \delta t_m s} \quad (1.2.4-7)$$

Con $\gamma_1 = -0.61453$, $\gamma_2 = 0.1247$ y $\delta = 0.3866$

La ganancia del modelo se obtiene de la misma forma que lo hace Yuwana y Seborg, a través de la ecuación (1.2.3-1), y los demás parámetros son hallados utilizando las siguientes expresiones:

$$\tau = \frac{-b \pm (b^2 - 4ac)^{1/2}}{2a} \quad (1.2.4-8)$$

$$t_m = \alpha + \beta\tau \quad (1.2.4-9)$$

Donde:

$$a = \beta^2 \gamma_2 K + \beta \delta \quad (1.2.4-10)$$

$$b = 2\gamma_2 K \alpha \beta + \alpha \delta \quad (1.2.4-11)$$

$$c = \gamma_2 K \alpha^2 - \tau^2 (1 + K) \quad (1.2.4-12)$$

$$\alpha = \frac{2\zeta'\tau'(1+K)}{\delta + \gamma_1 K} \quad (1.2.4-13)$$

$$\beta = -(\delta + \gamma_1 K)^{-1} \quad (1.2.4-14)$$

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u - \Delta y} \quad (1.2.4-15)$$

$$\alpha_1 = \frac{y_u - y_{m1}}{y_{p1} - y_u} \quad (1.2.4-16)$$

$$\zeta' = \frac{-\ln \alpha_1}{[\pi^2 + \ln^2 \alpha_1]^{1/2}} \quad (1.2.4-17)$$

$$\tau' = \frac{\Delta t}{\pi} \sqrt{1 - \zeta'^2} \quad (1.2.4-18)$$

1.3 MÉTODOS DE AJUSTE DE CONTROLADORES PI Y PID [2], [3], [8], [10], [11], [12]

Luego de haberse identificado y aproximado la dinámica del proceso por medio de los modelos mencionados en las secciones previas, se debe proceder a hacer el *ajuste de los parámetros* de los controladores como etapa final en la puesta a punto de un lazo de control.

El ajuste de controladores es el procedimiento mediante el cual se determinan los parámetros (K_c, T_i, T_d) de los mismos, a fin de conseguir un desempeño deseado en el sistema de control.

Se debe tener en cuenta que un sólo método de ajuste no siempre se adapta a todos los sistemas a controlar, además los parámetros hallados en primera

instancia son un punto de partida para obtener una sintonía fina de lo que necesita realmente el sistema de control.

Es necesario para el ajuste de controladores, tener inicialmente una caracterización definida del comportamiento del proceso (como se expuso en secciones anteriores), para luego a partir de ésta, determinar los parámetros del controlador usando el método de sintonización que se desee.

Algunos de los métodos de ajuste empíricos más usados comúnmente en la literatura de los procesos industriales, se pueden clasificar conforme a la información requerida para su uso o al criterio de desempeño utilizado como:

1. Con base en la curva de reacción del proceso (lazo abierto).
2. Mínimo índice de desempeño: ajuste regulador.
3. Mínimo índice de desempeño: ajuste servomecanismo.
4. Síntesis Directa.
5. Reglas de ajuste robustas.
6. Con base en el ciclo último.

Para los anteriores métodos es necesario saber, aparte de las ecuaciones requeridas para determinar los parámetros de los controladores PI y PID, si estos fueron definidos para un funcionamiento del controlador como servomecanismo o regulador, cuál fue el procedimiento desarrollado por los autores para la obtención del modelo del proceso si este es requerido, y qué función de transferencia del controlador (PI o PID) fue usada.

Las fórmulas de los métodos de ajuste que se presentan a continuación fueron tomadas del libro Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules.

1.3.1 MÉTODOS BASADOS EN LA CURVA DE REACCIÓN DEL PROCESO

Los métodos que se basan en la curva de reacción del proceso son métodos en los que las pruebas se hacen en lazo abierto y utilizan la información (la ganancia K_p , la constante de tiempo τ y el tiempo muerto del sistema t_m) brindada por la misma, para obtener los parámetros de los controladores (PI o PID). Esta curva comúnmente es aproximada mediante un modelo de primer orden más tiempo muerto como el dado por la ecuación (1.2-2).

1.3.1.1 Método de Ziegler y Nichols

Ziegler y Nichols fueron los primeros en desarrollar un procedimiento para el ajuste de controladores PI y PID en el año 1942, y las ecuaciones desarrolladas las dedujeron en forma empírica en laboratorios con diferentes procesos.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *método de la tangente*.
- Funcionamiento del controlador: *regulador*.
- Criterio de desempeño: *decaimiento de un cuarto*.
- Controlador: *PI o PID Ideal*.
- Validez: $t_m < \tau$.

Ecuaciones:

- Controlador PI

$$K_c = 0.9 \frac{\tau}{K_p t_m} \quad (1.3.1-1)$$
$$T_i = 3.33 t_m$$

- Controlador PID Ideal

$$K_c = 1.2 \frac{\tau}{K_p t_m} \quad a \quad 2.0 \frac{\tau}{K_p t_m}$$
$$T_i = 2 t_m \quad (1.3.1-2)$$
$$T_d = 0.5 t_m$$

1.3.1.2 Método de Chien, Hrones y Reswick

Chien y compañía desarrollaron ecuaciones para los controladores operando como servomecanismo y regulador, y emplean dos tipos diferentes de desempeño. Este método fue publicado en 1952.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *método de la tangente.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Criterio de desempeño: *la respuesta más rápida sin sobrepaso o la respuesta más rápida con un 20% de sobrepaso máximo.*
- Controlador: *PI o PID Ideal.*
- Validez: $0.1 < \frac{t_m}{\tau} < 1$

A continuación, en la tabla 3 se muestran el valor de los parámetros ajustados a través del método de Chien y asociados para los controladores PI y PID.

Tabla 3. Parámetros de controladores del método de Chien

Controlador	Parámetro	Servomecanismo		Regulador	
		Respuesta más rápida sin sobrepaso	Respuesta más rápida, 20% de sobrepaso	Respuesta más rápida sin sobrepaso	Respuesta más rápida, 20% de sobrepaso
PI	K_c	$\frac{0.35\tau}{K_p t_m}$	$\frac{0.6\tau}{K_p t_m}$	$\frac{0.6\tau}{K_p t_m}$	$\frac{0.6\tau}{K_p t_m}$
	T_i	$1.17t_m$	t_m	$4t_m$	$2.33t_m$
PID	K_c	$\frac{0.6\tau}{K_p t_m}$	$\frac{0.95\tau}{K_p t_m}$	$\frac{0.95\tau}{K_p t_m}$	$\frac{1.2\tau}{K_p t_m}$
	T_i	t_m	$1.36t_m$	$2.38t_m$	$2t_m$
	T_d	$0.5t_m$	$0.47t_m$	$0.42t_m$	$0.42t_m$

1.3.1.3 Método de Cohen - Coon

Cohen y Coon a diferencia de Ziegler y Nichols, consideraron el proceso como auto-regulado, modificando las ecuaciones del método de ajuste. Este método fue publicado en 1953.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *método de la tangente*.
- Funcionamiento del controlador: *regulador*.
- Criterio de desempeño: *decaimiento de un cuarto*.
- Controlador: *PI o PID Ideal*.
- Validez: $0 < \frac{t_m}{\tau} < 1$.

Ecuaciones:

- Controlador PI

$$K_c = \frac{\tau}{K_p t_m} \left(\frac{9}{10} + \frac{t_m}{12\tau} \right) \quad (1.3.1-3)$$

$$T_i = t_m \left(\frac{30 + 3t_m/\tau}{9 + 20t_m/\tau} \right)$$

- Controlador PID

$$K_c = \frac{\tau}{K_p t_m} \left(\frac{4}{3} + \frac{t_m}{4\tau} \right)$$

$$T_i = t_m \left(\frac{32 + 6t_m/\tau}{13 + 8t_m/\tau} \right) \quad (1.3.1-4)$$

$$T_d = t_m \left(\frac{4}{11 + 2t_m/\tau} \right)$$

1.3.1.4 Método de Shinskey (PI)

Método publicado por el autor entre los años del 2000 y 2001, basado en la identificación del proceso mediante el método de la tangente de Ziegler y Nichols.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *método de la tangente*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador*.
- Controlador: *PI*.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{0.667\tau}{K_p t_m} \tag{1.3.1-4}$$
$$T_i = 3.78t_m$$

1.3.1.5 Método de Liptak

Publicado en el año 2001.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *método de la tangente*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador*.
- Controlador: *PI o PID Ideal*.

Ecuaciones:

- Controlador PI

$$K_c = \frac{0.95\tau}{K_p t_m} \tag{1.3.1-5}$$
$$T_i = 4t_m$$

- Controlador PID Ideal

$$K_c = \frac{0.85\tau}{K_p t_m}$$

$$T_i = 1.6t_m \quad (1.3.1-6)$$

$$T_d = 0.6t_m$$

1.3.1.6 Método de O'Dwyer

Publicado en el año 2001

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *método de la tangente*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador*.
- Controlador: *PID Serie*.

Ecuaciones:

✓ *Funcionamiento Regulador*

$$K_c = \frac{x_1 \tau}{K_p t_m}, T_i = x_2 t_m, T_d = x_3 t_m \quad (1.3.1-7)$$

Tabla 4. Constantes del método de O'Dwyer para funcionamiento como regulador

Parámetro	Regulador	
	Respuesta sin sobrepaso	Respuesta con 20% de sobrepaso
x_1	0.7236	0.84
x_2	1.8353	1.4
x_3	0.5447	0.6
Validez	$0.1 < \frac{t_m}{\tau} < 1$	$0.1 < \frac{t_m}{\tau} < 1$

✓ *Funcionamiento Servomecanismo*

- Sin sobrepaso

$$\text{Validez: } \frac{t_m}{\tau} < 0.5$$

$$K_c = \frac{0.3\tau}{K_p t_m} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2t_m}{\tau}} \right]$$

$$T_i = \frac{\tau}{2} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{2t_m}{\tau}} \right]$$

$$T_d = \frac{\tau}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2t_m}{\tau}} \right]$$
(1.3.1-8)

- 20% de sobrepaso

Validez: $\frac{t_m}{\tau} < 0.7234$

$$K_c = \frac{0.475\tau}{K_p t_m} \left[1 + \sqrt{1 - 1.3824 \frac{t_m}{\tau}} \right]$$

$$T_i = 0.68\tau \left[1 + \sqrt{1 - 1.3824 \frac{t_m}{\tau}} \right]$$

$$T_d = 0.68\tau \left[1 - \sqrt{1 - 1.3824 \frac{t_m}{\tau}} \right]$$
(1.3.1-9)

1.3.1.7 Método de Tan

Publicado en el año 1999.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *método de la tangente*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador*.
- Controlador: *PID Serie*.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{0.6\tau}{K_p t_m}, T_i = t_m, T_d = t_m$$
(1.3.1-10)

1.3.1.8 Método de Shinskey (PID Clásico)

Publicado en el año 2000.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *método de la tangente*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador*.
- Controlador: *PID Clásico*.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{0.889\tau}{K_p t_m}, T_i = 1.75t_m, T_d = 0.70t_m, N = 8 \quad (1.3.1-11)$$

1.3.2 MÉTODOS BASADOS EN EL MÍNIMO ÍNDICE DE DESEMPEÑO

Criterios de error integral

El desempeño de los lazos de control puede ser estimado a través de alguna función con base en el error. Si éste es grande el desempeño del sistema de control no será el apropiado, por tanto se busca la forma de minimizarlo por medio de las integrales del error, las más comunes son:

- *Integral del error absoluto – IAE*

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1.3.2-1)$$

- *Integral del error cuadrático – ISE*

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (1.3.2-2)$$

- *Integral del tiempo por el error absoluto – ITAE*

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (1.3.2-3)$$

- *Integral del tiempo por el error cuadrático – ITSE*

$$ITSE = \int_0^{\infty} t e(t)^2 dt \quad (1.3.2-4)$$

Donde $e(t) = y(t) - r(t)$ ♦

$r(t)$: es el valor deseado de la variable de entrada

$y(t)$: es la señal realimentada controlada

Se observa de las cuatro integrales anteriores que dos de ellas tienen en cuenta una variable, el error y las otras manejan dos variables, el tiempo y el error. Esto tiene una repercusión, los criterios que usan sólo como variable el error buscan minimizar el sobrepaso máximo y el error en estado estable, lo cual se logra minimizando el valor de la integral y las otras dos integrales basadas en el producto del tiempo por el error, tienen como finalidad que la respuesta del sistema sea lo más rápida posible a cambio de un sobrepaso mayor.

Teniendo en cuenta los criterios integrales anteriores, algunos autores desarrollaron métodos de ajuste de controladores que buscan minimizar el error haciendo un ajuste de los parámetros de los mismos; dependiendo del funcionamiento del controlador éstos fueron clasificados en MIR (Mínimo Índice como Regulador) y MIS (Mínimo Índice como Servomecanismo).

1.3.2.1 Mínimo Índice de Desempeño: Ajuste Regulador.

1.3.2.1.1 Método de Lopez, Murrill

Publicado en el año 1967.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *método de la tangente modificada de Murrill.*
- Funcionamiento del controlador: *regulador.*
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE o mínimo ISE o mínimo ITAE.*
- Controlador: *PI o PID Ideal.*

♦ Se asume que el sistema de control tiene la estructura como el de la figura 2.

- Validez: $0.1 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 1$.

Ecuaciones:

- Controlador PI

$$K_c = \frac{a}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^b, \quad T_i = \frac{\tau}{c} \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^d \quad (1.3.2-5)$$

Tabla 5. Constantes método de Murrill controlador PI

Criterio	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
IAE	0.984	0.986	0.608	0.707
ISE	1.305	0.959	0.492	0.739
ITAE	0.859	0.977	0.674	0.680

- Controlador PID Ideal

$$K_c = \frac{a}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^b, \quad T_i = \frac{\tau}{c} \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^d, \quad T_d = e \cdot \tau \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^f \quad (1.3.2-6)$$

Tabla 6. Constantes método de Murrill controlador PI

Criterio	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
IAE	1.435	0.921	0.878	0.749	0.482	1.137
ISE	1.495	0.945	1.101	0.771	0.56	1.006
ITAE	1.357	0.947	0.842	0.738	0.381	0.995

1.3.2.1.2 Método de Arrieta.

Publicado en el año 2003.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *Cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *regulador.*
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE o mínimo ITAE.*
- Controlador: *PI o PID Ideal.*
- Validez: $0.1 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 1.2.$

Ecuaciones:

- **Controlador PI**

$$K_C = \frac{1}{K_P} \left(a + b \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^c \right), T_i = \tau \left(d + e \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^f \right) \quad (1.3.2-7)$$

Tabla 7. Constantes método de Arrieta controlador PI

Criterio	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
IAE	0.4500	0.6494	-1.1251	-0.2551	1.8205	0.4749
ITAE	0.2607	0.6470	-1.1055	-1.5926	2.9191	0.1789

- **Controlador PID Ideal**

$$K_C = \frac{1}{K_P} \left(a + b \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^c \right), T_i = \tau \left(d + e \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^f \right), T_d = \tau \left(g + h \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^i \right) \quad (1.3.2-8)$$

Tabla 8. Constantes método de Arrieta controlador PID

Criterio	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>
IAE	0.1050	1.2432	-0.9946	-0.2512	1.3581	0.4796	-0.0003	0,3500	0,8100
ITAE	0.1230	1.1891	-1.0191	-0.3173	1.4489	0.4440	-0.0053	0,3126	0,7417

1.3.2.1.3 Método de Alfaro

Publicado en el año 2003.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *Cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *regulador*.
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE*.
- Controlador: *PID Ideal*.
- Validez: $0.05 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 2$.

Ecuaciones:

$$K_C = \frac{1}{K_P} \left(a + b \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^c \right), T_i = \tau \cdot \left(d + e \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^f \right), T_d = \tau \cdot g \cdot \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^h \quad (1.3.2-9)$$

Tabla 9. Constantes método de Alfaro controlador PID

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
0,2068	1,1597	-1,0158	-0,2228	1,3009	0,5022	0,3953	0,8469

1.3.2.1.4 Método de Ho, Lim y Xu.

Publicado en el año 1998.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *Cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *regulador*.
- Criterio de desempeño: *mínimo ISE*.
- Controlador: *PID Ideal*.
- Validez: $0.1 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 1$, $2 \leq MG \leq 5$, $30^\circ \leq MF \leq 60^\circ$

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{1.0722}{K_p} \frac{MF^{-0.116}}{MG^{0.8432}} \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{-0.908}, \quad T_i = \frac{1.2497 \cdot \tau \cdot MF^{1.0082}}{MG^{0.2099}} \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{0.3678} \quad (1.3.2-10)$$

$$T_d = \frac{0.4763 \cdot \tau \cdot MF^{-0.328}}{MG^{0.0961}} \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{1.0317}$$

1.3.2.1.5 Método de Shinskey

Publicado en el año 1994.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *regulador.*
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE.*
- Controlador: *PI.*

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{100\tau_1}{K_p (\tau_1 + \tau_2) \left(50 + 55 \left[1 - e^{-\frac{\tau_1}{t_m + \tau_2}} \right] \right)}, \quad T_i = t_m \left(0.5 + 3.5 \left[1 - e^{-\frac{3\tau_1}{t_m + \tau_2}} \right] \right) \quad (1.3.2-11)$$

1.3.2.1.6 Método de Syrcos y Kookos

Publicado en el año 2005.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *regulador.*
- Controlador: *PID.*
- Validez: $2 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 5.$

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{1}{K_p} \left[0.31 + 0.6 \frac{\tau}{t_m} \right], \quad T_i = \tau \left[0.777 + 0.45 \frac{t_m}{\tau} \right], \quad T_d = \tau \left[0.44 - 0.56 \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^{2.2} \right] \quad (1.3.2-12)$$

1.3.2.1.7 Método de Haalman

Publicado en el año 1965, teóricamente el método debe arrojar valores aproximados a las siguientes características de la respuesta del sistema de control $Ms = 1.9$, $MG = 2.36$ y $MF = 50^\circ$.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *regulador.*
- Criterio de desempeño: *mínimo ISE.*
- Controlador: *PID Serie.*
- Validez: $\tau_1 > \tau_2$.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{2\tau_1}{3t_m K_p}, \quad T_i = \tau_1, \quad T_d = \tau_2 \quad (1.3.2-13)$$

1.3.2.1.8 Método de Bohl y McAvoy

Publicado en el año 1976.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *regulador.*
- Criterio de desempeño: *mínimo ITAE.*
- Controlador: *PID Serie.*

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{5.5030}{K_p} \left[\left(10 \frac{t_m}{\tau_1} \right)^{-1.1445+0.11 \ln \left(10 \frac{t_m}{\tau_1} \right)} \right] \left[\left(10 \frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{0.1648+0.1709 \ln \left(10 \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) - 0.2142 \ln \left(10 \frac{t_m}{\tau_1} \right)} \right], \quad (1.3.2-14)$$

$$T_i = 1.8681 \tau_1 \left[\left(10 \frac{t_m}{\tau_1} \right)^{0.6212-0.076 \ln \left(10 \frac{t_m}{\tau_1} \right)} \right] \left[\left(10 \frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{0.3144-0.0062 \ln \left(10 \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) + 0.0085 \ln \left(10 \frac{t_m}{\tau_1} \right)} \right], \quad T_d = T_i$$

1.3.2.1.9 Método de Smith y Corripio

Publicado en el año 1997.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *regulador*.
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE*.
- Controlador: *PID Clásico*.
- Validez: $0.1 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 1.5$.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{\tau}{K_p t_m}, \quad T_i = \tau, \quad T_d = 0.5 t_m, \quad N = 10 \quad (1.3.2-15)$$

1.3.2.1.10 Método de Kaya y Scheib

Publicado en el año 1988.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *método de la tangente modificada de Murrill*.

- Funcionamiento del controlador: *regulador*.
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE o mínimo ISE o mínimo ITAE*.
- Controlador: *PID Clásico*.
- Validez: $0 < \frac{t_m}{\tau} \leq 1$.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{a}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^b, \quad T_i = \frac{\tau}{c} \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^d, \quad T_d = e \cdot \tau \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^f, \quad N = 10 \quad (1.3.2-16)$$

Tabla 10. Constantes método de Kaya y Scheib controlador PID Clásico

Criterio	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
IAE	0.98089	0.76167	0.91032	1.05211	0.59974	0.89819
ISE	1.11907	0.89711	0.7987	0.9548	0.54766	0.87798
ITAE	0.77902	1.06401	1.14311	0.70949	0.57137	1.03826

1.3.2.1.11 Método de Shinskey (PID Clásico)

Publicado en el año 1994.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden subamortiguado más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *regulador*.
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE*.
- Controlador: *PID Clásico*.

