



UNIVERSIDAD CATÓLICA

DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y

AUTOMATISMO

TÍTULO:

SIMULACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL DEL PROCESO DE
UN TANQUE O BIORREACTOR A TRAVÉS DE LA PLATAFORMA
LABVIEW

AUTOR:

César Andrés Madrid Luna

Titulación mediante examen complejo

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO

TUTOR:

M. Sc. Luis Córdova Rivadeneira

Guayaquil, Ecuador

2015



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y
AUTOMATISMO

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr.
César Andrés Madrid Luna como requerimiento parcial para la obtención
del título de INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO

TUTOR

M. Sc. Luis Córdova Rivadeneira

DIRECTOR DE CARRERA

MsC. Miguel A. Heras Sánchez.

Guayaquil, al 2 del mes de Octubre del año 2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y
AUTOMATISMO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **César Andrés Madrid Luna**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación mediante examen complejo previo a la obtención del Título de Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, al 2 del mes de Octubre del año 2015

EL AUTOR

CÉSAR ANDRÉS MADRID LUNA



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y
AUTOMATISMO

AUTORIZACIÓN

Yo, **César Andrés Madrid Luna**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación mediante Examen Complexivo, cuyo contenido, ideas y criterios es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Guayaquil, al 2 del mes de Octubre del año 2015

EL AUTOR

CÉSAR ANDRÉS MADRID LUNA

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a Dios por ser mi guía y apoyo incondicional; quien me ayudo a levantarme en esos momentos más difíciles, quien hace lo imposible posible.

A mis padres quienes con mucho esfuerzo y dedicación supieron criarme y cuidarme en todo momento; y su gran amor.

A cada uno de los docentes quienes me supieron enseñar durante todo el transcurso de mi carrera.

EL AUTOR

CÉSAR ANDRÉS MADRID LUNA

AGRADECIMIENTO

Primeramente a Dios, por haberme dado paciencia, sabiduría y fortaleza de lo alto, para no desmayar.

A mis padres por su esfuerzo y dedicación, por su apoyo incondicional.

Además a mi esposa por ser mi compañera, amiga y mujer virtuosa.

EL AUTOR

CÉSAR ANDRÉS MADRID LUNA

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1: Fundamentación Teórica de PID.....	12
1.1. Introducción.....	12
1.2. El control de realimentación o feedback.....	13
1.3. Controlador PID.....	13
1.3.1. Término proporcional.	15
1.3.2. Término Integral.	16
1.3.3. Término derivativo.....	16
1.4. Sintonización de Ziegler-Nichols para controladores PID.....	17
1.4.1. El primer método.	17
1.4.2. Segundo Método.	18
1.5. Entorno de Instrumentación Virtual – LabVIEW.....	19
CAPÍTULO 2: MODELADO Y SIMULACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL DE PROCESOS.....	23
2.1. Introducción.....	23
2.2. Proceso de control de bucle.....	24
2.3. Control de temperatura.....	25
2.3.1. Modelo del sistema de temperatura.	26
2.3.2. Algoritmo del control de temperatura.	28
2.3.3. Paso Respuesta del Sistema de Control de Temperatura.....	29
2.3.3.1. Simulación utilizando MATLAB.....	29

2.3.3.2. Simulación en LabVIEW.....	32
2.4. Control de pH.	37
2.5. Control de la agitación de velocidad.....	40
2.5.1. Model del Motor DC.	40
2.5.2. Algoritmo de control del motor DC.	42
2.5.3. Sistema de Control de realimentación del Motor DC.....	44
2.6. GUI para el control de los parámetros de proceso	46
Conclusión	49
Referencias Bibliográficas.	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1:

Figura 1. 1: Estructura de un controlador PID.....	14
Figura 1. 2: Curva de respuesta para el primer método de Ziegler-Nichols.	17
Figura 1. 3: NI USB-6008.....	21
Figura 1. 4: Misiones OEM Terminal USB-6008	22

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Diagrama de bloques del lazo de control de proceso.	25
Figura 2. 2: Respuesta gradual del sistema térmico.	28
Figura 2. 3: Modelo para el análisis de la respuesta de paso de un sistema de control de retroalimentación.....	30
Figura 2. 4: Respuesta al escalón unitario de simulación del sistema de control térmico utilizando MATLAB.	32
Figura 2. 5: Código de LabVIEW para simulación de control de la temperatura.....	33
Figura 2. 6: Respuesta gradual del diseño del sistema de control térmico usando LabVIEW.	36
Figura 2. 7: Sistema de control de retroalimentación para el parámetro proceso de pH.....	37
Figura 2. 8: Código gráfico para la simulación de control de pH.....	38
Figura 2. 9: Respuesta temporal de salida del regulador de pH para la adición de reactivos.	40
Figura 2. 10: Oscilaciones sostenidas para la prueba de circuito cerrado de Ziegler-Nichols.	43
Figura 2. 11: Código gráfico para la simulación de control de motores DC.	44
Figura 2. 12: Respuesta gradual de la simulación del sistema de control del motor DC usando (a) MATLAB (b) Diseño de Control de LabVIEW y el Módulo de Simulación.....	46
Figura 2. 13: LabVIEW panel frontal para la simulación de control de procesos.	47

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1:

Tabla 1. 1: Primer Método – Ziegler-Nichols..... 18

Tabla 1. 1: Segundo Método – Ziegler-Nichols 19

Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Respuesta escalón del sistema de control térmico en MatLab. . 30

Tabla 2. 2: Respuesta escalón del sistema de control térmico en LabVIEW.
..... 36

Tabla 2. 3: Puntos de señal de respuesta escalón unitario del sistema de
control de motores de CC. 45

CAPÍTULO 1: Fundamentación Teórica de PID.

1.1. Introducción.

El controlador PID es para muchos el algoritmo de control más común. La mayoría circuitos de retroalimentación prácticos se basan en el control PID o algunas variaciones menores de ellos. Muchos controladores ni siquiera utilizan la acción derivada. Los controladores PID aparecen en muchas formas diferentes, como controladores independientes, también pueden ser parte de un paquete de control digital directo (*Direct Digital Control, DC*) o sistema de control de proceso de jerarquía distribuida o que están incorporados en sistemas embebidos.

Miles de ingenieros de instrumentos y control de todo el mundo están utilizando este tipo de controladores en su trabajo diario. El algoritmo PID se puede abordar desde muchas direcciones diferentes. Puede ser visto como un dispositivo que puede ser operado con unas pocas reglas empíricas, pero puede también ser abordados analíticamente.

En este capítulo se ofrece una introducción al control PID. El algoritmo básico y diversas representaciones se presentan en detalle. Se da una descripción de las propiedades del controlador en un bucle cerrado sobre la base de argumentos intuitivos.

1.2. El control de realimentación o feedback.

El éxito del control de realimentación es porque este sistema hace todo más rápido, más preciso y es menos sensible a las perturbaciones. El control de bucle abierto, en cuanto a su sencillez, es sólo aconsejable en sistemas cuando se conocen las salidas y las entradas y en el que no hay ninguna perturbación asociada.

En el sistema con control de realimentación existe una gran desventaja, que es la probabilidad de obtener el sistema inestable, para que el controlador correcto sea elegido, y tiene que ser perfecto para el sistema que se está supervisando. La estructura básica de los sistemas de control de realimentación convencional se muestra en la figura 1.1, utilizando una representación de diagrama de bloques.

1.3. Controlador PID.

Los circuitos de retroalimentación han estado controlando los procesos continuos desde 1700. [2] En la actualidad, hay diversidad de muchos controladores, pero la mayor parte son derivados del controlador PID. Como se mencionó anteriormente "El controlador PID es un algoritmo de control muy común. La mayoría de los circuitos de retroalimentación son controlados por este algoritmo o pequeñas variaciones de la misma".

Un controlador PID es un controlador que incluye el elemento proporcional, "P" el elemento integrante, "I" y el elemento derivado, "D".

Para lo cual $u(t)$ se define como la salida del controlador, entonces la forma final del algoritmo PID es:

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Dónde:

P_{out} , es el término proporcional de salida

K_p , es un parámetro de ajuste de la ganancia proporcional

K_i , es un parámetro de ajuste de la ganancia integral

K_d , es un parámetro de ajuste de la ganancia derivada

e , es el Error = SP – PV

t , es el tiempo o tiempo instantáneo (el presente)

MV , es la variable manipulada

En la figura 1.1 se muestra la estructura simple de un controlador PID.

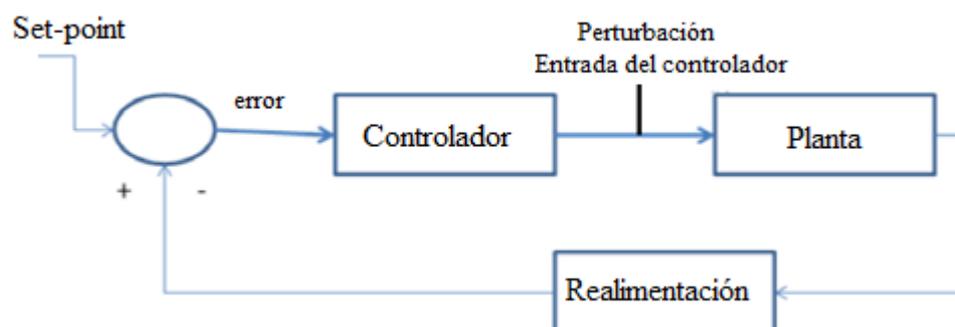


Figura 1. 1: Diagrama de bloques de la estructura de un controlador PID.

Fuente:

- **Planta:** las partes físicas del sistema que se supone que debe ser controlado;

- **Realimentación** – procedente de los dispositivos que miden la variable que queremos controlar;
- **Set-point** - este es un valor, que se convierte en un voltaje que el proceso impulsa hacia él;
- **Error de señal** - error = Set-Point - medición;
- **Perturbación** - una perturbación es todas las cosas que puede conducir a un sistema al error, sin considerar el error de señal ya descrito anteriormente. Una perturbación en el sistema es, por ejemplo, la interferencia en el sistema eléctrico.
- **Controlador** - el controlador puede ser considerada como la parte más importante de este sistema. Se leerá de Set-point, procesando el error y da como salida a la Planta. Es muy importante que el sistema funcione correctamente, y para eso hay varios métodos de ajuste de la constante hablada. Estos métodos serán explicados en las siguientes secciones.

1.3.1. Término proporcional.

La influencia proporcional es directamente proporcional al error generado, y el término proporcional viene dada por:

$$P_{out} = K_p e(t)$$

Cuanto mayor sea el error mayor es el control proporcional que se ve claramente en la ecuación. Esta conclusión nos lleva a otra que es: el control proporcional lleva el sistema a un punto de ajuste rápido. Pero tiene una

desventaja, que tiene error de estado estacionario, y que el error puede provocar un sobrecalentamiento cuando el sistema llega al punto de ajuste. Una forma de evitarlo es aumentar el término proporcional, pero que puede conducir a un sistema inestable.