Ecuaciones:

$$\text{Si } \frac{\tau_2}{t_m} \leq 3$$

$$K_c = \frac{100}{\left(48 + 57 \left[1 - e^{-\frac{1.2\tau_1}{t_m}}\right] \frac{K_p t_m}{\tau_1} \left(1 + 0.34 \frac{\tau_2}{t_m} - 0.2 \left[\frac{\tau_2}{t_m}\right]^2\right)\right)}$$

$$T_i = t_m \left(1.5 - e^{-\frac{\tau_1}{1.5t_m}}\right) \left(1 + 0.9 \left[1 - e^{-\frac{\tau_2}{t_m}}\right]\right) \quad (1.3.2-17)$$

$$T_d = 0.56t_m \left(1 - e^{-\frac{1.2\tau_1}{t_m}}\right) + 0.6\tau_2, \quad N = 10$$

Si $\frac{\tau_2}{t_m} > 3$

$$K_c = \frac{2.5\tau_1}{K_p t_m}, \quad T_i = t_m + 0.2\tau_2, \quad T_d = t_m + 0.2\tau_2, \quad N = 10 \quad (1.3.2-18)$$

1.3.2.1.12 Método de Chao

Publicado en el año 1989.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden subamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *regulador.*
- Criterio de desempeño: *mínimo ITAE.*
- Controlador: *PID Clásico.*
- Validez: $0.3 < \zeta < 0.8, 0.05 \leq \frac{t_m \omega_n}{2\zeta} \leq 0.5.$

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{1.3292 - 2.8527\zeta + 2.0365\zeta^2}{K_p} \left(\frac{t_m \omega_n}{2\zeta}\right)^{-1.6159 - 0.06616\zeta + 0.5351\zeta^2}, \quad T_i = \frac{2\zeta}{\omega_n} e^{x_1}, \quad T_d = \frac{2\zeta}{\omega_n} e^{x_2}$$

$$x_1 = (3.3368 - 7.7919\zeta + 4.3556\zeta^2) + (1.4094 - 4.4581\zeta + 3.4857\zeta^2) \ln\left(\frac{t_m \omega_n}{2\zeta}\right)$$

$$+ (0.116 - 0.8142\zeta + 0.7402\zeta^2) \left[\ln\left(\frac{t_m \omega_n}{2\zeta}\right)\right]^2 \quad (1.3.2-19)$$

$$x_2 = (2.3054 - 6.4328\zeta + 3.9743\zeta^2) + (1.8243 - 5.6458\zeta + 4.6328\zeta^2) \ln\left(\frac{t_m \omega_n}{2\zeta}\right) + (0.2866 - 1.4727\zeta + 1.2893\zeta^2) \left[\ln\left(\frac{t_m \omega_n}{2\zeta}\right) \right]^2$$

1.3.2.2 Mínimo Índice de Desempeño: Ajuste Servomecanismo.

1.3.2.2.1 Método de Rovira

Publicado en el año 1969.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden sobreamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *método de la tangente modificada de Murrill.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo.*
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE o mínimo ITAE.*
- Controlador: *PI o PID Ideal.*
- Validez: $0.1 \leq \frac{t_m}{\tau} < 1.$

Ecuaciones:

Tabla 11. Fórmula método de Rovira

		Criterio minimizado	
Controlador	Parámetro	IAE	ITAE
PI	K_c	$\frac{0.758}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m}\right)^{0.681}$	$\frac{0.586}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m}\right)^{0.916}$
	T_i	$\frac{\tau}{1.020 - 0.323 \frac{t_m}{\tau}}$	$\frac{\tau}{1.030 - 0.165 \frac{t_m}{\tau}}$
PID	K_c	$\frac{1.086}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m}\right)^{0.869}$	$\frac{0.965}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m}\right)^{0.85}$
	T_i	$\frac{\tau}{0.740 - 0.13 \frac{t_m}{\tau}}$	$\frac{\tau}{0.796 - 0.1465 \frac{t_m}{\tau}}$
	T_d	$0.348\tau \left(\frac{t_m}{\tau}\right)^{0.914}$	$0.308\tau \left(\frac{t_m}{\tau}\right)^{0.929}$

1.3.2.2.2 Método de Arrieta.

Publicado en el año 2003.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *Cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo.*
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE o mínimo ITAE.*
- Controlador: *PI o PID Ideal.*
- Validez: $0.1 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 1.2.$

Ecuaciones:

- **Controlador PI**

$$K_c = \frac{1}{K_p} \left(a + b \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^c \right), T_i = \tau \left(d + e \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^f \right) \quad (1.3.2-7)$$

Tabla 12. Constantes método de Arrieta controlador PI

Criterio	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
IAE	0,2438	0,5305	-1,0299	0,9377	0,4337	0,8714
ITAE	0,1140	0,5131	-1,0382	0,9953	0,2073	1,5246

- **Controlador PID Ideal**

$$K_c = \frac{1}{K_p} \left(a + b \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^c \right), T_i = \tau \left(d + e \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^f \right), T_d = \tau \left(g + h \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^i \right) \quad (1.3.2-8)$$

Tabla 13. Constantes método de Arrieta controlador PID

Criterio	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>
IAE	0,2268	0,8051	-0,9597	1,0068	0,3658	1,0092	-0,0146	0,3500	0,8100
ITAE	0,1749	0,8355	-0,9462	0,9581	0,3987	0,6884	-0,0169	0,3126	0,7417

1.3.2.2.3 Método de Alfaro

Publicado en el año 2003.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *Cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo*.
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE*.
- Controlador: *PID Ideal*.
- Validez: $0.05 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 2$.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{1}{K_p} \left(a + b \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^c \right), T_i = \tau \cdot \left(d + e \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^f \right), T_d = \tau \cdot g \cdot \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^h \quad (1.3.2-22)$$

Tabla 14. Constantes método de Alfaro controlador PID

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
0,3295	0,7182	-0,9971	0,9781	0,3723	0,8456	0,3416	0,9414

1.3.2.2.4 Método de Ho, Lim y Xu.

Publicado en el año 1998.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *Cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo*.
- Criterio de desempeño: *mínimo ISE*.
- Controlador: *PID Ideal*.
- Validez: $0.1 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 1, 2 \leq MG \leq 5, 30^\circ \leq MF \leq 60^\circ$.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{1.8578}{K_p} \frac{MF^{0.0821}}{MG^{0.9087}} \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{-0.9471}$$

$$T_i = \frac{0.0211\tau [1 + 0.3289MG + 6.4572MF + 25.1914(t_m/\tau)]}{1 + 0.0625MG - 0.8079MF + 0.347(t_m/\tau)} \quad (1.3.2-23)$$

$$T_d = \frac{0.4899 \cdot \tau \cdot MF^{0.1457}}{MG^{0.0845}} \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{1.0264}$$

1.3.2.2.5 Método de Smith

Publicado en el año 2002 (PI) y 2003 (PID).

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *Cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo*.
- Criterio de desempeño: *mínimo ITAE*.
- Controlador: *PI o PID Ideal*.

Ecuaciones:

- **Controlador PI**

$$K_c = \frac{0.586}{K_p} \frac{\tau}{t_m} \quad T_i = \tau \quad (1.3.2-24)$$

- **Controlador PID Ideal**

$$K_c = \frac{0.965}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^{0.855} \quad T_i = 1.26\tau \quad T_d = 0.308\tau \quad (1.3.2-25)$$

1.3.2.2.6 Método de Smith y Corripio

Publicado en el año 1997.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto*

- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo*
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE*
- Controlador: *PID Clásico*
- Validez: $0.1 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 1.5$

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{0.83\tau}{K_p t_m}, T_i = \tau, T_d = 0.5\tau, N = 10 \quad (1.3.2-26)$$

1.3.2.2.7 Método de Kaya y Scheib

Publicado en el año 1988.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *método de la tangente modificada de Murrill.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo.*
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE o mínimo ISE o mínimo ITAE.*
- Controlador: *PID Clásico.*
- Validez: $0 < \frac{t_m}{\tau} \leq 1.$

Ecuaciones:

Tabla 15. Fórmulas método de Kaya y Scheib

Parámetro	Criterio minimizado		
	IAE	ISE	ITAE
K_c	$\frac{0.65}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^{1.04432}$	$\frac{0.71959}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^{1.03092}$	$\frac{1.12762}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^{0.80368}$
T_i	$\frac{\tau}{0.9895 + 0.09539 \frac{t_m}{\tau}}$	$\frac{\tau}{1.12666 - 0.18145 \frac{t_m}{\tau}}$	$\frac{\tau}{0.99783 + 0.02860 \frac{t_m}{\tau}}$
T_d	$0.50814\tau \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{1.08433}$	$0.54568\tau \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{0.86411}$	$0.42844\tau \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{1.0081}$
N	10	10	10

1.3.2.2.8 Método de Chao

Publicado en el año 1989.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden subamortiguado más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo*.
- Criterio de desempeño: *mínimo ITAE*.
- Controlador: *PID Clásico*.
- Validez: $0.3 < \zeta < 0.8, 0.05 \leq \frac{t_m \omega_n}{2\zeta} \leq 0.5$.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{1.1295 - 2.8584\zeta + 2.1176\zeta^2}{K_p} \left(\frac{t_m \omega_n}{2\zeta} \right)$$
$$T_i = \frac{2\zeta}{\omega_n} (8.6286 - 20.70\zeta + 13.203\zeta^2) \left(\frac{t_m \omega_n}{2\zeta} \right)^{x_1}$$
$$x_1 = 0.7962 - 2.4809\zeta + 1.7611\zeta^2$$
$$T_d = \frac{2\zeta e^{x_2}}{\omega_n} \quad (1.3.2-27)$$
$$x_2 = (3.9285 - 12.874\zeta + 8.6434\zeta^2) + (3.2228 - 12.034\zeta + 9.2547\zeta^2) \ln \left(\frac{t_m \omega_n}{2\zeta} \right)$$
$$+ (0.6366 - 3.0208\zeta + 2.4603\zeta^2) \left[\ln \left(\frac{t_m \omega_n}{2\zeta} \right) \right]^2$$

1.3.3 SÍNTESIS DIRECTA.

Estas reglas de ajuste dan una respuesta específica en lazo cerrado del sistema, algunos de estos métodos permiten alcanzar parámetros de desempeño deseados, como por ejemplo: el margen de ganancia, el margen de fase o el coeficiente de amortiguamiento.

1.3.3.1 Método de Vitecková (PI)

Publicado en el año 2000.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden sobreamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *método de dos puntos de Vitecková.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Criterio de desempeño: *sobrepaso deseado entre 0% y 50%.*
- Controlador: *PI.*

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{x_1 \tau}{K_p t_m}, \quad T_i = \tau \quad (1.3.3-1)$$

Tabla 16. Constante método de Vitecková controlador PI

x_1	OS ¹ %	x_1	OS %	x_1	OS %
0.368	0	0.696	20	0.906	40
0.514	5	0.748	25	0.957	45
0.518	10	0.801	30	1.008	50
0.641	15	0.853	35		

Fuente: O'DWYER, Aidan. Handbook of PI and PID controller tuning rules. 2006. P43.

1.3.3.2 Método de Vitecková (PID)

Publicado en el año 2000.

✓ Polo doble

Características:

- Modelo de la planta: *polo doble más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *método de polo doble de Vitecková.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*

¹ OS % equivale a las siglas en ingles de sobrepaso.

- Controlador: *PID Ideal*.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{0.74\tau}{K_p t_m}, \quad T_i = 2\tau, \quad T_d = 0.5\tau \quad (1.3.3-2)$$

✓ **Sobreamortiguado**

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador*.
- Controlador: *PID Ideal*.
- Criterio de desempeño: *sobrepaso deseado entre 0% y 50%*.
- Validez: $\tau_1 > \tau_2$.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{x_1(\tau_1 + \tau_2)}{K_p t_m}, \quad T_i = \tau_1 + \tau_2, \quad T_d = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2} \quad (1.3.3-3)$$

Tabla 17. Constante método de Vitecková controlador PID

x_1	OS %	x_1	OS %	x_1	OS %
0.368	0	0.696	20	0.906	40
0.514	5	0.748	25	0.957	45
0.581	10	0.801	30	1.008	50
0.641	15	0.853	35		

Fuente: O'DWYER, Aidan. Handbook of PI and PID controller tuning rules. 2006. P326.

✓ **Subamortiguado**

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador*.
- Controlador: *PID Ideal*.
- Criterio de desempeño: *sobrepaso deseado entre 0% y 50%*.

- Validez: $0.5 < \zeta \leq 1$.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{x_1 \zeta}{K_p t_m \omega_n}, \quad T_i = \frac{2\zeta}{\omega_n}, \quad T_d = \frac{1}{2\zeta \omega_n} \quad (1.3.3-4)$$

Tabla 18. Constante método de Vitecková controlador PID

x_1	OS %	x_1	OS %	x_1	OS %
0.376	0	1.392	20	1.812	40
1.028	5	1.496	25	1.914	45
1.162	10	1.602	30	2.016	50
1.282	15	1.706	35		

Fuente: O'DWYER, Aidan. Handbook of PI and PID controller tuning rules. 2006. P327.

1.3.3.3 Método de Ho, Hang y Cao

Publicado en el año 1995.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Criterio de desempeño: *margen de ganancia y fase deseados.*
- Controlador: *PI o PID Ideal.*
- Validez: $\tau_1 > \tau_2$

Ecuaciones:

- **Controlador PI**

$$K_c = \frac{\omega_p \tau}{MG \cdot K_p}, \quad T_i = \frac{1}{2\omega_p - \frac{4\omega_p^2 t_m}{\pi} + \frac{1}{\tau}}, \quad \text{con } \omega_p = \frac{MG \cdot MF + 0.5\pi MG(MG - 1)}{(MG^2 - 1)t_m} \quad (1.3.3-5)$$

- **Controlador PID Ideal**

$$K_c = \frac{\omega_p \tau}{MG \cdot K_p}, \quad T_i = \frac{1}{2\omega_p - \frac{4\omega_p^2 t_m}{\pi} + \frac{1}{\tau}}, \quad T_d = \tau_2 \quad (1.3.3-6)$$

$$\omega_p = \frac{MG \cdot MF + 0.5\pi MG(MG - 1)}{(MG^2 - 1)t_m}$$

1.3.3.4 Método de Ho, Hang y Zhou

Publicado en el año 1997.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden subamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Criterio de desempeño: *margen de ganancia y fase deseados.*
- Controlador: *PID Ideal.*

- Validez: $\frac{t_m}{\tau} \leq 1$, $2\zeta \geq \omega_n t_m$, $MF < \frac{(\pi + \sqrt{\pi^2 + 8\pi\zeta\omega_n t_m})(MG^2 - 1) - 2\pi MG(MG - 1)}{4MG}$.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{2}{\pi MG \cdot K_p} (\pi\zeta + \pi - 2t_m \omega_n), \quad T_i = \frac{2}{\pi\omega_n} (\pi\zeta + \pi - 2t_m) \quad (1.3.3-7)$$

$$T_d = \frac{\pi}{2\omega_n^2 \left(\frac{\pi\zeta}{\omega_n} + \frac{\pi}{\omega_n} - 2t_m \right)}$$

1.3.3.5 Método de Vitecková

Publicado en el año 2002.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden sobreamortiguado más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador*.
- Controlador: *PI o PID Ideal*.
- Validez PI: $0.05 < \frac{t_m}{\tau} < 0.8$.
- Validez PID Ideal: $0.05 < \frac{t_m}{\tau} < 1.6$.

Ecuaciones:

- **Controlador PI**

$$K_c = -\frac{1}{K_p} \left[t_m \tau x_1^2 + (2\tau + t_m) x_1 + 1 \right] e^{t_m x_1}, \quad T_i = -\frac{t_m \tau x_1^2 + (2\tau + t_m) x_1 + 1}{x_1^2 (t_m \tau x_1 + \tau + t_m)} \quad (1.3.3-8)$$

$$x_1 = -\frac{2}{t_m} - \frac{0.5}{\tau} + \sqrt{\frac{2}{t_m^2} + \frac{0.25}{\tau^2}}$$

- **Controlador PID Ideal**

$$K_c = \frac{e^{t_m x_1}}{K_p} \left[t_m^2 \tau x_1^3 + (3t_m \tau + t_m^2) x_1^2 + t_m x_1 - 1 \right]$$

$$T_i = -2 \left[\frac{t_m^2 \tau x_1^3 + (3t_m \tau + t_m^2) x_1^2 + t_m x_1 - 1}{x_1^3 (t_m^2 \tau x_1 + 2t_m \tau + t_m^2)} \right] \quad (1.3.3-9)$$

$$T_d = -0.5 \left[\frac{t_m^2 \tau x_1^2 + (4t_m \tau + t_m^2) x_1 + 2t_m + 2\tau}{t_m^2 \tau x_1^3 + (3t_m \tau + t_m^2) x_1^2 + t_m x_1 - 1} \right]$$

$$\text{con } x_1 = -\frac{3}{t_m} - \frac{0.5}{\tau} + \sqrt{\frac{3}{t_m^2} + \frac{0.25}{\tau^2}}$$

1.3.3.6 Método de Sree

Publicado en el año 2004.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden sobreamortiguado más tiempo muerto*.

- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PI o PID Ideal.*
- Validez: $0.01 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 1.$

Ecuaciones:

- **Controlador PI**

$$K_c = \frac{0.9179}{K_p} \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{-0.8915}$$

Tabla 19. Fórmula parámetro T_i según método de Sree

$T_i = \tau \left[10.59 \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^2 - 2.3588 \frac{t_m}{\tau} + 0.8985 \right]$	<i>para</i> $0.1 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 0.4$
$T_i = \tau \left[0.7719 \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^4 - 3.6608 \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^3 + 6.5791 \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^2 - 5.1652 \frac{t_m}{\tau} + 2.8059 \right]$	<i>para</i> $0.4 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 1.5$

- **Controlador PID Ideal**

$$K_c = \frac{1.377}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^{0.8422}, \quad T_i = 1.085\tau \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{0.4777}$$

$$T_d = \tau \left[0.3899 \frac{t_m}{\tau} + 0.0195 \right] \quad \text{para } 0.1 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 1 \quad (1.3.3-11)$$

$$K_c = \frac{1}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} + 0.5 \right), \quad T_i = \tau + 0.5t_m, \quad T_d = \frac{0.5t_m(\tau + 0.1667t_m)}{\tau + 0.5t_m} \quad \text{para } \frac{t_m}{\tau} > 1 \quad (1.3.3-12)$$

1.3.3.7 Método de Hägglund y Åström

Publicado en el año 2002.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden sobreamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *método de la tangente modificada de Murrill.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PI.*
- Criterio de desempeño: *sensibilidad máxima 1,4.*

Ecuaciones:

Tabla 20. Fórmula método de Hägglund y Åström

K_c	T_i	Validez
$\frac{0.25\tau}{K_p t_m}$	0.8τ	$0.2 \leq \frac{t_m}{\tau} < 1$
$\frac{0.1\tau}{K_p t_m} + \frac{0.15}{K_p}$	$0.3t_m + 0.5\tau$	$\frac{t_m}{\tau} < 1$
$\frac{0.15}{K_p}$	$0.3t_m$	$\frac{t_m}{\tau} \rightarrow \infty$

1.3.3.8 Método de Leva

Publicado en el año 2003.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PI o PID Ideal.*

Ecuaciones:

- Controlador PI

$$K_c = \frac{\tau_1}{2K_p(\tau_2 + t_m)}, \quad T_i = 4(\tau_2 + t_m) \quad \text{para } \tau_1 \gg \tau_2 + t_m \quad (1.3.3-13)$$

- **Controlador PID Ideal**

Tabla 21. Fórmula método de Leva

K_c	T_i	T_d	Validez
$K_c = \frac{\tau_1 \tau_2}{8K_p (\tau_2 + t_m)^2}$	$16(\tau_2 + t_m)$	$4(\tau_2 + t_m)$	$\tau_1 \geq 4(\tau_2 + t_m)$
$\frac{\tau_1 (5\tau_2 + 4t_m)}{8K_p (\tau_2 + t_m)^2}$	$5\tau_2 + 4t_m$	$\frac{4\tau_2 (\tau_2 + t_m)}{5\tau_2 + 4t_m}$	$\tau_1 \geq 8(\tau_2 + t_m)$

1.3.3.9 Método de Porneleau y Poulin

Publicado en el año 2004.

Características:

- Modelo de la planta: *polo doble más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *método de Porneleau.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PI.*
- Criterio de desempeño: *Sobrepaso menor al 10%.*

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{\tau}{K_p (\tau + t_m)}, \quad T_i = 1.5\tau \quad (1.3.3-14)$$

1.3.3.10 Método de Skogestad

Publicado en el año 2004.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden subamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Criterio de desempeño: *margen de ganancia= 3,14, margen de fase= 61,4° y sensibilidad máxima= 1,59.*
- Controlador: *PID Ideal.*

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{2\zeta}{K_p \omega_n (2t_m)}, T_i = \frac{2\zeta}{\omega_n}, T_d = \frac{1}{2\zeta \omega_n} \quad (1.3.3-15)$$

1.3.3.11 Método de Chiu

Publicado en el año 1973.

Características:

- Modelo de la planta PI: *primer orden sobreamortiguado más tiempo muerto.*
- Modelo de la planta PID: *segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PI o PID Ideal.*

Ecuaciones:

- **Controlador PI**

$$K_c = \frac{\tau}{K_p (1+t_m)}, T_i = \tau \quad (1.3.3-16)$$

- **Controlador PID Ideal**

$$K_c = \frac{\tau_1 + \tau_2}{K_p (1+t_m)}, T_i = \tau_1 + \tau_2, T_d = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2} \quad (1.3.3-17)$$

1.3.3.12 Método de Gorez y Klàn

Publicado en el año 2000.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden subamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*

- Controlador: *PID Ideal*.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{2\zeta}{K_p \omega_n \left(\frac{2\zeta}{\omega_n} + t_m \right)}, T_i = \frac{2\zeta}{\omega_n}, T_d = \frac{1}{2\zeta \omega_n} \quad (1.3.3-18)$$

1.3.3.13 Método de Arvanitis

Publicado en el año 2000.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden subamortiguado más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador*.
- Criterio de desempeño: *coeficiente de amortiguamiento deseado*.
- Controlador: *PID Ideal*.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{2\zeta^{des}}{K_p \omega_n t_m (\sqrt{2\zeta^{des} + 1})}, T_i = \frac{2\zeta^{des}}{\omega_n}, T_d = \frac{1}{2\zeta^{des} \omega_n} \quad (1.3.3-19)$$

Donde ζ^{des} es el coeficiente de amortiguamiento deseado del sistema en lazo cerrado (ingresado por el usuario).

1.3.3.14 Método de Haeri

Publicado en el año 2005.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden sobreamortiguado más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador*.
- Controlador: *PI*.