1.3.2. Término Integral.

La influencia integral es directamente proporcional a la variación del error en función del tiempo. El término integral está dado por:

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

El beneficio más importante es que este término elimina el error de estado estacionario, pero tiene una desventaja que es el hecho de que la estabilidad del sistema se ve afectado. En cuanto a la ecuación superior podemos concluir que este término integral depende de los valores de paso del error.

1.3.3. Término derivativo

El término derivado es directamente proporcional a la tasa de cambio del error, como podemos ver en la siguiente ecuación del término derivado:

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

Este término hace una estimación del error futuro y porque puede aumentar o disminuir la velocidad de la corrección, ya que puede trabajar de

forma temprana cuando no se detectan cambios en el error. Este término es muy sensible a las perturbaciones.

Si el término derivado sólo cambia con la tasa de cambio del error, si el error no cambia, entonces no tenemos influencia derivada.

1.4. Sintonización de controladores PID de Ziegler-Nichols.

1.4.1. Primer método.

El primer método de Ziegler-Nichols, se aplica a las plantas con respuestas a un escalón de la forma que se muestra en la figura 1.2. Para Gahinet, P., Chen, R., & Eryilmaz, B. (2013), este tipo de respuesta es típico de un sistema de primer orden, tales como la inducida por el flujo de un fluido. También es típica de una planta compuesta de una serie de sistemas de primer orden.

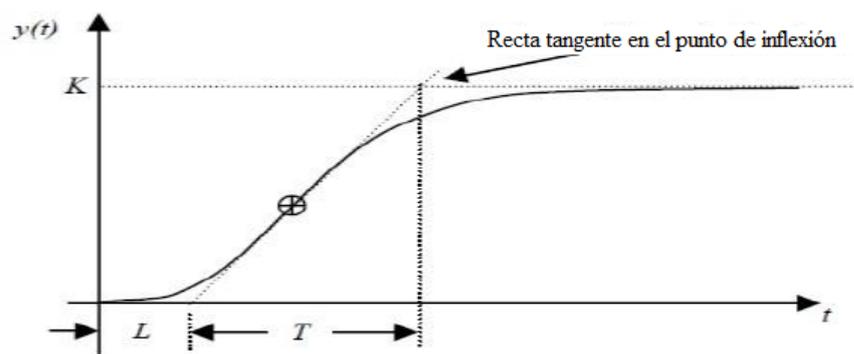


Figura 1. 2: Curva de respuesta para el primer método de Ziegler-Nichols.

Fuente: Gahinet, P., Chen, R., & Eryilmaz, B. (2013).

La respuesta se caracteriza por dos parámetros, el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . Se pueden encontrar dibujando una tangente a la

respuesta al escalón en su punto de inflexión (pendiente máxima) y observando sus intersecciones con el eje del tiempo y el valor de estado estacionario (véase la figura 1.2). Por consiguiente, el modelo de la planta sería:

$$G(s) = \frac{Ke^{-sL}}{T_s + 1}$$

Para lo cual Ziegler y Nichols derivan los siguientes parámetros de control basadas en este primer modelo y que se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1. 1: Primer Método de Ziegler-Nichols

Tipo de PID	K_p	$T_i = K_p/K_i$	$T_d = K_d/K_p$
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fuente: Ruiz, V. M. A. (2011).

1.4.2. Segundo Método.

El segundo método de Ziegler-Nichols según Adhikari, N. P., Choubey, M., & Singh, R. (2012), se dirige a las plantas que pueden llegar a ser inestables bajo control proporcional. Esta técnica tiene que ser aplicada en sistemas de bucles cerrados, ya que esta técnica requiere el uso de controladores PID.

Los pasos para la sintonización de un controlador PID a través del segundo método son los siguientes:

Usando sólo el control de retroalimentación proporcional:

1. Reducir la integración y las ganancias derivadas a 0;
2. Aumentar K_p a partir de un valor bajo, que puede variar dependiendo del sistema, hasta cierto valor crítico $K_p = K_{cr}$ en donde se producen oscilaciones. Si no se produce entonces otro método tiene que ser aplicado. Hay que tener en cuenta las oscilaciones que son de igual periodo, de lo contrario no son razonables de aplicar;
3. Anote el valor K_{cr} y el mismo período de oscilación sostenida, P_{CR} .

En la tabla 1.2 se especifican las ganancias del controlador mediante el segundo método de sintonización de controladores PID.

Tabla 1. 2: Segundo Método de Ziegler-Nichols

Tipo de PID	K_p	T_i	T_d
P	$0.5k_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1.2}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{2}$	$\frac{P_{cr}}{8}$

Fuente: Ruiz, V. M. A. (2011).

1.5. Entorno de Instrumentación Virtual – LabVIEW.

LabVIEW es un entorno de programación gráfica; que hace posibles las lecturas de valores y su manipulación.

Esta plataforma está basada en Instrumentos Virtuales (*Virtual Instruments, VI*), cada uno de ellos está constituido por el ambiente de trabajo y el diagrama de bloques. El ambiente de trabajo tiene todo el usuario «cosas», como demostración gráfica, etc., y el diagrama de bloques es donde toda la programación va oculta para el usuario.

El software LabView puede ejecutar varios VI's al mismo tiempo sin interferencias entre ellos, y en cada programa VI es posible ejecutar varias tareas al mismo tiempo para cada dato creado, que pueden ser de almacenamiento del ordenador o incluso imprimirse, o simplemente lanzado por el usuario.

LabVIEW tiene un grupo de estructuras de base, aquellas estructuras que el programador no puede cambiar, pero que se pueden utilizar de diferentes maneras, esas estructuras se denominan "bloques". Esta plataforma ha hecho que el trabajo sea mucho más fácil, ya que tiene muchas ventajas:

- Programación más rápida;
- La integración de hardware con LabView;
- Incorpora Análisis y Procesamiento de Señales avanzado;
- Mostrar datos e interfaces de usuario;
- Múltiples destino y sistemas operativos (OS);
- Enfoque de programación múltiple;
- Almacenamiento y presentación de informes de datos;

- Servicios de software, capacitación y apoyo;
- Intercambio de archivos y colaboración con los usuarios de LabVIEW en todo el mundo.

El dispositivo que se utilizó para adquirir las señales de datos, fue el NI USB 6008 tal como se muestra en la figura 1.3.



Figura 1. 3: NI USB-6008.

Fuente: Osorio, J. A. C., & Luna, R. A. F. (2012).

El dispositivo NI USB-6008 dispone de algunos puertos, entre los cuales se detallan a continuación:

- 8 entradas analógicas (*12 bits, 10 kS/s*);
- 2 salidas analógicas (*12 bits, 150 S/s*); 12 E/S digitales; contador de 32 bits;
- Bus alimentado para alta movilidad; incorporado en la conectividad de la señal;
- Versión OEM disponible;

- Compatible con LabVIEW, LabWindows/CVI y Measurement Studio para Visual Studio .NET;
- Software controlador NI-DAQmx y software de registro de datos interactiva NI LabVIEW SignalExpress LE.

El National Instruments USB-6008 ofrece la funcionalidad básica de adquisición de datos para aplicaciones tales como el sencillo registro de datos, mediciones portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Es lo suficientemente potente como para la medición sofisticada, con excepción de los estudiantes.

+5 V	34	33	PFI 0
D GND	32	31	P1.3
P1.2	30	29	P1.1
P1.0	28	27	P0.7
P0.6	26	25	P0.5
P0.4	24	23	P0.3
P0.2	22	21	P0.1
P0.0	20	19	D GND
LED	18	17	D+
VBUS	16	15	D-
AI GND	14	13	AI GND
AI 4 (AI 0-)	12	11	AI 0 (AI 0+)
AI 5 (AI 1-)	10	9	AI 1 (AI 1+)
AI 6 (AI 2-)	8	7	AI 2 (AI 2+)
AI 7 (AI 3-)	6	5	AI 3 (AI 3+)
AI GND	4	3	AI GND
AO 1	2	1	AO 0

Figura 1. 4: Misiones OEM Terminal USB-6008
Fuente: Guide, U., & Specifications, N. I. (2011).

CAPÍTULO 2: MODELADO Y SIMULACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL DE PROCESOS.

2.1. Introducción.

La herramienta de programación gráfica, LabVIEW es el más ampliamente utilizado en los experimentos de hardware de circuitos remotos y sistemas de control. También es posible utilizar los instrumentos virtuales en el control de los parámetros del sistema de proceso biorreactor que se extiende el medio ambiente local de control de proceso a las prácticas de experimentación remoto.

Una de las estrategias de control de genéricos es el algoritmo de control PID (Proporcional, Integral y Derivativo) que se emplea para controlar los parámetros del proceso en las industrias y en muchos sistemas de control avanzados. Los algoritmos de control y las técnicas descritas en esta sección tienen dos aspectos diferentes de uso. Uno de los aspectos es que puede ser utilizado con fines educativos en la enseñanza y el aprendizaje de los sistemas de control. El otro aspecto es que también se puede extender a la experimentación remota mediante el control de los sistemas reales utilizando circuitos de adquisición de datos y de acondicionamiento de señal para interactuar con componentes físicos reales.

Este capítulo describe el modelado matemático del sistema de proceso "biorreactor" y los algoritmos de control para los parámetros de proceso tales como la temperatura, pH y velocidad de agitación. Las funciones de acceso remoto de LabVIEW se pueden utilizar para integrar todas las funciones de control y medición de VI con la World Wide Web. Los algoritmos completos son diseñados e implementados a través del módulo de diseño de control y simulación, NI LabVIEW 8.5.

2.2. Proceso de control de bucle

La estructura del bucle de control para operaciones de control de proceso se muestra en la figura 2.1, que también se conoce sistema de retroalimentación negativa SISO (entrada única, salida única). La función básica del controlador, es ejecutar un algoritmo basado en las entradas de control (coeficientes), el valor de funcionamiento deseado (punto de ajuste) y el valor del proceso actual.

La diferencia entre la variable de proceso y el valor de ajuste se llama error, que es procesada por la función de control con coeficientes sintonizados adecuados para mantener el error cercano a cero. Si el error no es cero, el controlador hace el ajuste adecuado mediante la manipulación del actuador. El transductor detecta la salida del proceso y la convierte a una cantidad eléctrica equivalente para formar la variable de proceso en el punto de adición. Las especificaciones de tiempo y el número de muestras que se

procesan en cada simulación de control son elegidos en base a los parámetros de control de la planta.

Los instrumentos virtuales se desarrollaron para mostrar las variables de proceso, para establecer parámetros de control e indicar las acciones de control resultantes del entorno de proceso. El ambiente de control completo se ha creado, utilizando el módulo de simulación de control de LabVIEW con la elección apropiada de los modelos de función de transferencia para cada parámetro de control.