- Validez: $0 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 4$.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{1}{K_p} \left[0.407 + \frac{6.282}{1 + 14.956 \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{1.195}} \right], T_i = 0.96\tau + 0.46t_m \quad (1.3.3-20)$$

1.3.3.15 Método de O'Dwyer

Publicado en el año 2001.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación*.
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador*.
- Controlador: *PID Serie*.
- Criterio de desempeño: *margen de ganancia deseado*.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{x_1 \tau_1}{K_p t_m}, T_i = \tau_1, T_d = \tau_2 \quad (1.3.3-21)$$

Donde $x_1 = \frac{\pi}{2MG}$

MG es el margen de ganancia deseado (ingresado por el usuario)

$$MF = 0.5\pi - x_1$$

MF es el margen de fase resultante

1.3.3.16 Método de Wang

Publicado en el año 2002.

Características:

- Modelo de la planta: *primer orden sobreamortiguado más tiempo muerto*.
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación*.

- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador*.
- Controlador: *PID Clásico*.
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE o mínimo ISE o mínimo ITAE*.

Ecuaciones:

✓ *Funcionamiento Regulador*

Tabla 22. Fórmula método de Wang como regulador

Parámetro	Criterio minimizado		
	IAE	ISE	ITAE
K_c	$\frac{0.98089}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^{0.76167}$	$\frac{1.11907}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^{0.89711}$	$\frac{0.77902}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^{1.06401}$
T_i	$1.09851\tau \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{1.05211}$	$1.2520\tau \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{0.95480}$	$0.87481\tau \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{0.70949}$
T_d	$0.59974\tau \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{0.89819}$	$0.54766\tau \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{0.87798}$	$0.57137\tau \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{1.03826}$
N	10	10	10

✓ *Funcionamiento Servomecanismo*

Tabla 23. Fórmula método de Wang como servomecanismo

Parámetro	Criterio minimizado		
	IAE	ISE	ITAE
K_c	$\frac{0.65}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^{1.04432}$	$\frac{0.71959}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^{1.03092}$	$\frac{1.12762}{K_p} \left(\frac{\tau}{t_m} \right)^{0.80368}$
T_i	$\frac{\tau}{0.9895 + 0.09539 \frac{t_m}{\tau}}$	$\frac{\tau}{1.12666 - 0.18145 \frac{t_m}{\tau}}$	$\frac{\tau}{0.9978 + 0.02860 \frac{t_m}{\tau}}$
T_d	$0.50814 \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{1.08433}$	$0.54568 \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{0.86411}$	$0.42844 \left(\frac{t_m}{\tau} \right)^{1.0081}$
N	10	10	10

1.3.3.17 Método de Poulin

Publicado en el año 1996.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PID Clásico.*
- Validez: $\tau_1 \leq 5\tau_2$.
- Criterio de desempeño: *mínimo margen de fase de 55°.*

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{\tau_1}{K_p(\tau_1 + t_m)}, T_i = \tau_1, T_d = \tau_2, N = 5 \quad (1.3.3-22)$$

1.3.4 REGLAS DE AJUSTE ROBUSTAS

Los ajustes desarrollados con base en las reglas robustas, utilizan criterios de desempeño robusto, como por ejemplo la sensibilidad máxima y el parámetro λ que determina la robustez de un sistema compensado.

1.3.4.1 Método de Smith

Publicado en el año 2003.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PID Ideal.*
- Validez: $\tau_1 \geq \tau_2$.

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{\tau_1}{K_p(\lambda + t_m)}, T_i = \tau_1, T_d = \tau_2 \quad (1.3.3-23)$$

Donde λ es un parámetro que determina la robustez del sistema compensado y $\lambda \in [t_m, \tau_2]$

1.3.4.2 Método de Kristiansson

Publicado en el año 2003.

Características:

- Modelo de la planta: *segundo orden subamortiguado más tiempo muerto.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PID Ideal.*

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{2\zeta}{K_p \omega_n t_m} \left[1 - \frac{1}{M_s} \right], T_i = \frac{2\zeta}{\omega_n}, T_d = \frac{1}{2\zeta \omega_n} \quad (1.3.3-24)$$

Donde M_s es la sensibilidad máxima, y los valores recomendados por el autor del método son: $M_s : 1,4; 1,7; 2,0$.

1.3.5 MÉTODOS BASADOS EN EL CICLO ÚLTIMO

Estos métodos utilizan la información última del sistema K_u y T_u , para realizar el ajuste de controladores, a diferencia de los anteriores tipos de ajuste, éste último no necesita ninguna identificación del proceso mediante modelos conocidos, por el contrario, la principal ventaja de estos métodos basados en la información última es que permiten la sintonización del controlador sin importar el proceso a controlar.

1.3.5.1 Método de Ziegler y Nichols

Publicado en el año 1942.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *regulador.*
- Controlador: *PI o PID Ideal.*
- Criterio de desempeño: *Decaimiento de 1/4.*

Ecuaciones:

- **Controlador PI**

$$K_c = 0.45K_u, \quad T_i = 0.83T_u \quad (1.3.5-1)$$

- **Controlador PID Ideal**

$$K_c = 0.6K_u, \quad T_i = 0.5T_u, \quad T_d = 0.125T_u \quad (1.3.5-2)$$

1.3.5.2 Método de Robbins

Publicado en el año 2002.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PI o PID Ideal.*
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE.*

Ecuaciones:

- **Controlador PI**

$$K_c = 0.3K_u, \quad T_i = (0.24 + 0.111K_uK_p)T_u, \quad \text{para servomecanismo}$$

$$K_c = 0.3K_u, \quad T_i = (0.27 + 0.054K_uK_p)T_u, \quad \text{para regulador} \quad (1.3.5-3)$$

- **Controlador PID Ideal**

$$K_c = 0.45K_u, \quad T_i = (0.24 + 0.111K_uK_p)T_u, \quad T_d = 0.25T_u \quad \text{para servomecanismo}$$

$$K_c = 0.45K_u, \quad T_i = (0.27 + 0.054K_uK_p)T_u, \quad T_d = 0.25T_u \quad \text{para regulador (1.3.5-4)}$$

1.3.5.3 Método de Corripio

Publicado en el año 1990.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PID Ideal.*
- Criterio de desempeño: *Decaimiento de 1/4.*

Ecuaciones:

$$K_c = 0.75K_u, \quad T_i = 0.63T_u, \quad T_d = 0.1T_u \quad (1.3.5-5)$$

1.3.5.4 Método de Åström y Hägglund

Publicado en el año 1995.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PI o PID Ideal.*
- Criterio de desempeño: *Margen de ganancia y fase definidos por el autor.*

Ecuaciones:

Tabla 24. Fórmula método de Åström y Hägglund

K_c	T_i	T_d	Criterio
$0.4698K_u$	$0.4546T_u$	$0.1136T_u$	$MG = 2, MF = 20^\circ$
$0.1988K_u$	$1.2308T_u$	$0.3077T_u$	$MG = 2.44, MF = 61^\circ$
$0.2015K_u$	$0.7878T_u$	$0.1970T_u$	$MG = 3.45, MF = 46^\circ$

1.3.5.5 Método de McMillan

Publicado en el año 1994.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PI o PID Ideal.*

Ecuaciones:

- Controlador PI

$$K_c = 0.3571K_u, \quad T_i = T_u \quad (1.3.5-6)$$

- Controlador PID Ideal

$$K_c = 0.5K_u, \quad T_i = 0.5T_u, \quad T_d = 0.125T_u \quad (1.3.5-7)$$

1.3.5.6 Método de Tan (PID Ideal)

Publicado en el año 1999.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PID Ideal.*

Ecuaciones:

$$K_c = 0.5K_u, \quad T_i = T_u, \quad T_d = 0.125T_u \quad (1.3.5-8)$$

1.3.5.7 Método de Yu

Publicado en el año 1999.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*

- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PID Ideal.*
- Criterio de desempeño: *Con o sin sobrepaso.*

Ecuaciones:

$$K_c = 0.33K_u, T_i = 0.5T_u, T_d = 0.125T_u \text{ con sobrepaso}$$

$$K_c = 0.2K_u, T_i = 0.5T_u, T_d = 0.125T_u \text{ sin sobrepaso} \quad (1.3.5-9)$$

1.3.5.8 Método de Smith

Publicado en el año 2003.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PID Ideal.*

Ecuaciones:

$$K_c = 0.75K_u, T_i = 0.625T_u, T_d = 0.1T_u \quad (1.3.5-10)$$

1.3.5.9 Método de Pessen

Publicado en el año 1994.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PID Serie.*
- Validez: $0.1 \leq \frac{t_m}{\tau} \leq 1.$

Ecuaciones:

$$K_c = 0.35K_u, T_i = 0.25T_u, T_d = 0.25T_u \quad (1.3.5-11)$$

1.3.5.10 Método de Bohl y McAvoy

Publicado en el año 1976.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PID Serie.*

Ecuaciones:

$$K_c = \frac{0.5458}{K_p} \left[\left(\frac{t_m}{T_u} \right)^{1.2264+0.4568 \ln \left(\frac{t_m}{T_u} \right)} \right] \left[\left(K_u K_p \right)^{1.2190-0.0958 \ln (K_u K_p) - 0.1007 \ln \left(\frac{t_m}{T_u} \right)} \right] \quad (1.3.5-12)$$

$$T_i = 0.0393 T_u \left[\left(\frac{t_m}{T_u} \right)^{-1.9314-0.6221 \ln \left(\frac{t_m}{T_u} \right)} \right] \left[\left(K_u K_p \right)^{-0.0703-0.1125 \ln (K_u K_p) - 0.2944 \ln \left(\frac{t_m}{T_u} \right)} \right], T_d = T_i$$

1.3.5.11 Método de Tan (PID Serie)

Publicado en el año 1999.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PID Serie.*
- Criterio de desempeño: *Decaimiento de 1/4.*

Ecuaciones:

$$K_c = 0.3K_u, T_i = 0.15T_u, T_d = 0.25T_u \quad (1.3.5-13)$$

1.3.5.12 Método de O'Dwyer

Publicado en el año 2001.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PID Serie.*
- Criterio de desempeño: *Margen de ganancia y fase definidos por el autor*

Ecuaciones:

Tabla 25. Fórmula método de O'Dwyer

Parámetros			Desempeño
K_c	T_i	T_d	
$0.2349K_u$	$0.2273T_u$	$0.2273T_u$	$MG = 2, MF = 20^\circ$
$0.0944K_u$	$0.6154T_u$	$0.6154T_u$	$MG = 2.44, MF = 61^\circ$
$0.1008K_u$	$0.3939T_u$	$0.3939T_u$	$MG = 3.45, MF = 46^\circ$

1.3.5.13 Método de Corripio (PID Clásico)

Publicado en el año 1990.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PID Clásico.*

Ecuaciones:

$$K_c = 0.6K_u, T_i = 0.5T_u, T_d = 0.125T_u, N = 10 \quad (1.3.5-14)$$

1.3.5.14 Método de Harrold

Publicado en el año 1999.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *servomecanismo o regulador.*
- Controlador: *PID Clásico.*

Ecuaciones:

$$K_c = 0.67K_u, T_i = 0.5T_u, T_d = 0.125T_u, N = 10 \quad (1.3.5-15)$$

1.3.5.15 Método de Edgar

Publicado en el año 1997.

Características:

- Modelo de la planta: *cualquier modelo del proceso.*
- Identificación del modelo: *cualquier método de identificación.*
- Funcionamiento del controlador: *regulador.*
- Controlador: *PID Clásico.*
- Criterio de desempeño: *mínimo IAE.*

Ecuaciones:

$$K_c = 0.56K_u, T_i = 0.39T_u, T_d = 0.14T_u, N = 10 \quad (1.3.5-16)$$

1.4 CRITERIOS DE ESTABILIDAD DE UN SISTEMA DE CONTROL [3], [11], [12]

Existen diferentes técnicas para el análisis de la estabilidad de los sistemas de control en lazo cerrado. Las técnicas que se implementaron en el programa se

escogieron con base en su simplicidad y amplio uso en el ámbito académico, estas fueron:

- Diagrama de Nyquist.
- Diagrama de Bode.
- Lugar Geométrico de las Raíces (LGR).

1.4.1 Diagrama de Nyquist

Este criterio de estabilidad se encuentra definido como la respuesta en frecuencia de lazo abierto para determinar la estabilidad del sistema en lazo cerrado. Durante el análisis de estabilidad de un sistema de control mediante esta técnica, es posible que se presenten tres casos, que son:

1. El punto $-1 + j0$ no se encuentra rodeado por ninguna clase de trayectoria; si éste es el caso del diagrama de Nyquist y sólo si $G_c(s) \cdot G_p(s)$ posee todos sus polos con parte real negativa, el sistema será estable.
2. El punto $-1 + j0$ se encuentra rodeado una o varias veces en sentido contrario al de las agujas del reloj; el sistema será estable únicamente si el número de polos de $G_c(s) \cdot G_p(s)$ con parte real positiva es igual al número de encierros del punto $-1 + j0$.
3. Si al punto $-1 + j0$ lo rodea una o más trayectorias del diagrama de Nyquist en el sentido de las agujas del reloj, el sistema será inestable.

El criterio de estabilidad de Nyquist se puede expresar en término de las siguientes variables:

$$Z = N + P$$

Z = Número de ceros de $1 + G_c(s) \cdot G_p(s)$ en el semiplano derecho del plano s , o lo que es equivalente al número de polos del sistema en lazo cerrado.

N = Número de rodeos en el sentido de las agujas del reloj del punto $-1 + j0$.

P = Número de polos de $G_c(s) \cdot G_p(s)$ en el semiplano derecho del plano s .

1.4.2 Diagrama de Bode

El diagrama de bode traza la respuesta en frecuencia de la función de transferencia de lazo abierto en dos gráficas separadas: una que muestra la magnitud en dB contra la frecuencia y otra que muestra el ángulo de fase (en grados) contra la frecuencia, ambas en escala logarítmica.

El diagrama de Bode es una herramienta sencilla de utilizar, con ella es posible determinar la estabilidad de sistemas de control mediante la obtención de las frecuencias de corte y de los márgenes de ganancia y fase; para sistemas de fase mínima es necesario que ambos márgenes sean positivos para que el sistema sea estable.

1.4.3 Lugar Geométrico de las Raíces

El lugar de las raíces traza en el plano complejo el movimiento de los polos de lazo cerrado, o lo que es equivalente, las raíces de la ecuación característica mientras se varía un parámetro del sistema, normalmente la ganancia del controlador. Al igual que en las anteriores técnicas esta también utiliza la función de transferencia de lazo abierto para trazar su respectivo diagrama, el sistema es entonces inestable para los valores de ganancia en la que uno o más polos de lazo cerrado estén en el semiplano derecho del plano s .

1.5 CRITERIOS DE ROBUSTEZ DE UN SISTEMA DE CONTROL [2], [10], [11], [12]

La robustez es una característica que posee todo sistema de control, y se define como la capacidad de mantener las características del mismo ante cambios en la planta del sistema. Algunas de las características que más comúnmente presentan cambios son la ganancia y el tiempo muerto del proceso.

1.5.1 Índices de Robustez en la Frecuencia

- Margen de Ganancia
- Margen de Fase
- Sensibilidad Máxima (M_s) : La sensibilidad máxima es el recíproco de la distancia más corta de la curva de Nyquist al punto (-1,0) en el plano polar, y está definida como:

$$M_s = \text{Max} \left| \frac{1}{1 + G_p(j\omega)G_c(j\omega)} \right| \quad (1.5-1)$$

1.5.2 Índices de Robustez en la ganancia y el tiempo

La robustez de los métodos de ajuste de controladores se puede estimar a través de los índices de robustez (IR) que se definen como:

- Índice de Robustez en la Ganancia:

$$IR_{K_p} = \frac{k_{pu}}{k_{pa}} - 1, \quad t_m = t_{ma} \quad (1.5-2)$$

- Índice de Robustez en el tiempo muerto:

$$IR_{t_m} = \frac{t_{mu}}{t_{ma}} - 1, \quad k_p = k_{pa} \quad (1.5-3)$$

- Índice de Robustez Combinado:

$$IR_c \approx 0.5 \sqrt{IR_{K_p}^2 + IR_{t_m}^2} \quad (1.5-4)$$

- Índice de Robustez Absoluto:

$$IR_a = \min(IR_{K_p}, IR_{t_m}, IR_c) \quad (1.5-5)$$

Donde:

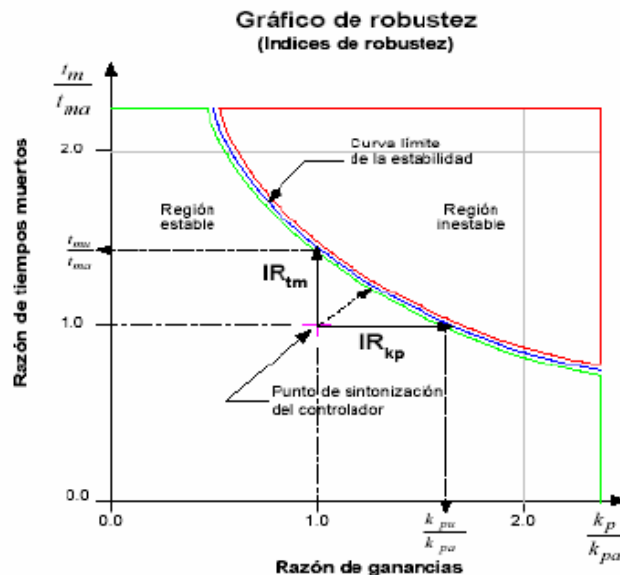
k_{pa}, t_{ma} , equivalen a la ganancia y el tiempo muerto del modelo de la planta, para los que se sintonizó el controlador.

k_{pu}, t_{mu} , equivalen a la ganancia y el tiempo muerto de la planta que llevan al límite de la estabilidad al sistema de forma independiente.

Otra forma de apreciar estos índices de robustez es mediante la figura 9, en la que se aprecia la cercanía de la curva de estabilidad límite del sistema al punto (1,1) en el plano $(k_p/k_{pa}, t_m/t_{ma})$, que corresponde al punto de sintonización del controlador.

Entre más altos sean los índices de robustez así mismo será la robustez del sistema, es decir, permitirá un mayor cambio en los parámetros de la planta sin que el sistema de control se vuelva inestable.

Figura 9. Curva de Robustez

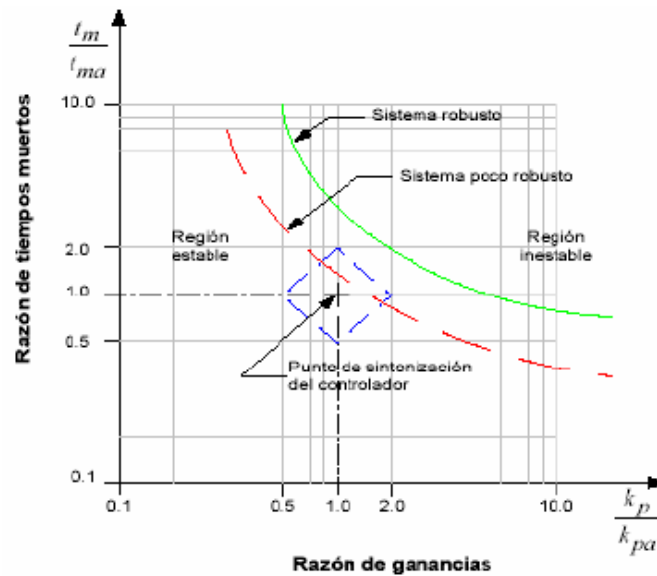


Fuente: ALFARO, Víctor. Métodos de Sintonización. San José de Costa Rica, 2005. Universidad de Costa Rica. Departamento de Automática. P. 48.

El gráfico de robustez desarrollado por Hansen, permite comparar la robustez de diferentes parámetros ajustados por distintos métodos de sintonización, y considerar ésta dentro de los criterios de diseño de un sistema de control. Se

observan en la figura 10 dos curvas de robustez que corresponden a diferentes ajustes de un mismo sistema de control.

Figura 10. Gráfico de robustez para un sistema con el controlador sintonizado con dos diferentes conjuntos de parámetros



Fuente: ALFARO, Víctor. Métodos de Sintonización. San José de Costa Rica, 2005. Universidad de Costa Rica. Departamento de Automática. P. 49.

Según Shinskey, un valor mínimo para los índices de robustez debe ser la unidad, esto se puede apreciar de forma gráfica en la *ventana de robustez límite* como el rombo de color azul que encierra el punto (1,1) en la figura 10, lo que implica, que se pueda duplicar la ganancia o el tiempo muerto del proceso de forma independiente sin que el sistema se vuelva inestable. Aquellas curvas de robustez de los sistemas de control que atraviesan dicha ventana se consideran poco robustos.

2. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA [9]. [14]

La herramienta fue desarrollada teniendo en cuenta el cumplimiento de los objetivos planteados por medio de dos etapas.

La primera de ellas consistió en la creación de funciones, encargadas de ejecutar los diferentes métodos de identificación de procesos y ajuste de controladores escogidos para ser implementados en el programa, todas éstas fueron probadas de forma independiente para comprobar su correcto funcionamiento.

La segunda y última etapa, consistió en la creación de una interfaz gráfica que permitiera la comunicación entre las diferentes funciones mediante botones, cuadros de texto, y otros tipos de control que facilitan la interacción entre el programa y el usuario final.

2.1 Herramientas de MATLAB utilizadas

Para el desarrollo del programa se utilizaron herramientas internas que posee MATLAB, para aplicaciones en el control de procesos, permitiendo una fácil aplicación de los conceptos teóricos del área de control clásico. Las herramientas utilizadas fueron:

- ***“step”***: Permite obtener la respuesta a un cambio escalón de un sistema.
- ***“margin”***: Facilita la obtención de los márgenes de ganancia y fase con sus respectivas frecuencias de cruce, además permite observar el diagrama de bode de un sistema.
- ***“rlocus”***: Muestra el lugar geométrico de las raíces de un sistema.
- ***“allmargin”***: Función que muestra ciertas características de un sistema, como son: margen de ganancia y fase, estabilidad, etc.

Por otro lado el programa no sólo se basó en la utilización de funciones internas de MATLAB, también fueron desarrolladas por los autores funciones con finalidades específicas, por ejemplo:

- ***“interp_t”***: Función de interpolación para hallar un valor en el tiempo, teniendo su correspondiente valor en la respuesta al escalón.
- ***“parametros_ser”***: Esta función calcula las características de la respuesta transitoria de un sistema de control, operando como servomecanismo cuando se presenta un cambio en la señal de entrada tipo escalón.
- ***“parametros_reg”***: Esta función calcula las características de la respuesta transitoria de un sistema de control, operando como regulador cuando se presenta un cambio en la señal de perturbación tipo escalón.

Igualmente fue utilizada una función especial para desarrollar el diagrama de Nyquist; aunque MATLAB posee una herramienta que permite el trazo de éste, en una situación particular la visualización del gráfico mostrado no es la mejor, más específicamente, cuando la función de transferencia posee un polo sobre el eje imaginario, el diagrama de Nyquist realizado por MATLAB es difícil de observar de una forma adecuada por las escalas mostradas en éste, pues la gráfica polar pasa por infinito. Por lo tanto, se hizo necesario la utilización de una función que superara este inconveniente, ésta fue desarrollada en la Universidad de Michigan y se encuentra disponible en <http://www.engin.umich.edu/group/ctm/freq/nyq.html>; sin embargo, la función utilizada en nuestro programa fue una modificación hecha por el profesor Víctor Alfaro, director del departamento de automática de la Universidad de Costa Rica, quien autorizó el uso de su modificación.

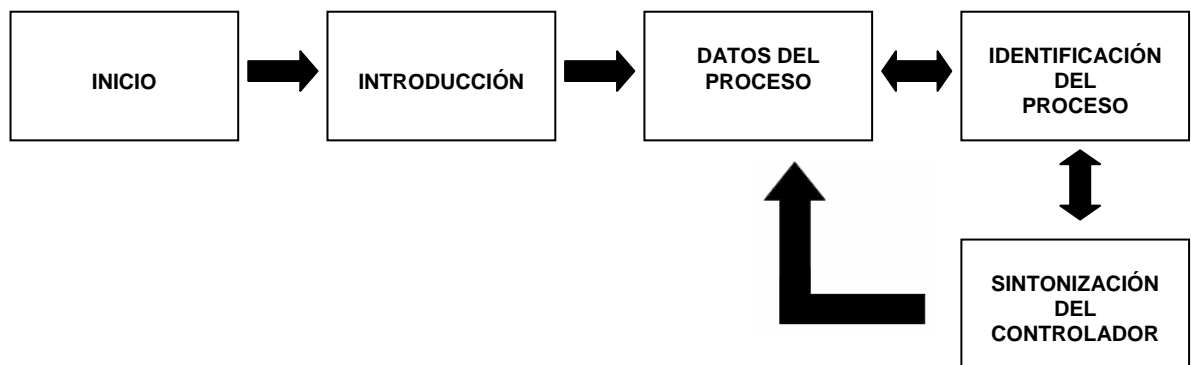
2.2 Diseño de la Interfaz

La creación de la interfaz gráfica se llevó a cabo mediante una programación netamente textual; aunque MATLAB posee la herramienta GUI, se optó el

desarrollo de la misma de esta forma, pues se evita el uso de variables imaginarias necesarias en el diseño de interfaces por GUI.

La interfaz en su totalidad consta de cinco ventanas principales, divididas en: inicio, introducción, datos del proceso, identificación, y por último sintonización como se muestra en la Figura 11; sin embargo, la herramienta en su totalidad posee muchas ventanas secundarias que se habilitan dependiendo de algunos casos especiales.

Figura 11. Diagrama de bloques de la Interfaz gráfica



Fuente: Autores

A continuación se dará una explicación de cada una de las principales etapas del programa.

2.2.1 Ventana de Inicio.

En la Figura 12 se observa la ventana de inicio del programa una vez que este es ejecutado desde MATLAB.

Figura 12. Ventana de Inicio



Fuente: Autores

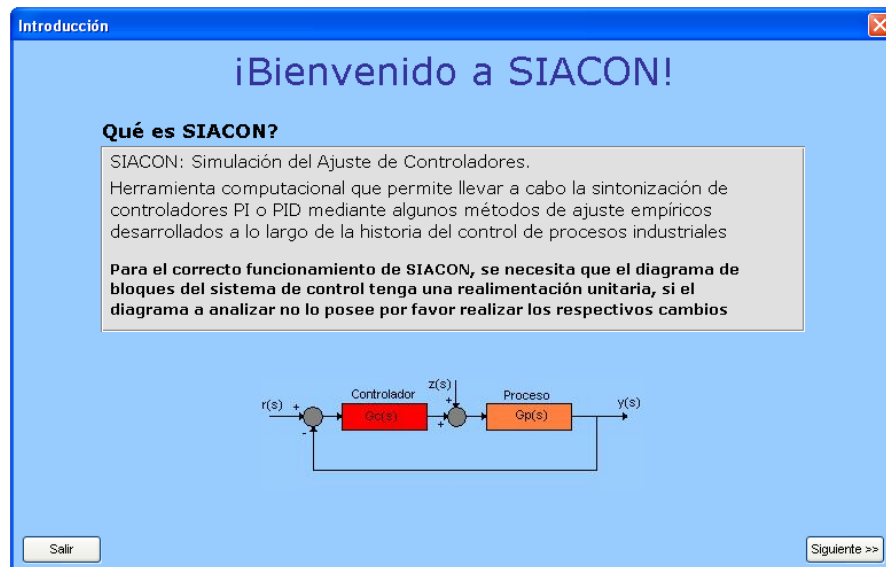
La ventana de inicio permanece abierta durante un tiempo de 2 segundos, transcurrido éste se inicia la venta de introducción.

2.2.2 Ventana de Introducción

En esta ventana se explica qué es el programa y cuáles son las características necesarias que debe tener el sistema de control para que se pueda usar la herramienta y brindar resultados idóneos.

La ventana se muestra a continuación:

Figura 13. Ventana de Introducción



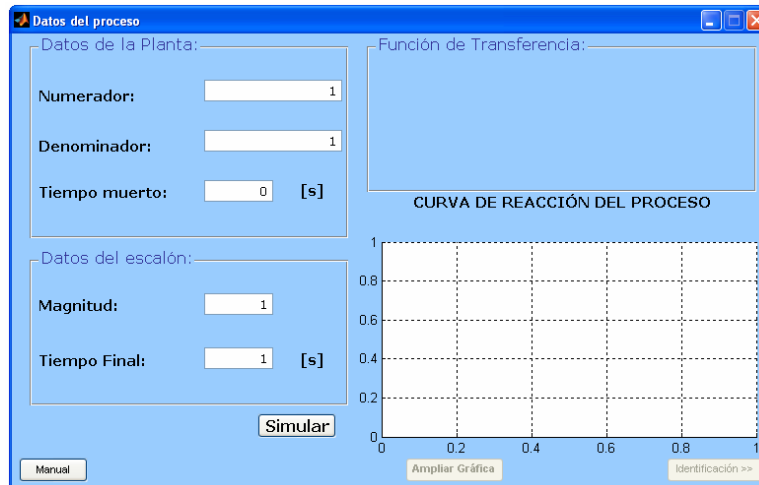
Fuente: Autores

Durante el diseño de esta ventana se creó una estructura global, que contendrá todas aquellas variables ingresadas por el usuario y otras internas que el programa necesita para el correcto funcionamiento del mismo.

2.2.3 Ventana Datos del Proceso

Al presionar el botón *siguiente* de la ventana de introducción, se genera la ventana de ingreso de datos del proceso, donde se tendrá la posibilidad de ingresar una función de transferencia en términos de los coeficientes del numerador y denominador, también es posible el ingreso del tiempo muerto que pueda tener el proceso; estos no son los únicos datos que se ingresan en esta ventana, pues en ella son introducidos los datos de la prueba de escalón, que se debe realizar al sistema para obtener su respectiva curva de reacción, estos datos son: la magnitud del escalón de entrada y el tiempo de duración del mismo. La ventana de ingreso de datos del proceso es mostrada en la Figura 14.

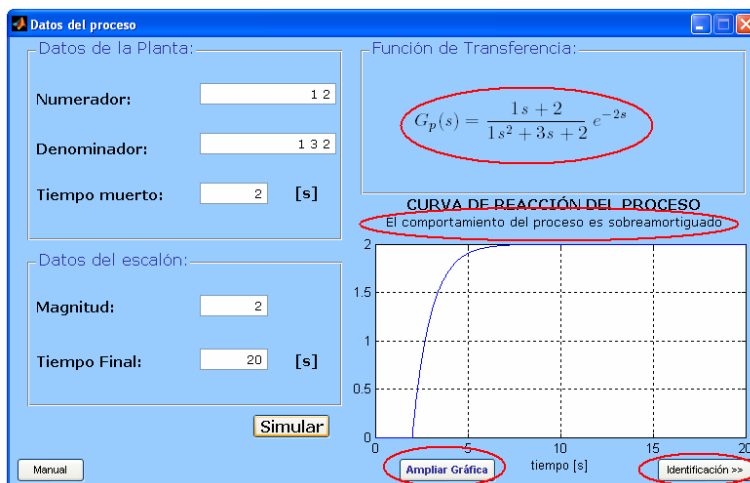
Figura 14. Ventana Datos del Proceso



Fuente: Autores

El botón *simular* de la ventana *datos del proceso*, es el encargado de ejecutar la función "*simular1*", que comprueba que ninguno de los datos ingresados sean errados, además, se muestra en el panel llamado: *Función de transferencia*, la función de transferencia de la planta ingresada por el usuario, también genera la curva de reacción en el eje indicado, se imprime en una etiqueta el tipo de respuesta del proceso (sobre o subamortiguada), igualmente se habilitan los botones *ampliar gráfica* e *identificación*, siempre y cuando no haya habido ninguna clase de error; para así poder proseguir a la ventana de *identificación del proceso*; todo esto se aprecia en la Figura 15.

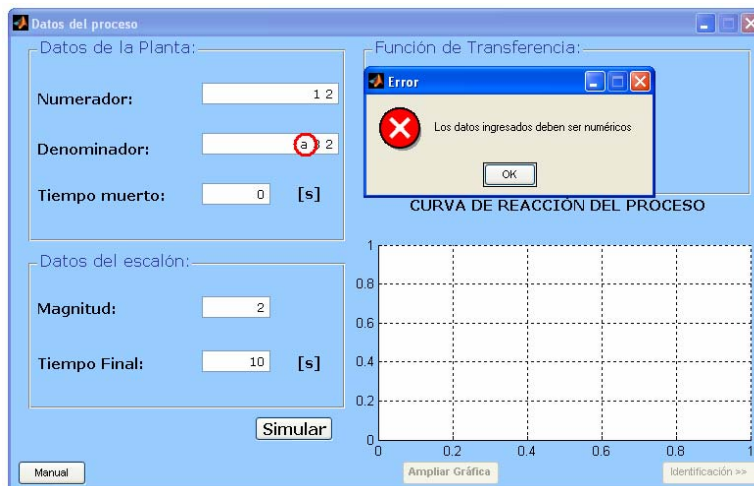
Figura 15. Ventana en correcto funcionamiento



Fuente: Autores

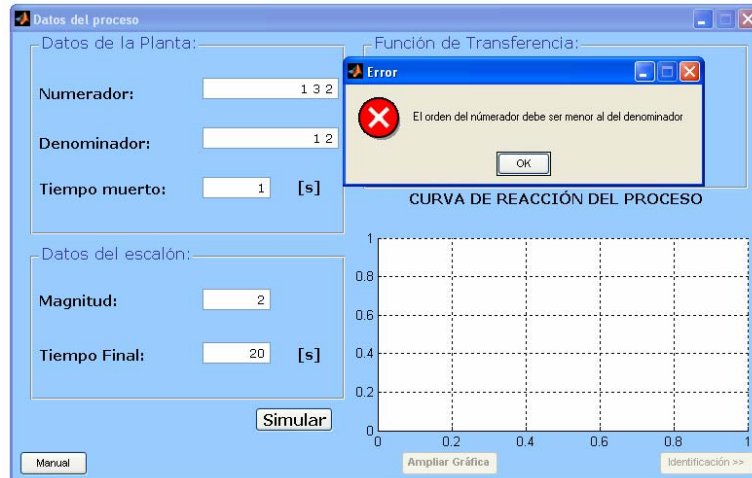
A continuación se muestran las ventanas que se generan en el caso que se presente algún tipo de error.

Figura 16. Ventana de error cuando se ingresa un dato que no sea numérico



Fuente: Autores

Figura 17. Ventana de error orden del numerador mayor que el del denominador



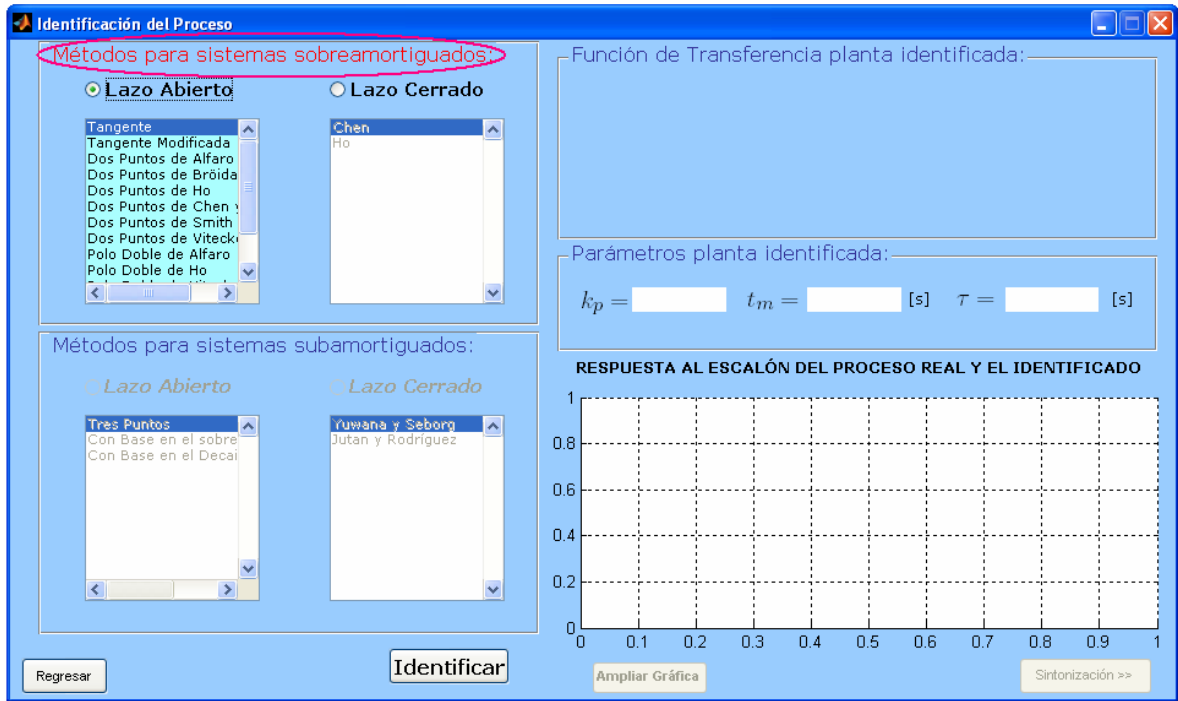
Fuente: Autores

Estos no son los únicos errores que se pueden presentar al ingresar los datos, también se generan ventanas de error o advertencia si datos como el tiempo muerto, la magnitud o el tiempo final son ingresados en forma de vector o si son no numéricos, igualmente si el comportamiento de la planta es inestable el botón identificación es deshabilitado, quedando la opción de ampliar gráfica.

2.2.4 Ventana de Identificación del proceso

Una vez ingresados los datos del proceso sin ningún error, y presionando el botón identificar de la ventana *datos del proceso*, se procede a la ventana *identificación del proceso*, en la que es posible escoger uno de varios métodos de identificación dependiendo del comportamiento de la curva de reacción del proceso. Estos métodos pueden ser en lazo abierto o en lazo cerrado, para la habilitación de los segundos es necesario que la planta si es de segundo orden posea un tiempo muerto diferente a cero, para plantas de mayor orden esto no es necesario. Dicha ventana es la siguiente:

Figura 18. Ventana de Identificación del proceso si la Curva de reacción tiene un comportamiento sobreamortiguado



Fuente: Autores

Dependiendo del comportamiento de la curva de reacción del proceso, se habilitarán o deshabilitarán dos radiobuttons y sus correspondientes listbox, es decir, si el proceso es sobreamortiguado el título correspondiente a este toma un color rojo, indicando que los métodos para este tipo de comportamiento son los que estarán activados para su uso por parte del usuario, mientras que los métodos para plantas subamortiguados serán deshabilitados, esto se aprecia en la Figura 18, de igual forma ocurre si el proceso es subamortiguado.

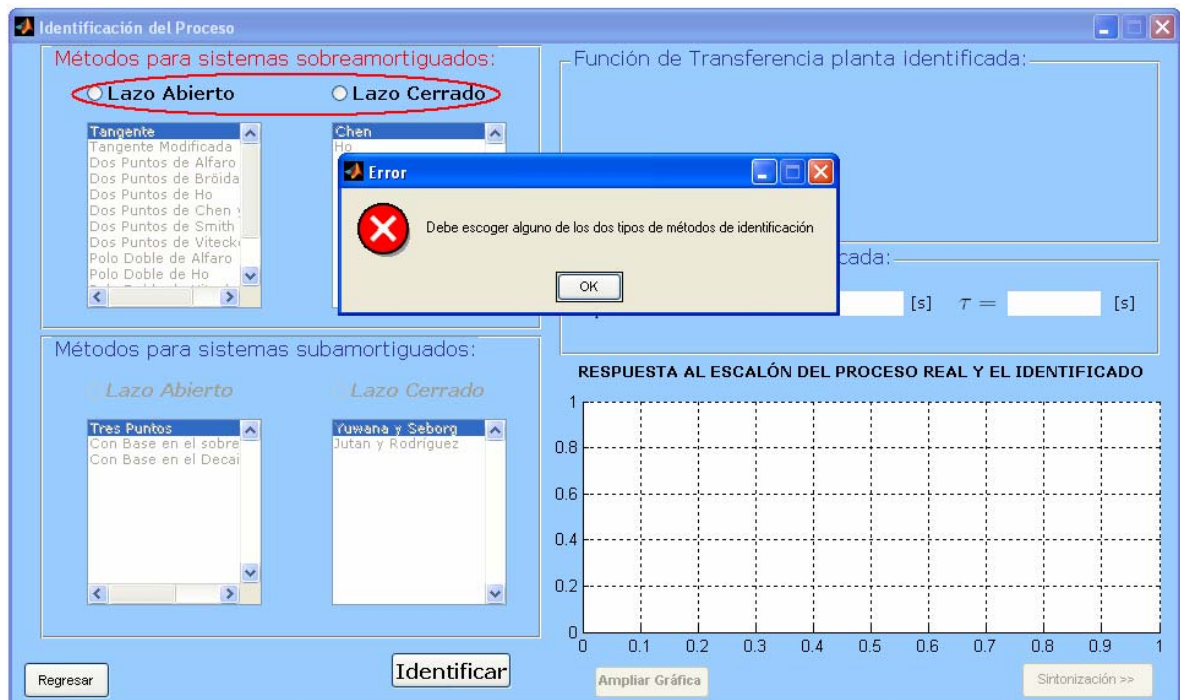
El botón regresar como su nombre lo indica cumple la función de volver a la ventana anterior.

El botón identificar ejecuta la función *identificar*, encargada de aproximar la curva de reacción del proceso a un modelo de primer orden más tiempo muerto, de polo doble más tiempo muerto, o de segundo orden más tiempo muerto ya sea subamortiguado o sobreamortiguado según la escogencia del usuario. Sin embargo, está no es su única función, también se ocupa de comprobar que se haya escogido algún tipo de prueba de identificación ya sea de lazo abierto o de lazo cerrado mediante los radiobuttons, además muestra la función de transferencia de la planta identificada y los valores de los parámetros de la misma, igualmente realiza una gráfica en la que se puede comparar la curva de reacción del sistema real con la de la planta identificada, esto se puede apreciar en la Figura 21.

Como en la anterior ventana, en la *ventana de identificación* se pueden presentar dos tipos de errores, durante la identificación del proceso, estos son:

- ✓ *Comprobación de escogencia de prueba de identificación:*

Figura 19. Ventana de error si no se escoge un tipo de identificación



Fuente: Autores

✓ *Error en el método de identificación:* Es posible que durante la identificación del proceso algún método produzca un error en el cálculo de los parámetros del modelo, por ejemplo, un tiempo muerto negativo o una constante de tiempo compleja, en este caso, el programa hará cero estos parámetros y mostrará una ventana de error donde se informa que el método de identificación escogido no es el apropiado para la identificación de la planta ingresada.