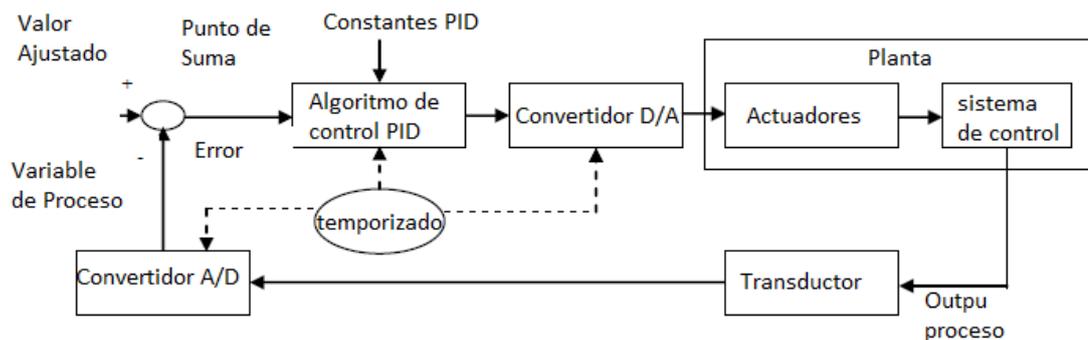


Figura 2. 1: Diagrama de bloques del sistema de control de proceso de lazo.
Elaborado por: Autor

2.3. Control de temperatura.

En muchas aplicaciones, tales sistemas como el de la calefacción eléctrica, el elemento de calentamiento es controlado por un contactor que tiene sólo dos estados (encendido o apagado). El calentador eléctrico controla la temperatura del líquido en un tanque y el objetivo es controlar la temperatura en el valor deseado. La temperatura del líquido se detecta mediante el sensor de temperatura y se compara con la temperatura deseada para formar la señal de error. La señal de error se procesa

utilizando algoritmos de control para producir la salida deseada para el controlador del calentador.

El sistema de control de realimentación opera en el sistema de calefacción para mantener la temperatura establecida en el valor requerido para la reducción del error hacia cero.

2.3.1. Modelo del sistema de temperatura.

La mayoría de los sistemas de control de temperatura se pueden aproximar a una sola orden de función de transferencia con un retraso o retardo de transportación y constante de tiempo que depende de los parámetros tales como el coeficiente de calor específico, el coeficiente de temperatura, etc.

La función de transferencia del sistema de temperatura, donde un líquido a temperatura “ θ ” entra en un tanque que se calienta con un calentador eléctrico y “ q ” es el flujo de calor del elemento de calentamiento con constante k de velocidad de flujo, el coeficiente de calor específico P , la resistencia térmica del aislamiento del tanque R y la capacitancia térmica de agua C , viene dada por:

$$\frac{\theta(s)}{q(s)} = \frac{b}{s + ab}$$

Dónde a y b son:

$$a = kP + \frac{1}{R}$$

$$b = \frac{1}{C}$$

Según el método Ziegler-Nichols, para procesos en bucle abierto se puede aproximar mediante la siguiente función de transferencia:

$$H_T(s) = K \frac{e^{-sT_d}}{1 + sT_i}$$

Los coeficientes K , T_d y T_i se encuentran para un simple lazo abierto de respuesta escalón unitario del proceso. La respuesta escalón para el sistema de proceso tiene un retraso inicial de 30 s y toma 230 s para subir de 10° a 60° (diferencia=50) tal como se muestra en la figura 2.2. De ahí que los coeficientes de la función de transferencia se obtienen como $K = 50, T_d = 30s, T_i = 230$ s y sustituyendo estos en la ecuación anterior, queda:

$$H_T(s) = 50 \frac{e^{-30s}}{1 + 230s}$$

Esta ecuación, rige el modelo matemático de un sistema de calefacción, que controla el proceso de temperatura y coeficientes de control adecuados que son calculados para el funcionamiento estable del sistema.

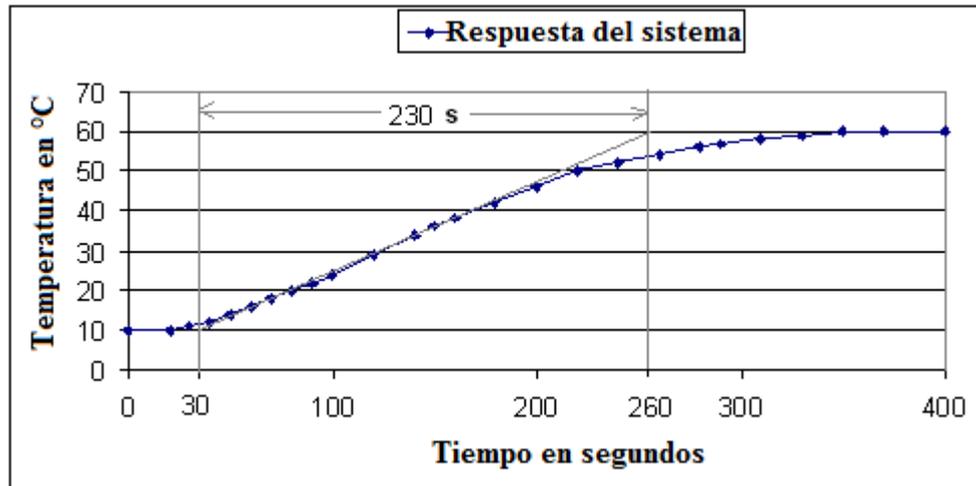


Figura 2. 2: Respuesta escalón del sistema térmico.

Elaborado por: Autor

2.3.2. Algoritmo del control de temperatura.

Los controladores PID son los más utilizados en los controladores de proceso de control de temperatura. Los parámetros de ajuste se calculan utilizando el algoritmo de Ziegler Nichols basada en lazo abierto y pruebas de sistema de circuito cerrado en funciones de transferencia. Haciendo referencia a la función de transferencia descrita en la última ecuación. Los coeficientes PID se calculan utilizando la regla de Ziegler-Nichols basado en la respuesta al escalón de modelo del sistema, donde:

La constante proporcional, es:

$$K_p = \frac{1.2T_i}{KT_d} = 0.184$$

La constante integral, es:

$$T_i = 2T_d = 60$$

La constante de derivada, es:

$$T_D = 0.5T_d = 15$$

La función de transferencia del controlador PID está dada por,

$$U_T(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

Sustituyendo los valores de los coeficientes de sintonización, la ecuación anterior queda así:

$$U_T(s) = 0.184 \left(1 + \frac{1}{60s} + 15s \right)$$

2.3.3. Respuesta escalón o transitoria del Sistema de Control de Temperatura

La respuesta escalón para el sistema de control de temperatura se obtiene primero utilizando MATLAB y luego se ilustra con el diseño de control y módulo de simulación de LabVIEW. La simulación en MATLAB da la respuesta ideal para el sistema de control de realimentación diseñado, pero se espera que la aplicación en LabVIEW sea más estable, y que pueda ser extendido directamente al sistema en forma real.

2.3.3.1. Simulación utilizando MATLAB

El modelo para el análisis de control de la temperatura con la función de transferencia del sistema $H_T(s)$ de bucle abierto y la función de transferencia del controlador PID $U(s)$ se muestra en la figura 2.3.

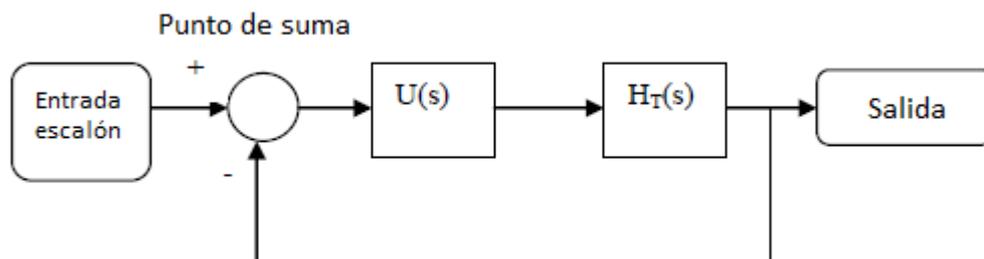


Figura 2. 3: Modelo para el análisis de la respuesta escalón de un sistema de control retroalimentado.

Elaborado por: Autor

La entrada escalón se la denomina en la simulación como SI (*Step Input*). La función de transferencia en bucle abierto del sistema de control de temperatura está dada por,

$$G_T(s) = U_T(s)H_T(s) = e^{-30s} \frac{(138s^2 + 9.198s + 0.1533)}{(230s^2 + s)}$$

A continuación se presenta el código de MATLAB para generar la respuesta al escalón del sistema de retroalimentación:

```
G = tf([138 9.198 0.1522],[230 1 0],'inputdelay', 30);
GA = pade (G,3);
H = feedback (GA,1);
T = 0:1:300;
S = step (H,T);
trama (T,S);
```

La respuesta al escalón se muestra en la figura 3.4 y las grabaciones en los instantes de tiempo específicos se dan en la tabla 3.1.

Tabla 2. 1: Respuesta escalón del sistema de control térmico en MatLab.

Sl. No.	Tiempo en segundos	Amplitud
1	0	-1.5
2	10	0
3	20	0
4	30	0.3
5	40	1
6	60	1.68
7	80	1.3
8	100	0.97
9	150	1.12
10	200	0.97
11	250	0.97
12	300	1