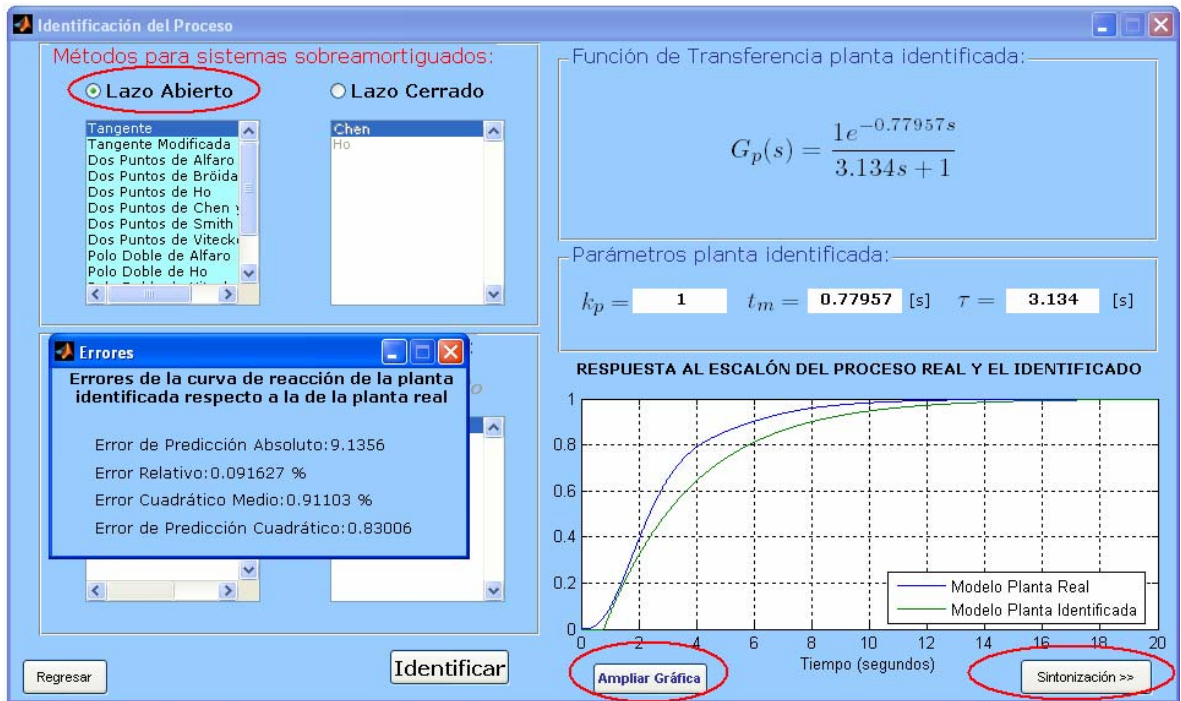
Figura 20. Ventana de error en el método de identificación



Fuente: Autores

Identificación correcta: Si se ha escogido un método de identificación sea de lazo abierto o de lazo cerrado, y no se produce ninguna clase de error, el proceso de identificación se cumplirá de forma correcta, un ejemplo de lo que ocurre se presenta en la Figura 21.

Figura 21. Ventana de identificación en su correcto funcionamiento



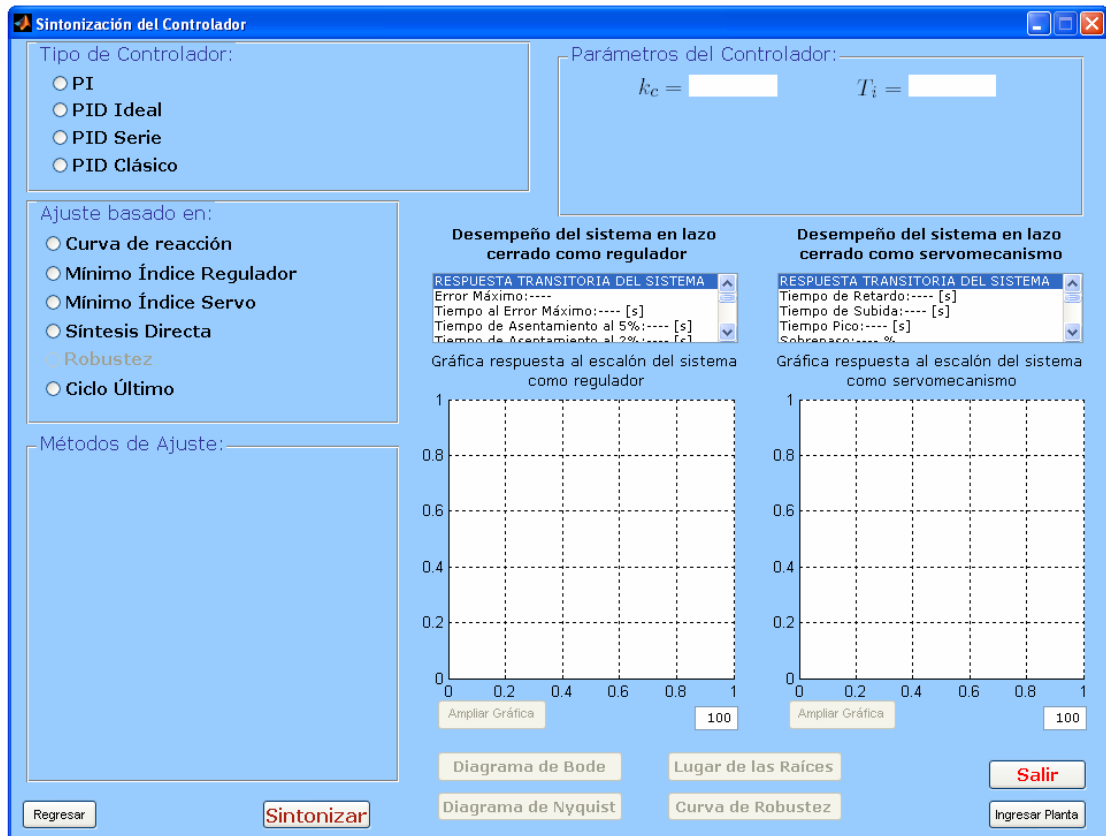
Fuente: Autores

En la Figura 21 se aprecia una pequeña ventana extra en la que se muestran diferentes errores entre la planta real y la identificada, estos pueden ser usados como criterios para la escogencia del mejor método de identificación, si así se prefiere o como comparación entre los mismos, también se señala la habilitación de los botones ampliar gráfica y sintonización cuando el funcionamiento del programa es correcto.

2.2.5 Ventana de Sintonización del controlador

Finalizada la etapa de identificación del proceso, se puede proceder a la parte de ajuste del controlador, esta ventana se ejecuta una vez es presionado el botón *Sintonización >>* en la ventana de identificación (Figura 21). Esta ventana de ajuste se puede apreciar en la Figura 22.

Figura 22. Ventana de sintonización del controlador



Fuente: Autores

En la ventana de la Figura 22, se observan los tipos de controladores que pueden ser escogidos por el usuario para su posterior ajuste, así mismo, es posible la escogencia de los diferentes tipos de ajuste en los que están clasificados los métodos de sintonización y obviamente la selección de uno de estos métodos. Los tipos de ajuste y sus métodos contenidos en cada uno de ellos se habilitaran o deshabilitaran dependiendo de el método de identificación escogido por el usuario, esto debido a que algunos métodos requieren de un método de identificación en especial, como ejemplo en la Figura 22 se observa que el tipo de ajuste *robustez* está deshabilitado.

A continuación, se presenta una explicación de las partes principales que componen la ventana de sintonización.

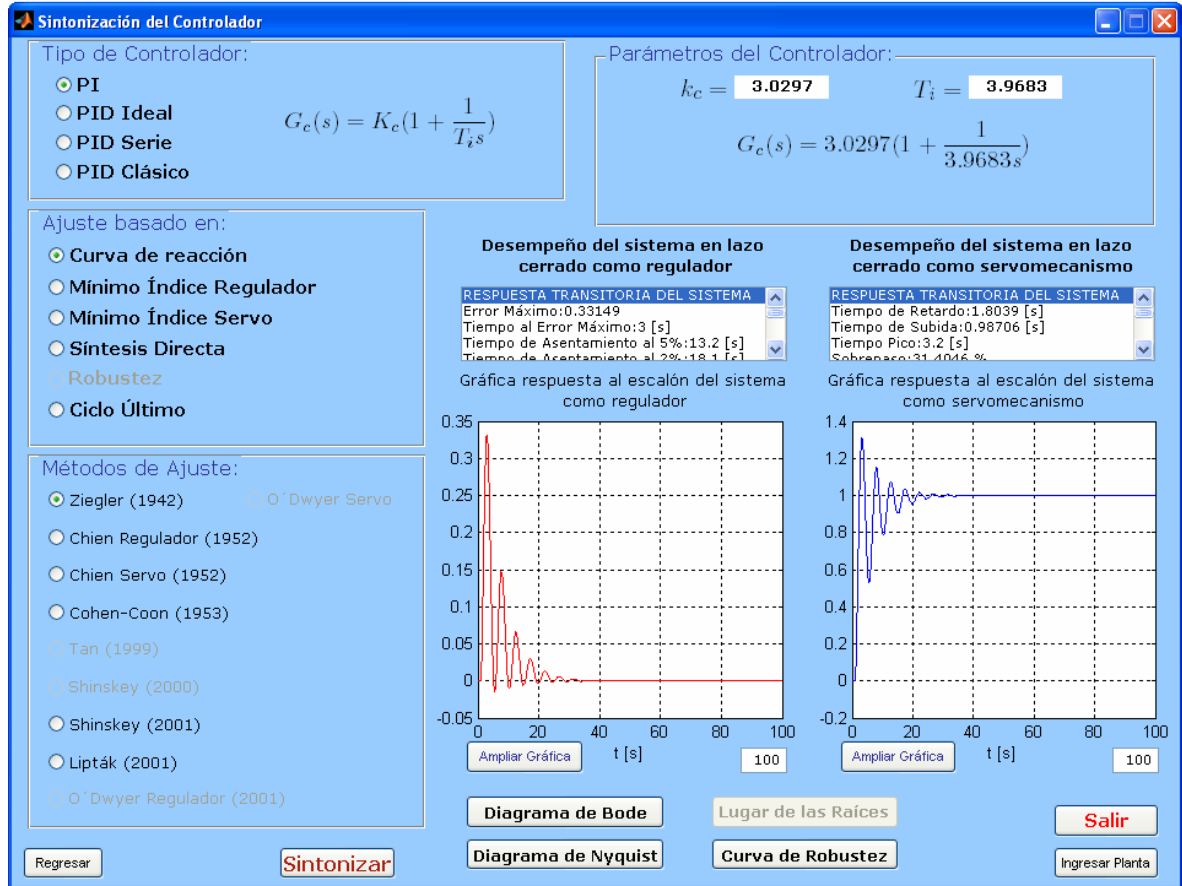
✓ *Panel tipo de controlador:* En este grupo de botones se presentan los diferentes controladores que se pueden ajustar. Cuando alguno de ellos es elegido por el usuario, el programa muestra la función de transferencia simbólica del mismo. Para llevar a cabo esto se utilizó el interpretador de LaTeX que posee MATLAB, dentro de una función que se ejecuta cada vez que se presente un cambio en este grupo de botones, esto fue posible utilizando la propiedad '*SelectionChangeFcn*'. Lo anterior se puede ver en la Figura 23.

✓ *Paneles "ajuste basado en" y "métodos de ajuste":* Dentro del panel "*ajuste basado en*", se encuentran los tipos de ajuste que pueden ser escogidos por el usuario, para sintonizar el controlador a través de uno de los métodos que pertenecen a dicha categoría, estos se presentan en el panel "*métodos de ajuste*" y se ilustran en la Figura 23.

✓ *Parámetros del controlador:* En este espacio se presentan los valores de cada parámetro del controlador escogido, una vez realizada la sintonización, además se muestra la función de transferencia del mismo, apreciable en la Figura 23.

✓ *Desempeño del sistema en lazo cerrado:* Esta parte del programa se encuentra mostrada en dos listbox, uno para cada operación del sistema de control ya sea regulador o servomecanismo, donde se muestran todas las características de la respuesta transitoria a un cambio de tipo escalón en la señal de perturbación o en la señal de entrada, igualmente los índices de robustez en frecuencia, ganancia y tiempo, mostrados en la Figura 23.

Figura 23. Ventana de sintonización del controlador, escogido el controlador PI



Fuente: Autores

✓ El gráfico del lugar geométrico de las raíces, únicamente puede ser visualizado cuando la planta ingresada no posea retardo, pues la implementación de éste se realizó utilizando aproximaciones de Padé, lo que afecta sustancialmente este diagrama debido a la inclusión de polos y ceros en la función de transferencia de lazo abierto, por tanto este botón es deshabilitado cuando la planta ingresada posea un tiempo muerto diferente a cero.

✓ Para la curva de robustez ocurre lo contrario que para el diagrama del lugar de las raíces, es decir, la visualización de esta curva es posible sólo si la planta ingresada posee un tiempo muerto diferente de cero, pues este parámetro es necesario para realizar esta gráfica, ya que uno de sus ejes depende del mismo.

✓ Al igual que en las anteriores ventanas, la ventana de sintonización crea mensajes de error cuando se presentan alguno de los siguientes casos:

1. Cuando se presiona el botón sintonizar sin haber escogido el controlador, el tipo de ajuste o el método de sintonización, una de las ventanas de error que se muestra es la siguiente.

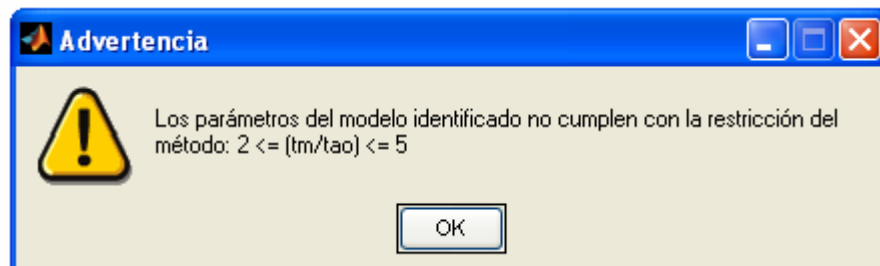
Figura 24. Ventana de error



Fuente: Autores

2. Algunos métodos de sintonización presentan restricciones para su aplicación, si la identificación del proceso no cumple con éstas, la ventana que se muestra en el caso en que esto llegue a suceder es la siguiente.

Figura 25. Ventana de advertencia



Fuente: Autores

✓ Existen métodos de ajuste que para su uso, necesitan que se les ingresen o se escojan ciertos tipos de desempeño de la respuesta del sistema en lazo cerrado, por ejemplo, el sobrepaso máximo deseado, el margen de fase y

ganancia, etc. Algunas de las ventanas que se generan para este fin se presentan en las figuras 35 y 36.

Figura 26. Ventana del método de Ho-Lim

Método de Ho-Lim

Valores deseados de desempeño para el sistema en lazo cerrado

Margen de ganancia: [unidades]
Margen de fase: [grados]

Ingresar

Fuente: Autores

Figura 27. Ventana del método de Vitecková

Método de Vitecková

Desempeño de la respuesta del sistema en lazo cerrado a una entrada escalón

0% de sobrepaso
5% de sobrepaso
10% de sobrepaso
15% de sobrepaso
20% de sobrepaso
25% de sobrepaso

OK

Fuente: Autores

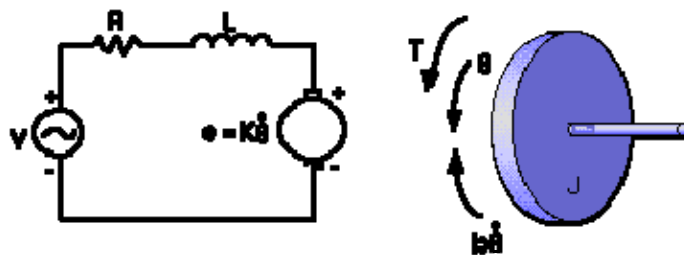
3. PRUEBAS Y RESULTADOS [4], [13]

En este capítulo se buscó demostrar el correcto funcionamiento del programa diseñado, mediante la utilización de cada una de las herramientas que éste posee. Para estas pruebas fueron utilizadas tres modelos de procesos comúnmente aplicadas en el ámbito académico.

3.1 Planta del Motor DC

A continuación, se presenta la función de transferencia del modelo matemático para el motor DC realizado por la Universidad de Michigan, mediante pruebas hechas a un motor real en uno de sus laboratorios, también se muestra la sintonización de un controlador PI para controlar el proceso.

Figura 28. Circuito de la armadura y diagrama de cuerpo libre del rotor para un motor DC



Fuente: Universidad de Michigan.

<http://www.engin.umich.edu/group/ctm/examples/motor/motor.html>

$$\frac{\theta}{V} = \frac{K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2}$$

Donde: θ es la posición angular del eje [rad]

V es la tensión de entrada [V]

K constante de la fuerza electromotriz: 0.01 [Nm/A]

J momento de inercia del rotor: $0.01 \left[\frac{Kg \cdot m^2}{s^2} \right]$

b coeficiente de amortiguamiento del sistema mecánico: 0.1 [Nms]

L inductancia eléctrica: 0.5 [H]

R resistencia eléctrica: 1 [Ω]

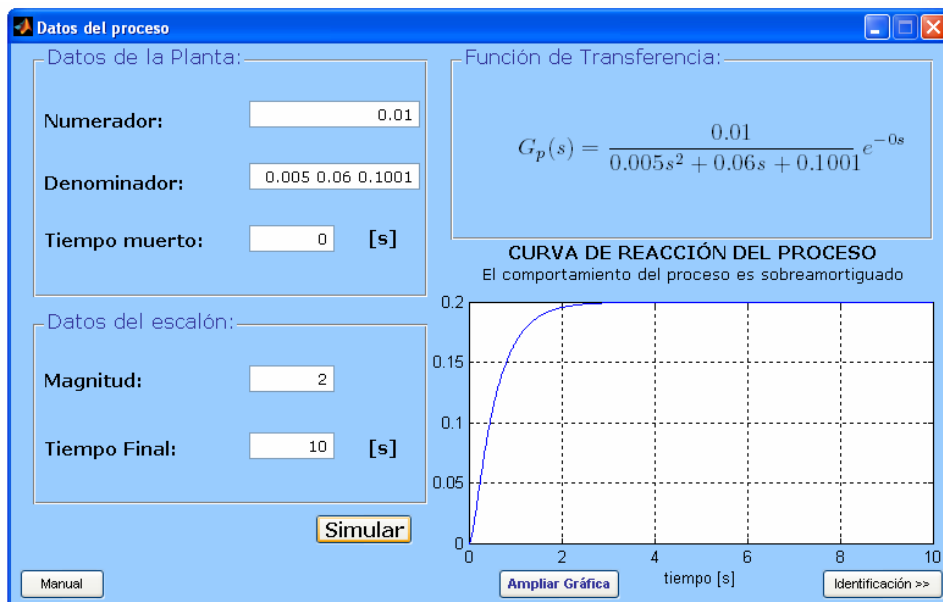
Reemplazando los valores y expandiendo el denominador en términos de potencias de s , se obtiene:

$$G_p(s) = \frac{0.01}{0.005 \cdot s^2 + 0.06 \cdot s + 0.1001}$$

- *Introducción de los datos del proceso*

En la Figura 29, se observa la curva de reacción del proceso a un cambio en la señal de entrada de tipo escalón con magnitud igual a dos y tiempo de aplicación del mismo de 10 segundos, ésta tiene un comportamiento sobreamortiguado.

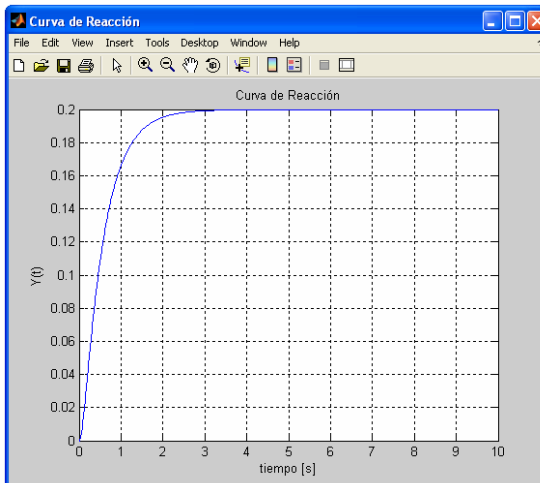
Figura 29. Introducción de datos del proceso



Fuente: Autores

Al presionar el botón “*ampliar gráfica*” se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 30.

Figura 30. Curva de reacción

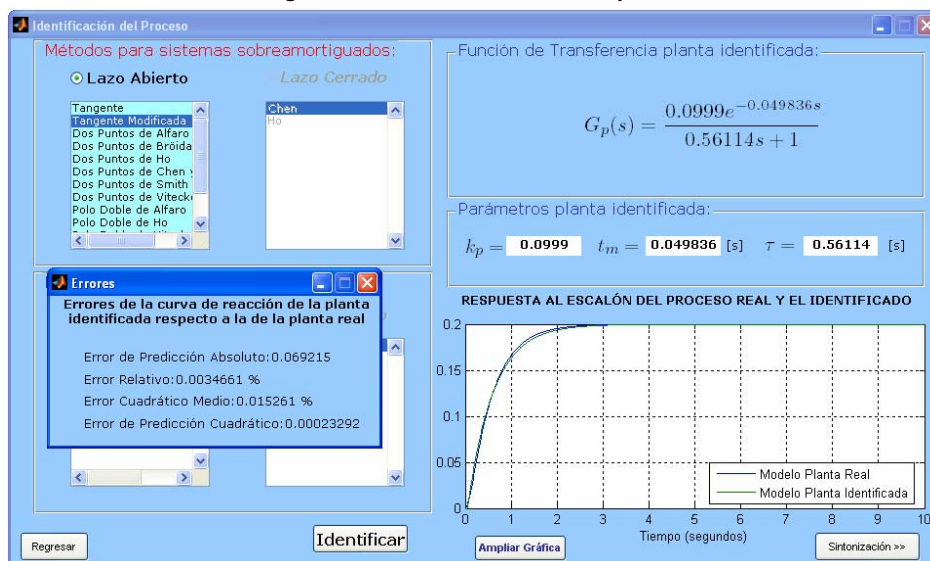


Fuente: Autores

- *Identificación del proceso*

Luego de haber obtenido la curva de reacción del proceso, se procedió a la identificación del mismo mediante todos los métodos de caracterización que pueden identificar dicho proceso.