Elaborado por: Autor

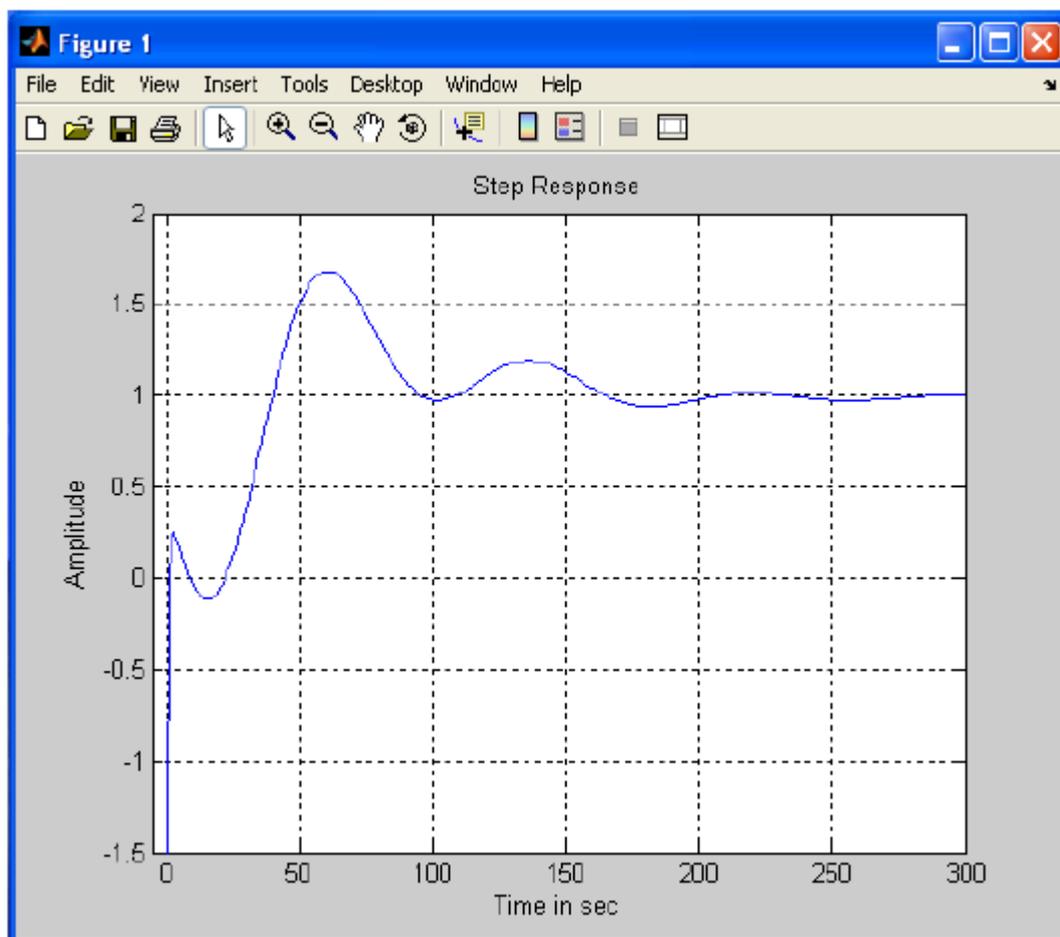


Figura 2. 4: Respuesta al escalón unitario de simulación del sistema de control térmico utilizando MATLAB.

Elaborado por: Autor

2.3.3.2. Simulación en LabVIEW.

La simulación de control PID utilizando LabVIEW para el entorno de control de temperatura se muestra en la figura 2.5. El diseño de control y módulo de simulación de LabVIEW de funciones tales como, bucle de simulación, generación de señales escalón, señales aritméticas y gráficas se utilizan en el desarrollo de programación gráfica en LabVIEW. El integrador ($1/s$) sigue produciendo la salida $H(s)$ del sistema en coherencia con el punto de ajuste.

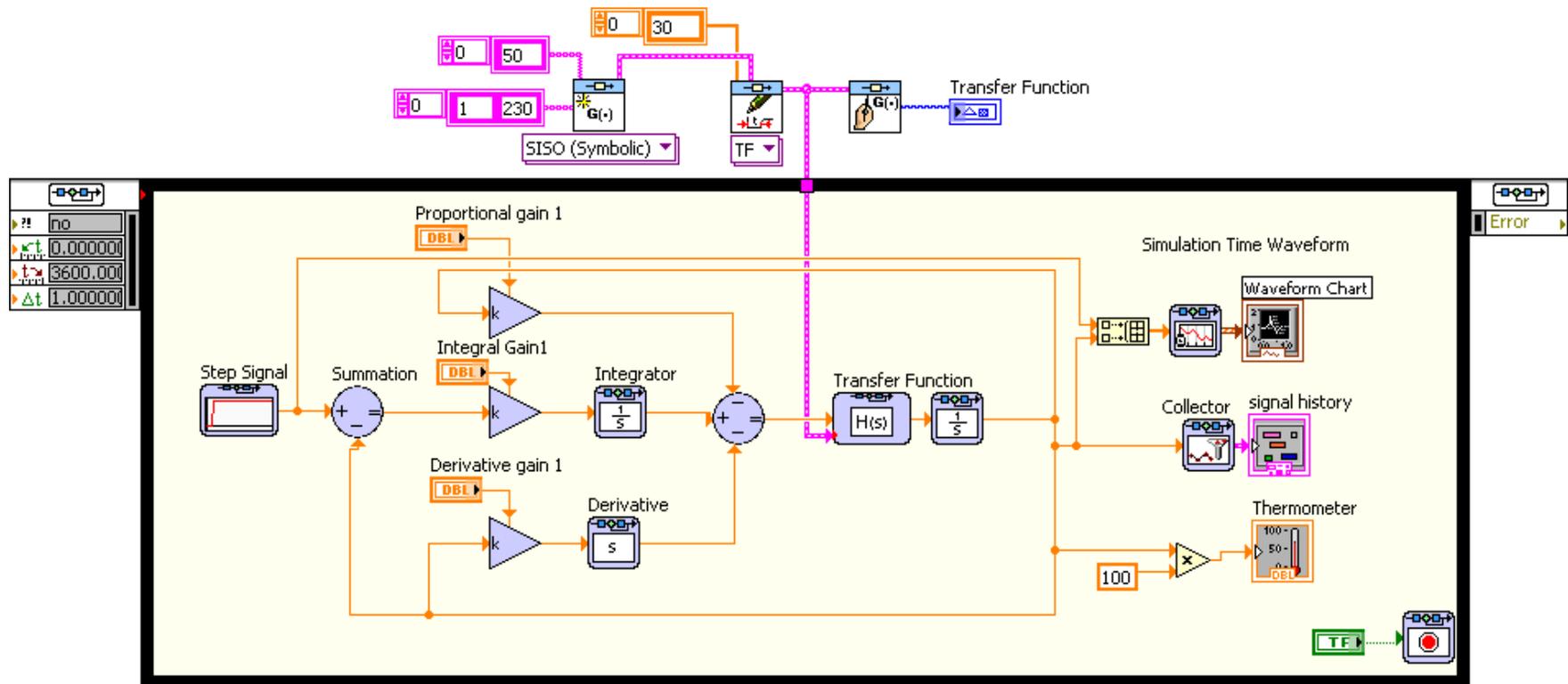


Figura 2. 5: Código de LabVIEW para simulación de control de la temperatura.