Figura 31. Identificación de la planta



Fuente: Autores

Tabla 26. Identificación motor DC

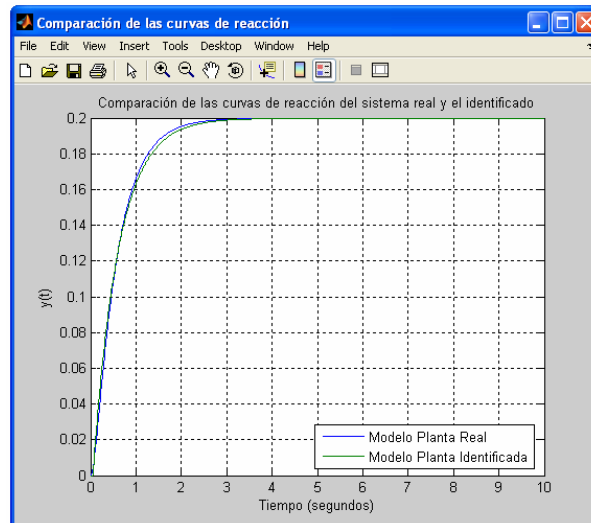
Método de identificación	Error de predicción absoluto	Error relativo (%)	Error cuadrático medio (%)	Error de predicción cuadrático
Tangente	0.43064	0.021566	0.084507	0.0071421
Tangente modificada	0.06921	0.003466	0.01526	0.0002329
Dos puntos de Alfaro	0.02371	0.001187	0.01171	0.00013719
Dos puntos de Bröida	0.06036	0.003022	0.014	0.000196
Dos puntos de Ho	0.03003	0.001504	0.01472	0.000216
Dos puntos de Chen	0.03525	0.0017655	0.01526	0.0002331
Dos puntos de Smith	0.02791	0.001397	0.01209	0.0001462
Dos puntos de Vitecková	0.02532	0.001268	0.01352	0.0001829
Polo doble de Alfaro	0.1437	0.007199	0.04179	0.001746
Polo doble de Ho	0.1896	0.009496	0.05554	0.00308
Polo de Vitecková	0.1454	0.007282	0.04242	0.001799
Tres puntos	0.01509	0.00075	0.00409	1.676e-05
Pormealeu-Poulin	1.8692	0.09360	0.3433	0.11789
Chen lazo cerrado	-	-	-	-
Ho lazo cerrado	-	-	-	-

Los métodos de polo doble, tres puntos y pormealeu, para este ejemplo no son los adecuados para identificar el proceso, ya que estos arrojan un valor de tiempo muerto igual cero. El método que produce los menores errores entre el modelo identificado y la planta real, es el de *dos puntos de Alfaro*, los parámetros del modelo identificado por este método fueron:

$$K_p = 0.0999 \quad t_m = 0.093788 [s] \quad \tau = 0.5122 [s]$$

En la Figura 32, se muestra la figura generada al presionar el botón ampliar gráfica.

Figura 32. Curvas de reacción



Fuente: Autores

- *Ajuste del controlador*

El ajuste del controlador se realizó con todos los métodos que se encuentran habilitados para un controlador PI.

Ajuste como regulador:

Tabla 27. Ajuste como regulador motor DC

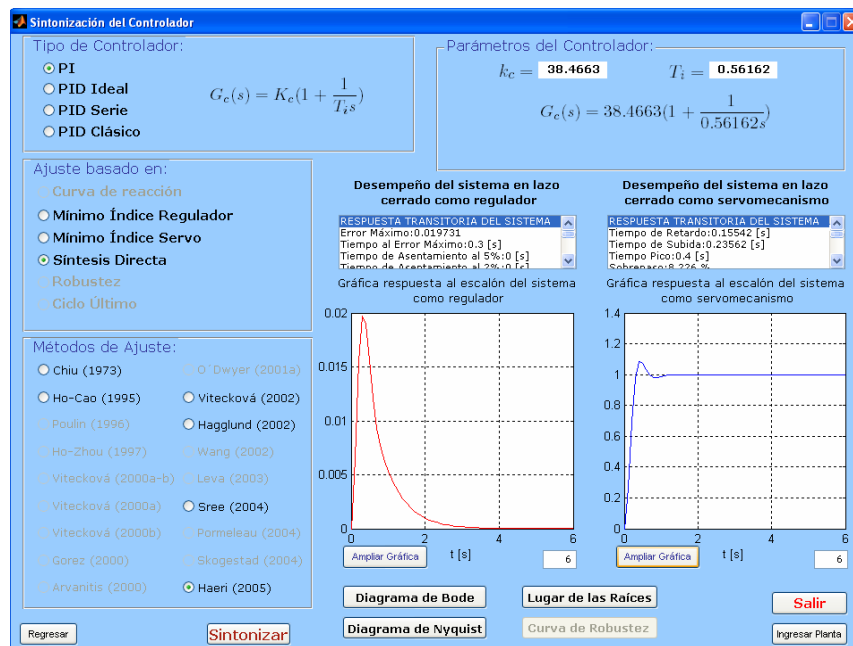
Método de Ajuste	K_c	T_i	Error Máximo	Tiempo al error máximo [s]	Tiempo de asentamiento al 2% [s]
Arrieta (IAE)	48.4051	0.2857	0.015709	0.3	0
Chiu	4.6875	0.5122	0.05409	0.8	2.3
Ho-Cao	32.7125	0.2880	0.02016	0.3	0.3
Vitecková (2002)	23.2376	0.3382	0.0251	0.4	0.5
Sree	41.7372	0.4208	0.01839	0.3	0
Haeri	25.2698	0.5348	0.02543	0.4	0.6

Ajuste como servomecanismo:

Tabla 28. Ajuste como servomecanismo motor DC

Método de Ajuste	K_c	T_i	Sobrepaso (%)	Tiempo pico [s]	Tiempo de subida [s]	Tiempo de asentamiento al 2% [s]
Smith	32.0347	0.09378	70.352	0.4	0.1599	4.3
Arrieta (IAE)	32.9512	0.53089	7.1902	0.5	0.2556	0.7
Chiu	4.6875	0.5122	2.2204e-14	36.1	2.1993	4
Ho-Cao	32.7125	0.2880	23.212	0.5	0.2224	1
Vitecková (2002)	23.2376	0.3382	13.9109	0.6	0.2958	1
Sree	41.7372	0.4208	16.6983	0.4	0.2101	0.6
Haeri	25.2698	0.5348	2.7591	0.6	0.3291	0.7

Figura 33. Ajuste del controlador

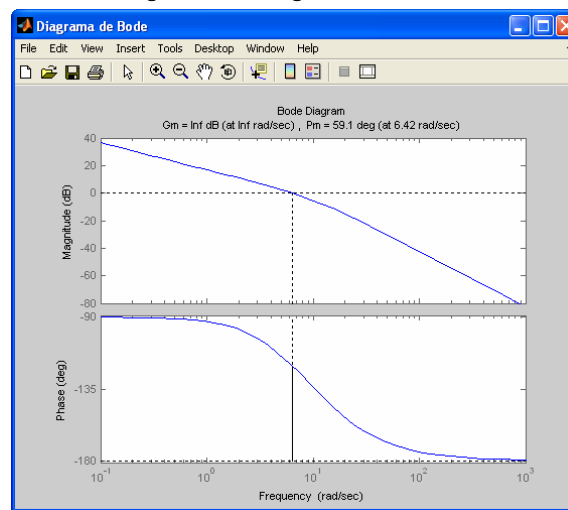


Fuente: Autores

Los botones ampliar gráfica, como su nombre lo indica, ilustran las respuestas del sistema operando como regulador o servomecanismo en figuras independientes para su posterior uso.

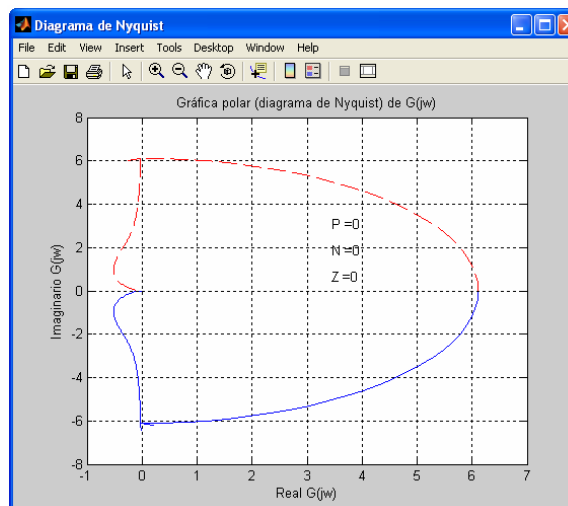
Otras propiedades que posee este programa, es que permite observar el diagrama de Bode, el diagrama de Nyquist y el diagrama del lugar geométrico de las raíces del sistema, estos son mostrados en las figuras 45, 46 y 47 respectivamente.

Figura 34. Diagrama de Bode



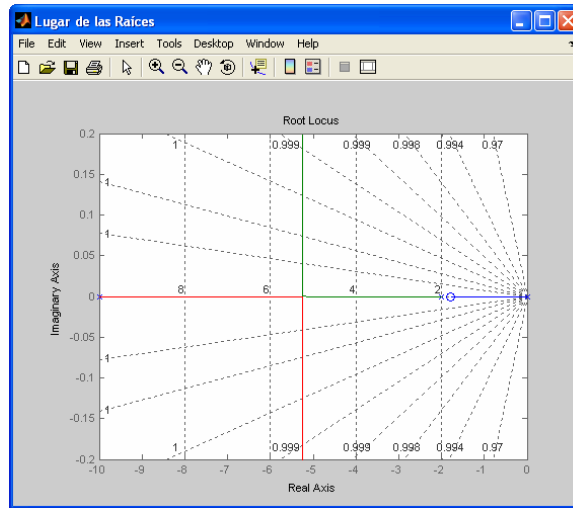
Fuente: Autores

Figura 35. Diagrama de Nyquist



Fuente: Autores

Figura 36. Diagrama del lugar de las raíces



Fuente: Autores

Además de los anteriores diagramas mostrados, también es posible obtener la curva de robustez, pero esto sucede únicamente si la planta ingresada posee un tiempo muerto, como este no es el caso del ejemplo, no se aprecia este diagrama.

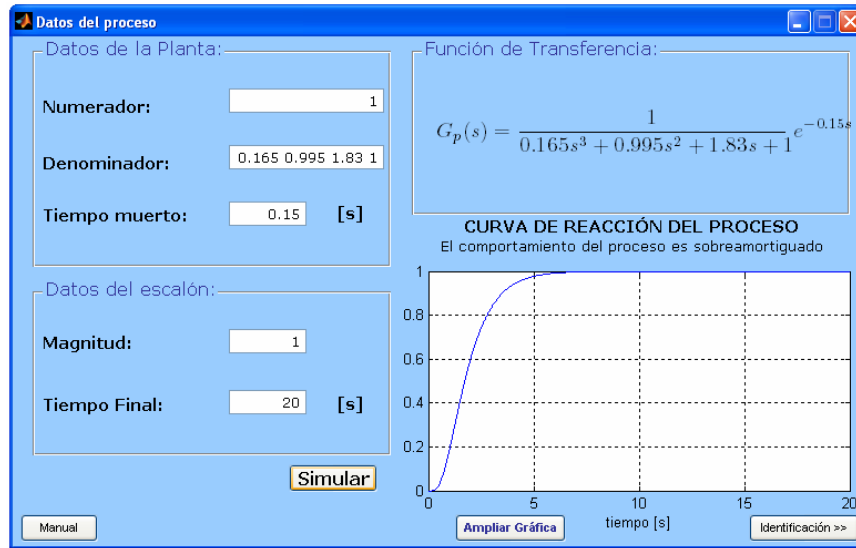
3.2. Planta con tiempo muerto [4]

Para abarcar la totalidad de herramientas que posee el programa, se presenta a continuación una función de transferencia con tiempo muerto, utilizada en otras investigaciones de ajuste de controladores por diferentes autores.

$$G_p(s) = \frac{e^{-0.15s}}{(0.33s+1)(0.5s+1)(s+1)}$$

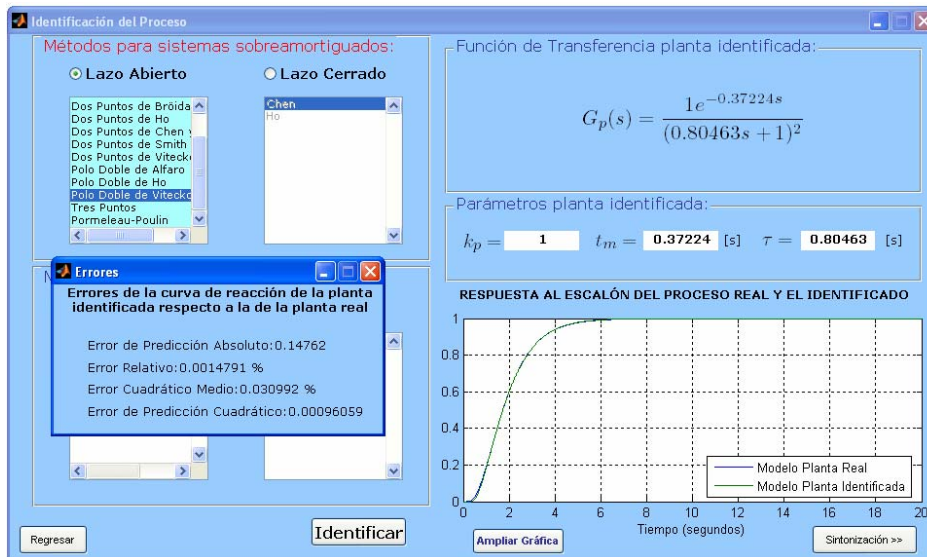
A continuación se identifica la planta mediante un modelo de polo doble más tiempo muerto.

Figura 37. Ingreso de la planta



Fuente: Autores

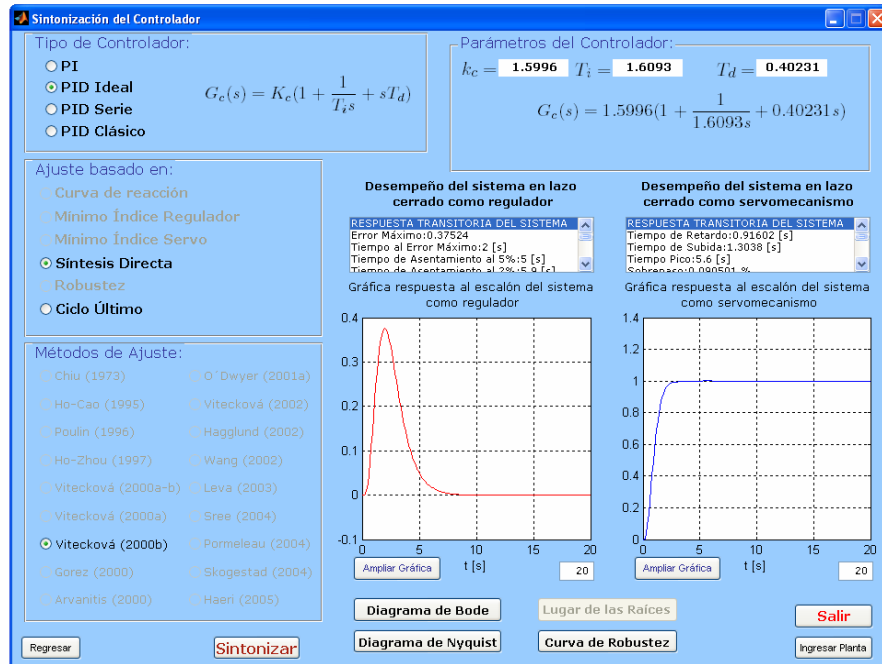
Figura 38. Identificación de la planta



Fuente: Autores

El método de identificación usado fue el de polo doble de Vitecková. Según los errores arrojados esta identificación se puede asumir apropiada.

Figura 39. Ajuste del controlador

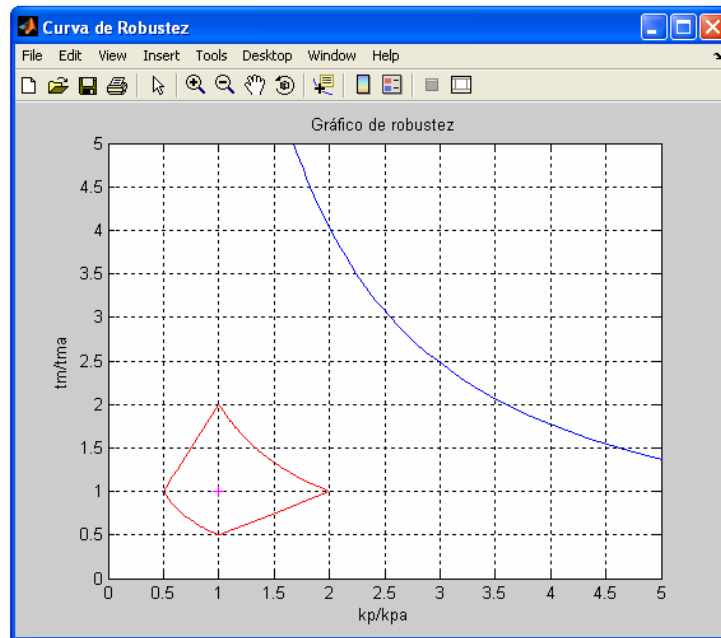


Fuente: Autores

Debido al método de identificación y al controlador escogido, muchos de los métodos de ajuste se encuentran deshabilitados, como se aprecia en la Figura 39; el método de sintonización escogido fue el de vitecková 2000b, donde los valores de los parámetros del controlador PID Ideal se muestran también en la figura.

Como la planta ingresada posee un tiempo muerto diferente a cero, es posible obtener el gráfico de robustez, que se presenta en la Figura 40. Asimismo se pueden obtener los diagramas de Bode y Nyquist.

Figura 40. Curva de robustez



Fuente: Autores

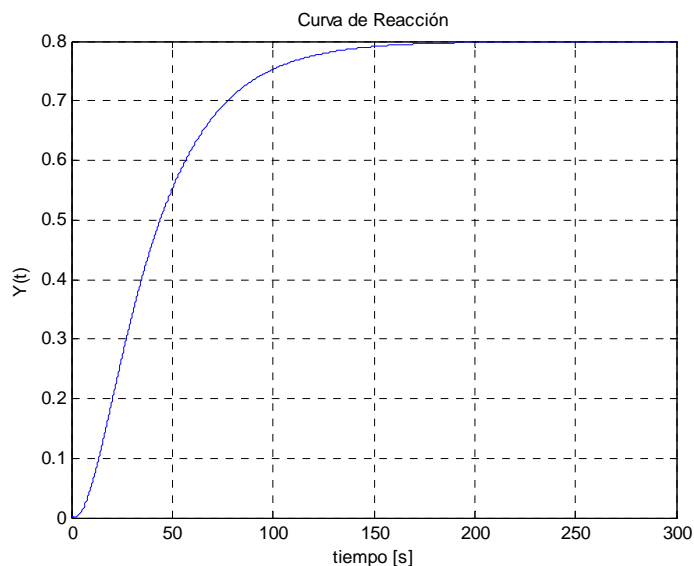
En la gráfica anterior, se puede observar que la curva límite de estabilidad del sistema no cruza por la ventana de robustez límite, lo cual indica que éste se considera altamente robusto.

3.3. Planta circuito de control de temperatura

A continuación se va a identificar por varios métodos la siguiente planta, que corresponde a la función de transferencia combinada de la válvula de control, un intercambiador y el sensor-transmisor, de un circuito de control de temperatura presentado en el libro Control Automático de Procesos de Smith y Corripio, los métodos usados se van a comparar mediante los errores producidos entre el modelo identificado y el proceso real.

$$G_p(s) = \frac{1}{10s+1} \cdot \frac{50}{30s+1} \cdot \frac{0.016}{3s+1}$$

Figura 41. Curva de reacción circuito control de temperatura



Fuente: Autores

El comportamiento de la curva de reacción del proceso es sobreamortiguado, se identificará ésta por todos los métodos que puedan caracterizar este tipo de comportamiento.

Tabla 29. Identificación circuito control de temperatura

Método de identificación	Error de predicción absoluto	Error relativo (%)	Error cuadrático medio (%)	Error de predicción cuadrático
Tangente	137.6947	1.7984	3.2705	10.6972
Tangente modificada	29.4207	0.38426	0.74737	0.55862
Dos puntos de Alfaro	12.797	0.16714	0.4835	0.23379
Dos puntos de Bröida	28.3777	0.37064	0.74412	0.55377
Dos puntos de Ho	11.9412	0.15596	0.63317	0.40094
Dos puntos de Chen	14.4326	0.1885	0.62196	0.38687
Dos puntos de Smith	15.2512	0.1992	0.51344	0.26365
Dos puntos de Vitecková	12.8906	0.16836	0.54703	0.29927
Polo doble de Alfaro	10.0821	0.13168	0.24534	0.060197

Polo doble de Ho	10.0144	0.1308	0.26861	0.07216
Polo de Vitecková	10.4828	0.13692	0.2639	0.069648
Tres puntos	2.7031	0.035305	0.07006	0.0049089
Pormeleau-Poulin	524.1198	6.8455	11.5355	133.0801
Chen lazo cerrado	412.2769	5.3847	8.36	69.8961
Ho lazo cerrado	18.0714	0.23603	0.48518	0.23542

El método de identificación que mejor hace una aproximación del proceso, es el método de *tres puntos*, ya que los errores entre el modelo identificado y el proceso real son los menores. Este método arroja los siguientes parámetros para el modelo:

$$K_p = 0.8 \quad t_m = 2.597 \text{ [s]} \quad \tau_1 = 29.3615 \text{ [s]} \quad \tau_2 = 10.7869 \text{ [s]}$$

Teniendo en cuenta lo anterior, se sintonizará un controlador PID ideal para controlar dicho proceso, mediante los métodos de ajuste que se encuentren habilitados para la identificación realizada por el método de tres puntos.

Ajuste como regulador:

Tabla 30. Ajuste como regulador circuito control de temperatura

Método de Ajuste	K_c	T_i	T_d	Error Máximo	Tiempo al error máximo [s]	Tiempo de asentamiento al 2% [s]
Chiu	13.952	40.1484	7.8887	0.057025	19.3	62.7
Ho-Cao	8.4568	11.2461	10.7869	0.070414	20	63.8
Vitecková (2000a)	7.1114	40.1484	7.8887	0.10548	25.4	86.9
Smith (2003)	2.7422	29.3615	10.7869	0.19598	36.2	100.2
Ziegler	14.3	14.3726	3.5932	0.068195	16.9	27.5
Corripio (1990)	17.875	18.1095	2.8745	0.06181	16	25.6

Mc Millan	11.9167	14.3726	3.5932	0.078698	18.1	44.2
Astrom (1995)	11.1969	13.0676	3.2655	0.08338	18.4	48.1
Tan (1999a)	11.9167	28.7453	3.5932	0.083862	19.3	38.5
Yu	4.7667	14.3726	3.5932	0.14929	25.2	102.3
Robbins	10.725	37.3574	7.1863	0.075464	21	66.6
Smith (2003) ciclo último	17.875	17.9658	2.8745	0.061767	16	25.6

Los métodos que producen un menor error máximo y menor tiempo de asentamiento, como se puede observar de la anterior tabla son: Chiu que pertenece a síntesis directa, Corripio (1990) y Smith (2003) que pertenecen a ciclo último. Estos serían los métodos mas apropiados para ajustar el controlador para el proceso antes mencionado, si el sistema está operando como regulador.

Ajuste como servomecanismo:

Tabla 31. Ajuste como servomecanismo circuito control de temperatura

Método de Ajuste	K_c	T_i	T_d	Sobrepaso (%)	Tiempo pico [s]	Tiempo de subida [s]	Tiempo de asentamiento al 2% [s]
Chiu	13.952	40.1484	7.8887	12.0806	11.9	5.55	18.1
Ho-Cao	8.4568	11.2461	10.7869	15.8556	26.6	7.02	83.6
Vitecková (2000a)	7.1114	40.1484	7.8887	1.2599	22.1	10.66	16.2
Smith (2003)	2.7422	29.3615	10.7869	4.4227	77.8	31.62	115.1
Corripio (1990)	17.875	18.1095	2.8745	56.3308	15.7	5.77	85.9
Mc Millan	11.9167	14.3726	3.5932	50.9697	19.2	7.07	89.9
Astrom (1995)	11.1969	13.0676	3.2655	57.899	20.2	7.30	132.3

Tan (1999a)	11.9167	28.7453	3.5932	32.966	18.6	7.52	62.6
Yu	4.7667	14.3726	3.5932	44.3805	32.5	12.47	147.1
Robbins	10.725	67.7355	7.1863	6.0696	14.9	7.39	73.9
Smith (2003) ciclo último	17.875	17.9658	2.8745	56.5414	15.7	7.56	86.1

De la anterior tabla se puede decir, que los métodos de ajuste que hacen que el sistema operando como servomecanismo, posea menor sobrepaso y menor tiempo de asentamiento son: Vitecková (2000a) que pertenece a síntesis directa, de éste escogiendo la opción de 0% de sobrepaso, y el método de Smith (2003) que pertenece a robustez; sin embargo, los tiempos de asentamiento de este método no son tan pequeños comparado por ejemplo, con el método de Chiu, que arroja un sobrepaso un poco mayor que el método de Smith, pero sus tiempos de asentamientos son mucho menores que los de éste último.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló una herramienta didáctica con interfaz gráfica en MATLAB® (“SIACON”) que permite simular el ajuste de controladores utilizando una gran cantidad de métodos de sintonización comunes y otros actuales en procesos de control lineales y estables.
- Se presentaron las características principales de cada método de ajuste, tales como el modelo de identificación necesario para su aplicación (primer orden más tiempo muerto, polo doble más tiempo muerto, o segundo orden más tiempo muerto); además, criterios de desempeño que el sistema de control compensado presentará con el controlador sintonizado mediante el método escogido, a su vez se muestra la validez de aplicación de cada método.
- La herramienta computacional desarrollada es capaz de mostrar la respuesta en el tiempo de la planta ingresada por el usuario, siempre y cuando los datos ingresados no produzcan algún tipo de error, permitiendo escoger métodos de identificación dependiendo del tipo de prueba que se desee realizar (lazo abierto o cerrado), para aproximar el proceso. Terminada la identificación del proceso, se enseñan diferentes tipos de errores entre el modelo identificado y el real, estos pueden ser tenidos en cuenta por el usuario, como criterio de preferencia entre los diferentes métodos para llevar a cabo la identificación.
- El programa desarrollado permite la elección de diferentes clases de controladores a sintonizar; igualmente, la selección de un tipo de ajuste, así como alguno de los métodos que este contenga, estos estarán habilitados dependiendo de la clase de identificación que se haya realizado previamente debido a las necesidades establecidas por cada método. Como criterio de escogencia entre los métodos de ajuste se muestran todas las características de

la respuesta del sistema de control en lazo cerrado operando como servomecanismo y/o como regulador.

- Otra de las propiedades que posee “*SIACON*”, es la facilidad de mostrar diferentes diagramas de sistemas de control como son: el diagrama de Bode, el diagrama de Nyquist, el diagrama del lugar geométrico de las raíces y la curva de robustez. El lugar de las raíces no será posible de obtener si la planta ingresada posee un tiempo muerto, debido a que éste se implementó mediante aproximaciones de Padé, la cual introduce un número de polos y ceros al sistema de igual cantidad al orden de la aproximación hecha.
- Si se desea tener como criterio de diseño, la robustez del sistema de control, el programa permite mediante el trazo de la curva de robustez, mostrar de una forma gráfica si la sintonización realizada, es la apropiada para que el sistema se considere poco sensible a cambios inesperados en la planta, además son calculados de una forma analítica los valores de ciertos índices de robustez, que pueden ser usados como pautas para determinar si el sistema se hace mas o menos robusto dependiendo de los métodos de ajuste escogidos.
- Se realizó el manual del usuario que permite a cualquier persona con conceptos mínimos de control de procesos manejar de una forma correcta la herramienta diseñada.
- El programa desarrollado tiene una importante utilidad en el curso de control clásico, debido a que puede ser usado como una herramienta didáctica en el estudio del tema de ajuste de controladores, permitiendo estimar el efecto de cada método de sintonización en el desempeño del sistema de control.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda que la Universidad Industrial de Santander, adquiera bibliografía acerca del tema de ajuste de controladores, ya que éste es de gran importancia en la industria del control de procesos, y durante nuestro estudio del tema, no se encontraron suficientes referencias bibliograficas en la biblioteca de la universidad para el desarrollo de este trabajo de grado.
- Se recomienda el estudio del ajuste de controladores para plantas cuyo comportamiento en el tiempo sea inestable, debido a que este tema es de gran interés y puede representar un gran conocimiento aplicable en la vida real.
- Se recomienda la ampliación de este proyecto, de tal forma que sea posible la adquisición de datos de procesos reales, de los cuales se pueda obtener la curva de reacción, para su posterior identificación y sintonización de un controlador.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. ALFARO, Víctor. Identificación de los modelos para los procesos controlados. San José de Costa Rica, 2005, 20 p. Universidad de Costa Rica. Departamento de Automática.

- [2]. ALFARO, Víctor. Métodos de sintonización. San José de Costa Rica, 2005, 53 p. Universidad de Costa Rica. Departamento de Automática.

- [3]. ALFARO, Víctor. Evolución y tendencias en el desarrollo de los métodos de sintonización de controladores PID. San José de Costa Rica, 2004, 77 p. Universidad de Costa Rica. Departamento de Automática.

- [4]. ALFARO, Víctor. Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo cerrado. San José de Costa Rica, 2001, 14 p.

- [5]. ATENCIA, Javier. Aprenda Matlab 6.0 como si estuviera en primero. San Sebastián, 2001. Universidad de Navarra. P. 87

- [6]. CORREA, Carlos Rodrigo. Apuntes de curso Sistemas de Control Clásico y Digital, 2005. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

- [7]. COUGHANOWR, Donald. Process Systems Analysis and Control, Second Edition, McGraw- Hill International Editions, 1991. 566 p.

- [8]. DORMIDO BENCOMO, Sebastián y MORILLA GARCÍA, Fernando. Controladores PID, Fundamentos, sintonía y autosintonía. 2002. Departamento de informática y automática UNED.
- [9]. HERNANDEZ, Adrián. Herramienta para el Análisis del Desempeño y la Robustez de los Lazos de Control DROLAC. San José de Costa Rica, 2005, 199 p. Bachiller en Ingeniería Eléctrica. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Departamento de Automática.
- [10]. O'DWYER, Aidan. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. Second Edition, Imperial College Press, 2006. 545 p.
- [11]. OGATA Katsuhiko. INGENIERIA DE CONTROL MODERNA, Cuarta edición, Prentice Hall, 2003. 965 p.
- [12]. SMITH Carlos A., CORRIPIO Armando B. CONTROL AUTOMATICO DE PROCESOS, TEORIA Y PRÁCTICA. Noriega editores, 1991. 708 p.

Internet

- [13]. Control Tutorials for Matlab. Universidad de Michigan: <http://www.engin.umich.edu/group/ctm/>
- [14]. The MathWorks, Inc: <http://www.mathworks.com/help.html>

ANEXOS

Anexo A. Manual del usuario

**HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA SIMULACIÓN DEL AJUSTE
DE CONTROLADORES
(SIACON)**

MANUAL DEL USUARIO

**SERGIO ANDRÉS MERCHÁN DOMINGUEZ
JORGE MARIO QUIROZ DE LA OSSA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2007**

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNCIONES DEL PROGRAMA	1
2. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	2
3. INSTALACIÓN DEL PROGRAMA	2
4. EJECUCIÓN DEL PROGRAMA	3
4.1 Introducción de los datos del proceso	3
4.2 Identificación del proceso	5
4.3 Ajuste del controlador	7
BIBLIOGRAFIA	12

INTRODUCCIÓN

El programa SIACON es una herramienta que permite la **S**imulación del **A**juste de **C**ONTroladores, creado con el fin de convertirse en un instrumento pedagógico para el curso de Control Clásico.

1. Funciones del Programa

La herramienta SIACON puede realizar las siguientes tareas:

- Introducir la función de transferencia de un proceso.
 - Graficar su respuesta en el tiempo a una entrada escalón.
 - Especificar el comportamiento de la curva de reacción.
- Identificar el proceso ingresado por:
 - Un modelo de primer orden más tiempo muerto.
 - Un modelo de polo doble más tiempo muerto.
 - Un modelo de segundo orden sobreamortiguado más tiempo muerto.
 - Un modelo de segundo orden subamortiguado más tiempo muerto.
 - Graficar la curva de reacción del proceso real y el identificado.
 - Muestra diferentes clases de errores entre el modelo identificado y el real.
- Ajuste de diferentes controladores:
 - PI.
 - PID Ideal.
 - PID Serie.
 - PID Clásico.
- Sintonización de controladores mediante diversos tipos de ajuste:
 - Curva de reacción.
 - Mínimo índice de desempeño: Ajuste regulador.
 - Mínimo índice de desempeño: Ajuste servomecanismo.
 - Síntesis directa.

- Reglas robustas.
- Ciclo último.
- Obtener las características de la respuesta del sistema en lazo cerrado:
 - Sobrepaso máximo.
 - Tiempo al pico.
 - Tiempo de retardo.
 - Tiempo de levantamiento.
 - Tiempos de asentamiento (2% y 5%).
 - Valor final.
 - Error permanente.
- Obtener:
 - Márgenes de fase y ganancia.
 - Índices de robustez.
- Dibujar los siguientes diagramas:
 - Bode.
 - Nyquist.
 - Lugar geométrico de las raíces.
 - Curva de robustez.

2. Requerimientos del sistema

Requerimientos mínimos:

- Procesador Pentium III (o su equivalente) a 800MHz; 256MB memoria RAM.
- MATLAB.
- Resolución de pantalla 1024 x 768 píxeles.

3. Instalación del programa

Pasos a seguir:

1. Abrir el archivo SIACON.zip y extraer los archivos que este contenga en su carpeta de trabajo o el work de MATLAB.

2. Desde la línea de comando de MATLAB, ejecutar el archivo siacon. Se abrirá la ventana de inicio del programa.
3. El programa está listo para usarse.

4. Ejecución del programa

A continuación se explica de manera general como utilizar la herramienta computacional SIACON, es necesario para adquirir destreza en su utilización seguir las siguientes recomendaciones:

4.1 Introducción de los datos del proceso

Para la utilización del programa, es necesario que la función de transferencia del proceso se encuentre expresada en polinomios del numerador y el denominador en formato expandido, ésta herramienta computacional se diseñó únicamente para procesos de segundo orden o superiores, los de primer orden se omitieron debido a su simplicidad y poco uso. Se deben seguir los siguientes pasos para el correcto funcionamiento de “SIACON”:

1. Introducir los coeficientes de los polinomios en los espacios correspondientes en orden descendente, estos se deben ingresar en forma de vector separados entre ellos por espacios o por comas.
2. Introducir el tiempo muerto de la planta si lo posee en formato escalar.
3. Ingresar los datos del escalón de entrada para generar la curva de reacción; estos al igual que el tiempo muerto, se deben introducir en formato escalar. El espacio de *magnitud* corresponde a la amplitud del escalón de entrada y el espacio *tiempo final* corresponde al tiempo de duración del escalón.

4. Presionar el botón simular.

Si se ingresaron los datos correctamente no se presentará ningún mensaje de error y se mostrará la curva de reacción del proceso y su función de transferencia.

Ejemplo:

$$G_p(s) = \frac{0.5e^{-0.3s}}{(s+1)(0.5s+1)} = \frac{0.5e^{-0.3s}}{0.5s^2 + 1.5s + 1}$$

Figura 1. Pasos 1 y 2

Datos de la Planta:

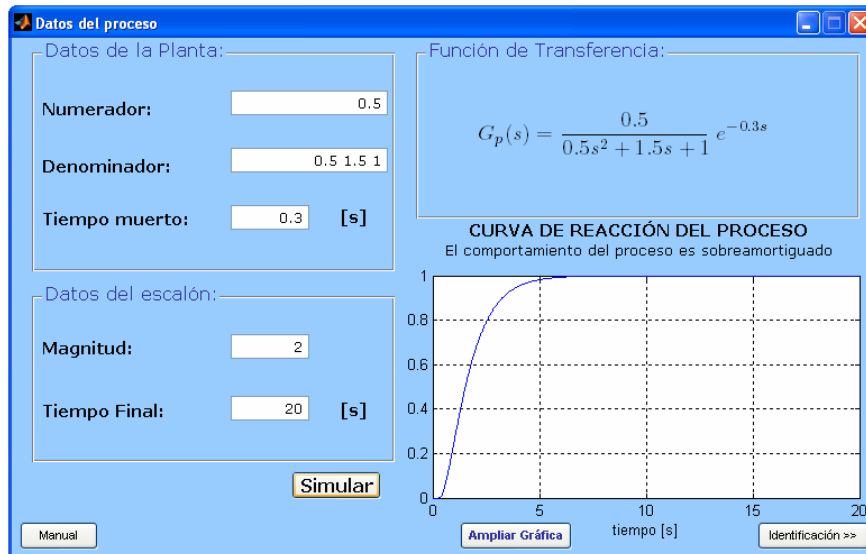
Numerador:	<input type="text" value="0.5"/>
Denominador:	<input type="text" value="0.5 1.5 1"/>
Tiempo muerto:	<input type="text" value="0.3"/> [s]

Figura 2. Paso 3

Datos del escalón:

Magnitud:	<input type="text" value="2"/>
Tiempo Final:	<input type="text" value="20"/> [s]

Figura 3. Paso 4



Si se quiere obtener la gráfica de la curva de reacción de una manera ampliada y para su independiente manipulación, se debe presionar el botón *ampliar gráfica* en la ventana de la figura 3.

Si se desea seguir con la etapa de identificación del proceso, se debe presionar el botón *identificación>>* ubicado en la esquina inferior derecha de la ventana de la figura 3.

4.2 Identificación del proceso

Luego de haber obtenido la curva de reacción del proceso, dependiendo del comportamiento de la respuesta del mismo, el programa realiza una habilitación de los métodos que se pueden utilizar para la identificación del mismo. Para llevar a cabo la identificación adecuadamente, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar el tipo de prueba que se desea realizar (lazo abierto o lazo cerrado). Esto se lleva a cabo mediante la selección de uno de los radio buttons.

2. Una vez seleccionado el tipo de prueba, se habilita su respectivo listbox en donde se presentan los diferentes métodos de identificación que esta prueba contiene. Se debe escoger uno de estos.

3. Presionar el botón *identificar*.

Después de haber realizado los anteriores pasos correctamente, se muestra la curva de reacción del proceso real y la del modelo identificado, también se indica la función de transferencia de éste, al igual que una ventana con diferentes errores entre las respuestas del proceso real y el identificado.

Continuando con el ejemplo anterior:

Figura 4. Pasos 1 y 2

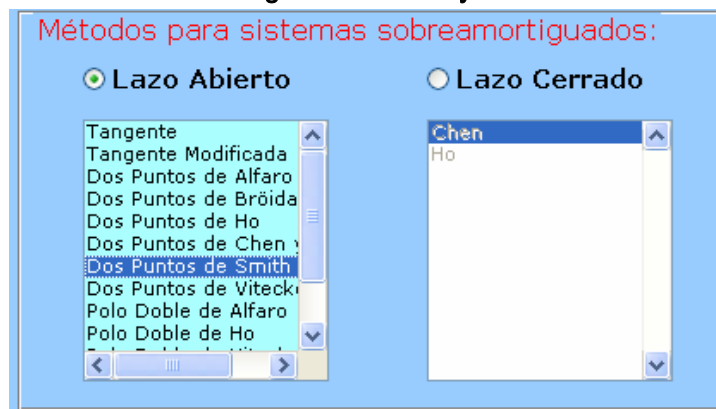
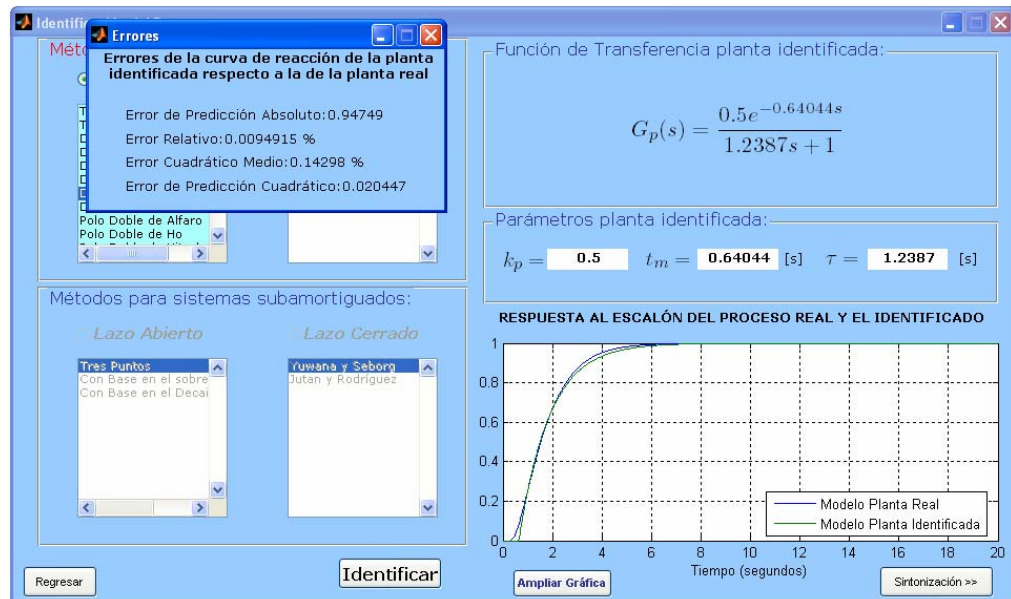


Figura 5. Paso 3



Si se desea cambiar los datos del proceso, el programa permite volver a la ventana de *datos del proceso*, presionando el botón *regresar* en la ventana de la figura 5.

Si se quiere obtener la gráfica de la curva de reacción del proceso real y el identificado de una manera ampliada para su independiente manipulación, se debe presionar el botón *ampliar gráfica* en la ventana de la figura 5.

Una vez identificado el proceso a través del método escogido y si se está satisfecho con éste, es posible avanzar hacia la última etapa del proceso de ajuste, presionando el botón *sintonización >>*, de lo contrario, se puede escoger otro método de identificación.

4.3 Ajuste del controlador

Concluida la etapa de identificación del proceso y dependiendo del método de identificación escogido, se habilitarán los tipos de ajuste y sus correspondientes

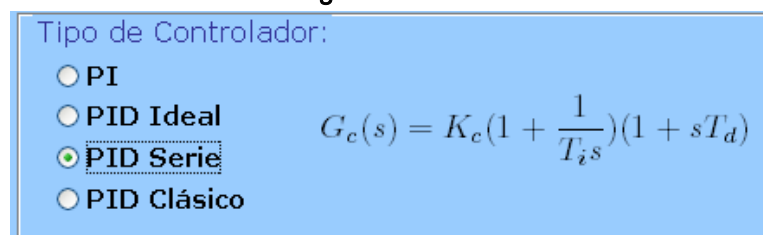
métodos que pueden ser usados para la sintonización del controlador. La forma para realizar la sintonización de una forma correcta es:

1. Escoger el tipo de controlador a ajustar.
2. Seleccionar uno de aquellos tipos de ajuste que se encuentren habilitados.
3. Elegir el método de ajuste por el cual se desea sintonizar el controlador. Algunos de estos generan ventanas extras debido a especificaciones dadas por los autores, ellas deben ser seleccionadas o ingresadas.
4. Ingresar el tiempo de visualización de la respuesta al escalón del sistema en lazo cerrado, operando como regulador o servomecanismo.
5. Presionar el botón sintonizar.

Después de haber realizado los anteriores pasos correctamente, se muestra la respuesta del sistema en lazo cerrado ante una entrada escalón, operando como regulador o servomecanismo junto a sus características, también se indica la función de transferencia del controlador sintonizado.

Continuando con el ejemplo anterior:

Figura 6. Paso 1



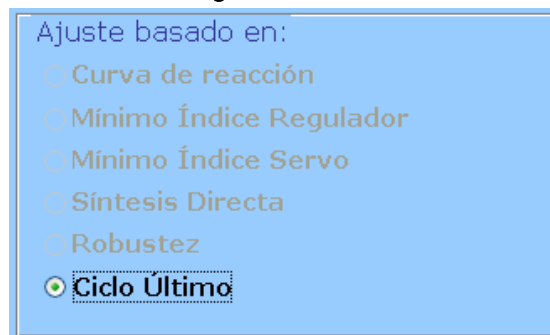
Tipo de Controlador:

- PI
- PID Ideal
- PID Serie
- PID Clásico

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) (1 + sT_d)$$

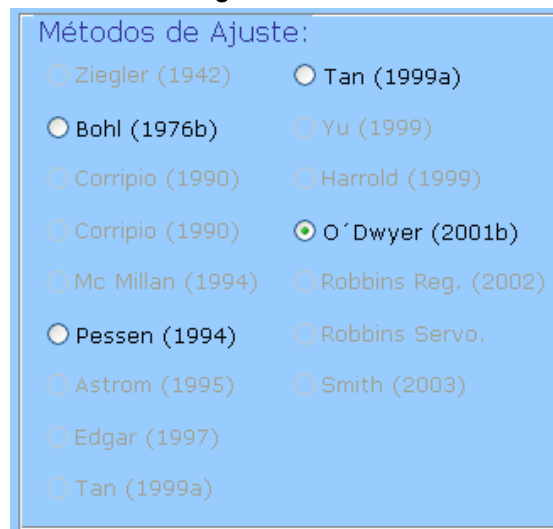
Elección de controlador a sintonizar tipo PID Serie

Figura 7. Paso 2



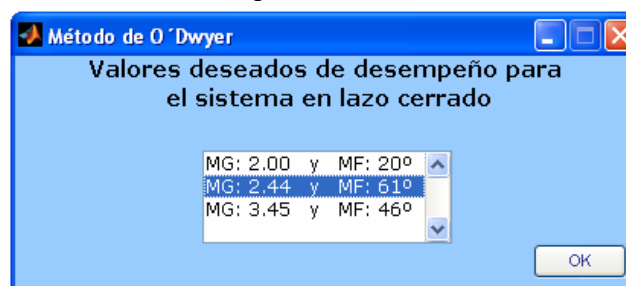
Selección del tipo de ajuste, en este caso únicamente se encuentran habilitados los métodos de ciclo último

Figura 8. Paso 3



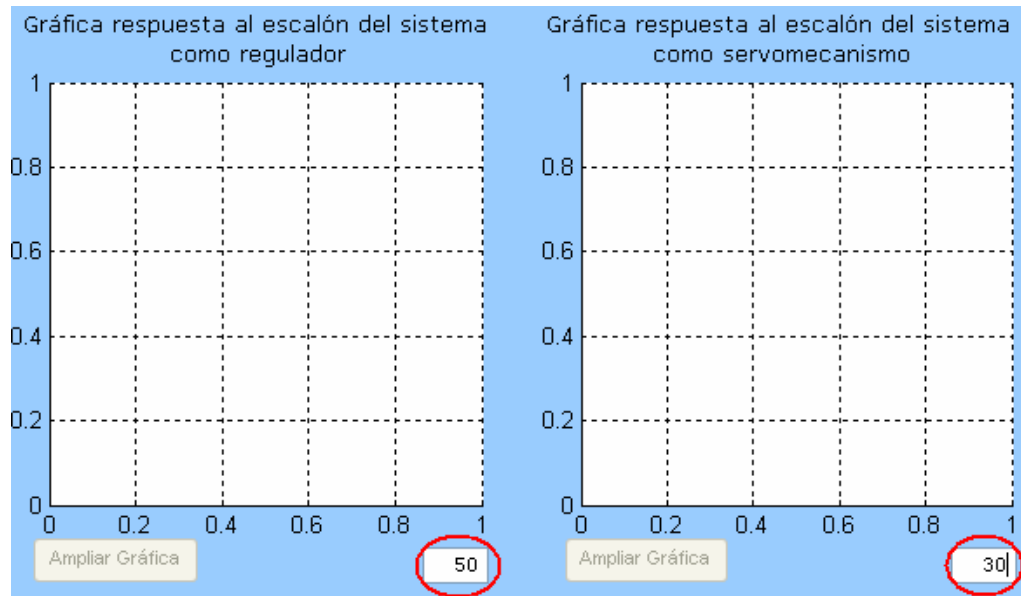
Elección del método de O'Dwyer

Figura 9. Paso 3



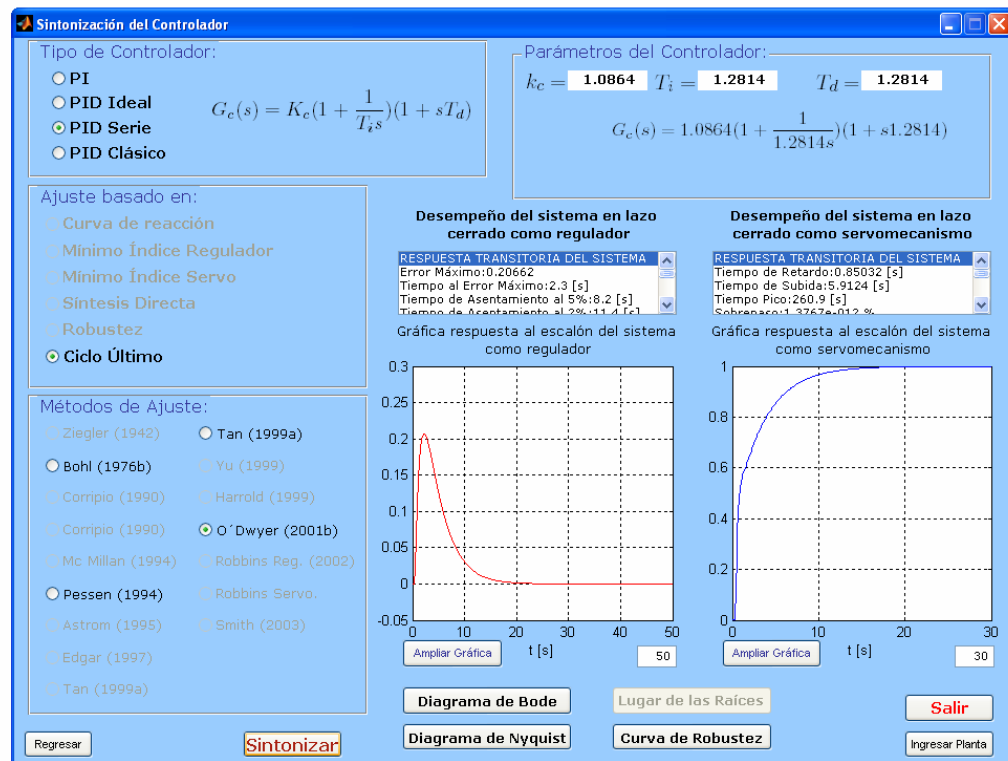
Ventana extra, generada por la escogencia del método de O'Dwyer

Figura 10. Paso 4



Modificación de los tiempos de visualización, a 50 [s] en el caso de regulador, y de 30 [s] para servomecanismo

Figura 11. Paso 5



Si se desea cambiar los datos del proceso, el programa permite volver a la ventana de *datos del proceso* presionando el botón *ingresar planta* en la ventana de la figura 11.

También es posible cambiar el método de identificación del proceso, presionando el botón *regresar* en la ventana de la figura 11.

Si se quiere obtener la gráfica de la respuesta al escalón del sistema en lazo cerrado funcionando como regulador o servomecanismo de una manera ampliada y para su independiente manipulación, se deben presionar los botones *ampliar gráfica* en la ventana de la figura 11.

Realizada la sintonización del controlador, es factible obtener el diagrama de Bode y Nyquist para cualquier planta, mientras que el lugar de las raíces sólo se puede apreciar si la planta no posee tiempo muerto; por el contrario, para la curva de robustez es necesario que la planta posea un tiempo muerto diferente de cero, presionando los respectivos botones.

Si no se encuentra satisfecho con la sintonización hecha, es posible escoger otro método ajuste que se encuentre habilitado.

Si se desea salir de la herramienta, se debe presionar el botón salir.

BIBLIOGRAFÍA

- Merchán Domínguez, Sergio Andrés. Quiroz De la Ossa, Jorge Mario. Herramienta Computacional para la Simulación del Ajuste de Controladores (SIACON). Bucaramanga, 2007, 172 p. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Anexo B. Código fuente del programa

```
function siacon()
clc; clear;

%Dimensiones de la Pantalla (en píxeles)
tPant = get(0,'screenSize');
tVentLar = 0.75*tPant(3);
tVentAlt = 0.6*tPant(4);

%A. LOGOTIPO DEL PROGRAMA:

% A.1. Creación de la Figura
PosVE = [tPant(3)/2-(tVentLar/2) tPant(4)/2-(tVentAlt/2) tVentLar
tVentAlt];
VE = 1; figure(VE); delete(gca); clf;
set(VE,'color',[0.6,0.8,1],'menuBar','none','resize',...
'off','windowStyle','modal','position',PosVE,'numberTitle',...
'off','name',' ','visible','on');

% % A.2. Creación de un Control Axes para Desplegar Imagenes de UIS y E3T
ancho1 = tVentLar/4;
alto1 = tVentAlt/4;

Figura_uis = axes('units','pixels','color',[1,1,1] ,...
'position',[0,0,ancho1,alto1],'XTick',[],'YTick',[],'XColor',...
[0.6,0.8,1],'YColor',[0.6,0.8,1]);
[x,map]=imread('uis.jpg','jpg');
%Representamos imagen en figura, con su mapa de colores
image(x),colormap(map),axis off,hold on
set(Figura_uis,'XTick',[],'YTick',[]);

ancho2 = tVentLar/5.5;
alto2 = tVentAlt/5;
posx = tVentLar - ancho2;
posy = tVentAlt - 0.99*tVentAlt;

Figura_e3t = axes('units','pixels','color',[1,1,1] ,...
'position',[posx,posy,ancho2,alto2],'XTick',[],'YTick',[],'XColor',...
[0.6,0.8,1],'YColor',[0.6,0.8,1]);
[y,map]=imread('e3t.jpg','jpg');
%Representamos imagen en figura, con su mapa de colores
image(y),colormap(map),axis off,hold on
set(Figura_e3t,'XTick',[],'YTick',[]);

% A.3. Creación de una Etiqueta para Desplegar el texto:
% "HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA SIMULACIÓN DEL AJUSTE DE
%CONTROLADORES"
%
%Definición de la posición de la etiqueta
posx = (tVentLar - 0.859375*tVentLar)/2;
posy = (tVentAlt - 0.1*tVentAlt);
largo = 0.859375*tVentLar;
```

```

alto = 0.0434028*tVentAlt;

uicontrol('style','text','position',[posx,posy,largo,alto],'fontName',...
    'verdana','fontSize',15,'fontWeight','bold','string',...
    {'HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA SIMULACIÓN'},...
    'backgroundColor',[0.6,0.8,1],'foregroundColor',[0.2,0.2,0.6]);

posx = (tVentLar-405)/2;
posy = (tVentAlt-0.18*tVentAlt);
largo1 = 0.52734*tVentLar;
alto1 = alto;

uicontrol('style','text','position',[posx,posy,largo1,alto1],'fontName',.
    ..
    'verdana','fontSize',15,'fontWeight','bold','string',...
    {'DEL AJUSTE DE CONTROLADORES'},'backgroundColor',[0.6,0.8,1],...
    'foregroundColor',[0.2,0.2,0.6]);

% A.4 Creación de una Etiqueta para Desplegar el texto: "SIACON"
posx = (tVentLar-320)/2;
posy = (tVentAlt-0.5*tVentAlt);
largo2 = 0.4166667*tVentLar;
alto2 = 0.1302083*tVentAlt;

uicontrol('style','text','position',[posx,posy,largo2,alto2],'fontName',.
    ..
    'Comic Sans MS','fontSize',40,'fontWeight','bold','string',...
    {"SIACON"},...
    'backgroundColor',[0.6,0.8,1],'fontAngle','italic',...
    'foregroundColor',[0.2,0.2,0.6]);

% A.5. Creación de una Etiqueta para Desplegar el texto:
% "UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER"
posx=(tVentLar-ancho1-ancho2)/2;
posy = (tVentAlt-0.85*tVentAlt);
largo3 = 0.546875*tVentLar;
alto3 = 0.0390625*tVentAlt;

uicontrol('style','text','position',[posx,posy,largo3,alto3],'fontName',.
    ..
    'verdana','fontSize',12,'fontWeight','bold','string',...
    'UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER',...
    'backgroundColor',[0.6,0.8,1],'foregroundColor',[0.2,0.2,0.6]);

% A.6. Creación de una Etiqueta para Desplegar el texto:
% "ESCUELAS DE INGENIERIAS ELÉCTRICA"
posx=(tVentLar-ancho1-0.7*ancho2)/2;
posy = (tVentAlt-0.9*tVentAlt);
largo4 = 0.5*tVentLar;
alto4 = alto3;

uicontrol('style','text','position',[posx,posy,largo4,alto4],'fontName',.
    ..
    'verdana','fontSize',12,'fontWeight','bold','string',...
    'ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA',...
    'backgroundColor',[0.6,0.8,1],'foregroundColor',[0.2,0.2,0.6]);

% A.7. Creación de una Etiqueta para Desplegar el texto:
% "ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES"
posx=(tVentLar-ancho1-ancho2)/2;
posy = (tVentAlt-0.95*tVentAlt);
largo5 = largo3;

```

```

alto5 = alto4;

uicontrol('style','text','position',[posx,posy,largo5,alto5],'fontName',.
..
    'verdana','fontSize',12,'fontWeight','bold','string',...
    'ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES',...
    'backgroundColor',[0.6,0.8,1],'foregroundColor',[0.2,0.2,0.6]);

% A.8. Mantener abierta la ventana por 3 segundos, después cerrarla
pause(3);
set(VE,'visible','off');
delete(VE);

%-----
--
%-----
--
%-----
-

%B. VENTANA DE INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA:
clc;

% B.1. Creación de la Figura
tPant = get(0,'screenSize');
tVentLar = 0.75*tPant(3);
tVentAlt = 0.6*tPant(4);

PosVInt = [tPant(3)/2-(tVentLar/2) tPant(4)/2-(tVentAlt/2) tVentLar
tVentAlt];

Vent_int = 2;
figure(Vent_int);
delete(gca);
clf;

set(Vent_int,'menuBar','none','resize','off','windowStyle',...
    'modal','position',PosVInt,'numberTitle','off','name',...
    'Introducción','color',[0.6,0.8,1],'visible',...
    'off');

% B.2. Creación del panel del contenido
posx = tVentLar*0.1;
posy = (tVentAlt-0.55*tVentAlt);
alto = 0.35*tVentAlt;
largo = 0.8*tVentLar;

panelint = uipanel('units','pixels','Position',[posx,posy,largo,alto],...
    'BackgroundColor',[0.878,0.878,0.878]);

% B.3. Creación de la etiqueta que dice: 'Bienvenido a SIACON'
posx2 = (tVentLar-525)/2;
posy2 = (tVentAlt-0.1*tVentAlt);
largo2 = 0.683593*tVentLar;
alto2 = 0.0868055*tVentAlt;

uicontrol('style','text','pos',[posx2,posy2,largo2,alto2],'parent',...
    Vent_int,'fontName','verdana','fontSize',25,'string',['¡Bie',...
    'nvenido a
SIACON!'],'backgroundColor',[0.6,0.8,1],'foregroundColor',...
    [0.2,0.2,0.6]);

```

```

% B.4. Creación de etiqueta donde dice: Qué es SIACON?
posx3 = posx;
posy3 = posy + alto + 0.01*tVentAlt;
largo3 = 0.2604166*tVentLar;
alto3 = 0.0434027*tVentAlt;

uicontrol('style','text','pos',[posx3,posy3,largo3,alto3],'parent',...
    Vent_int,'fontName','verdana','fontSize',13,'string',['Qu',...
    'é es SIACON?'],'backgroundColor',[0.6,0.8,1],...
    'fontWeight','bold','horizontalAlignment','left');

% B.5. Creación de las etiquetas donde se explica qué es SIACON
posx4 = tVentLar*0.11;
posy4 = tVentAlt - 0.26*tVentAlt;
alto4 = 0.05*tVentAlt;
largo4 = 0.75*tVentLar;

uicontrol('style','text','pos',[posx4,posy4,largo4,alto4],'parent',...
    Vent_int,'fontName','verdana','fontSize',11,'string',['SIACON: ',...
    'Simulación del Ajuste de Controladores.'],'backgroundColor',...
    [0.878,0.878,0.878],'horizontalAlignment','left');

posx4b = tVentLar*0.11;
posy4b = tVentAlt - 0.39*tVentAlt;
alto4b = 0.13*tVentAlt;
largo4b = 0.75*tVentLar;

uicontrol('style','text','pos',[posx4b,posy4b,largo4b,alto4b],'parent',...
    Vent_int,'fontname','verdana','fontsize',11,'string',['Herramienta
    ',...
    'computacional que te permite llevar a cabo la sintonización de '...
    'controladores PI o PID mediante algunos métodos de ajuste empiricos
    '...
    'desarrollados a lo largo de la historia del control de procesos
    ',...
    'industriales'],'backgroundColor',[0.878,0.878,0.878],...
    'horizontalAlignment','left');

posx5 = tVentLar*0.11;
posy5 = tVentAlt - 0.515*tVentAlt;
alto5 = 0.1*tVentAlt;
largo5 = 0.78*tVentLar;

uicontrol('style','text','pos',[posx5,posy5,largo5,alto5], 'parent',...
    Vent_int,'fontname','verdana','fontsize',10,'string',['Para el
    correcto ',...
    'funcionamiento de SIACON, se necesita que el diagrama de ',...
    'bloques del sistema de control tenga una realimentación unitaria, si
    '...
    'el'],'backgroundcolor',[0.878,0.878,0.878],'horizontalalignment',...
    'left','fontWeight','bold');

posx5b = tVentLar*0.11;
posy5b = tVentAlt - 0.53*tVentAlt;
alto5b = 0.04*tVentAlt;
largo5b = 0.78*tVentLar;

uicontrol('style','text','pos',[posx5b,posy5b,largo5b,alto5b],'parent',...
    Vent_int,'fontname','verdana','fontsize',10,'string',['diagrama a
    ',...

```

```

    'analizar no lo posee por favor realizar los respectivos
    cambios'],...

    'backgroundcolor',[0.878,0.878,0.878],'horizontalalignment','left',...
    'fontweight','bold');

% B.6. Creación del Botón (Siguiente>>)
posxbsi = tVentLar*0.9;
posybsi = tVentAlt*0.01;
largobsi = 0.0911458*tVentLar;
altobsi = 0.0542534*tVentAlt;

boton1 =
uicontrol('style','pushbutton','pos',[posxbsi,posybsi,largobsi,altobsi],'
parent',...
    Vent_int,'string','Siguiente
>>','backgroundColor',[0.6,0.8,1],'callback',@siguiente1);

% B.7. Creación del Botón (Salir)
posxbsa = tVentLar*0.01;
posybsa = tVentAlt*0.01;
largobsa = largobsi;
altobsa = altobsi;

boton_salir =
uicontrol('style','pushbutton','pos',[posxbsa,posybsa,largobsa,altobsa],'
parent',...

Vent_int,'string','Salir','backgroundColor',[0.6,0.8,1],'callback',@salir
);

% B.8. Mostrar la figura del diagrama de bloques
posxd = (tVentLar-337)/2;
posyd = tVentAlt-0.85*tVentAlt;
largod = 0.43880208*tVentLar;
altod = 0.2126736*tVentAlt;

Figura_diagrama = axes('units','pixels','color',[0.6,0.8,1],...

'position',[posxd,posyd,largod,altod],'XTick',[],'YTick',[],'XColor',...
    [0.6,0.8,1],'YColor',[0.6,0.8,1]);
[y,map]=imread('bloque2.jpg','jpg');
% Se muestra imagen en figura, con su mapa de colores
image(y,colormap(map),axis off,hold on
set(Figura_diagrama,'XTick',[],'YTick',[]);

% B.9. Mostrar la ventana de introduccion
set(Vent_int,'visible','on'); set(panelint,'visible','on');

% B.10. Creación de una estructura global que contiene la informacion del
tamaño
% de la pantalla
h=struct('tPant',tPant,'Vent_int',Vent_int);
global var_glo
var_glo=h;

```

El código del programa no fue publicado en su totalidad en el presente trabajo, debido a que es demasiado extenso, para cualquier inquietud o interés se puede

consultar en el respectivo archivo digital publicado por la biblioteca de la universidad.