Elaborado por: Autor

Uno de los problemas con el controlador PID es el derivado "kick" conocido en inglés como "derivative kick", que hace que la señal de error para darle "kick" en la salida cuando el punto de ajuste cambia bruscamente. Esto se evita en la práctica moviendo el término derivativo al bucle de retroalimentación. El término proporcional, también puede causar un aumento repentino en la salida y también es común para pasar al bucle de retroalimentación.

Estos cambios se han incorporado en el desarrollo de la simulación de control PID para el sistema de la temperatura tal como se muestra en la figura 2.5. La entrada al controlador de temperatura es el flujo de calor y la salida es la temperatura del líquido. El modelo de controlador es el algoritmo matemático que proporciona una entrada para el modelo del sistema, $H(s)$ en función del error.

El escalado se realiza sobre el valor de ajuste y el valor de salida se mide en el panel frontal de LabVIEW. Suponiendo que el rango de entrada de temperatura sea entre 0 y 100°C con el valor escalado de 0.01 en la entrada de la unidad de diferencia, se elige el valor de escala de 100 (inversa de valor de escalado en la entrada) para visualizar la salida de temperatura en el panel frontal.

En tiempo real el entorno de control del sensor de temperatura se puede aproximar en $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ y produce un cambio de voltaje de salida

analógico $\Delta V_o = \pm \Delta T / 100$, en donde ΔT es el cambio en temperatura en $^{\circ}\text{C}$.

Los valores de la respuesta escalón en instantes de tiempo específicos para la simulación de LabVIEW se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2. 2: Respuesta escalón del sistema de control térmico en LabVIEW.

Sl. No.	Tiempo en segundos	Amplitud
1	0	0
2	20	0.13
3	40	0.373
4	60	0.586
5	80	0.74
6	100	0.842
7	200	0.989
8	300	0.999

Elaborado por: Autor

La respuesta de salida del sistema de control térmico de realimentación para una respuesta escalón unitario se muestra en la figura 2.6.

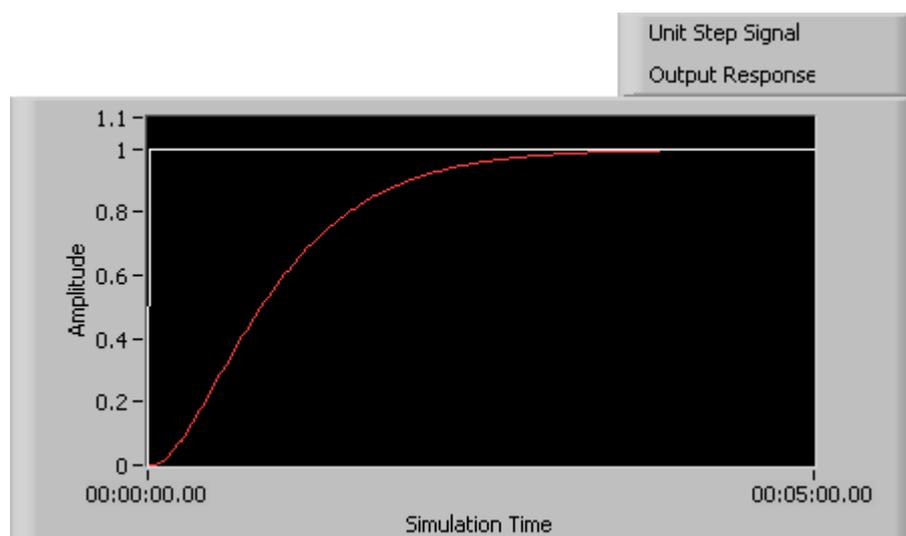


Figura 2. 6: Respuesta escalón del sistema de control térmico usando LabVIEW.

Elaborado por: Autor

2.4. Control de pH.

En la vida real, los biorreactores realmente utilizan el control de encendido y apagado para el pH. El sistema de control de dos posiciones está diseñado de modo que el elemento de control de la adición del reactivo siempre se establece en una de dos posiciones, o bien completamente abierta o completamente cerrada.

La consideración importante en el control del pH, es el tiempo de retención, que se requiere para proporcionar el tiempo de reacción de neutralización. Para completar este proceso se controla mediante el algoritmo de control proporcional para generar accionamientos para la adición de reactivos como se muestra en la figura 2.7 y la simulación correspondiente en LabVIEW se describe en la figura 2.8.

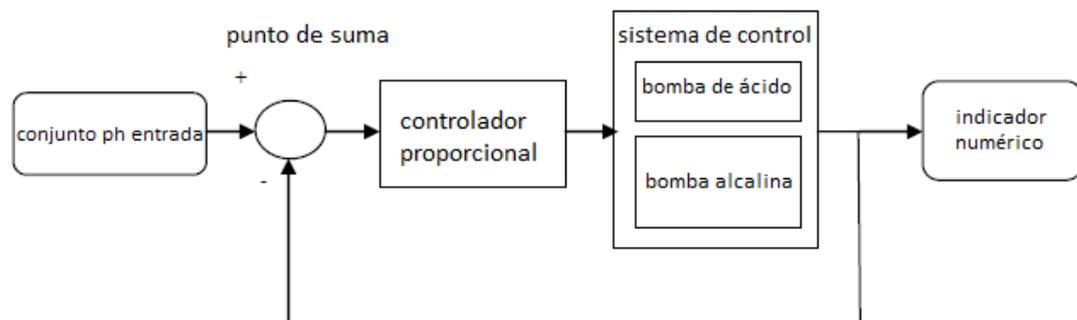


Figura 2. 7: Sistema de control de retroalimentación para el parámetro del proceso de pH.

Elaborado por: Autor

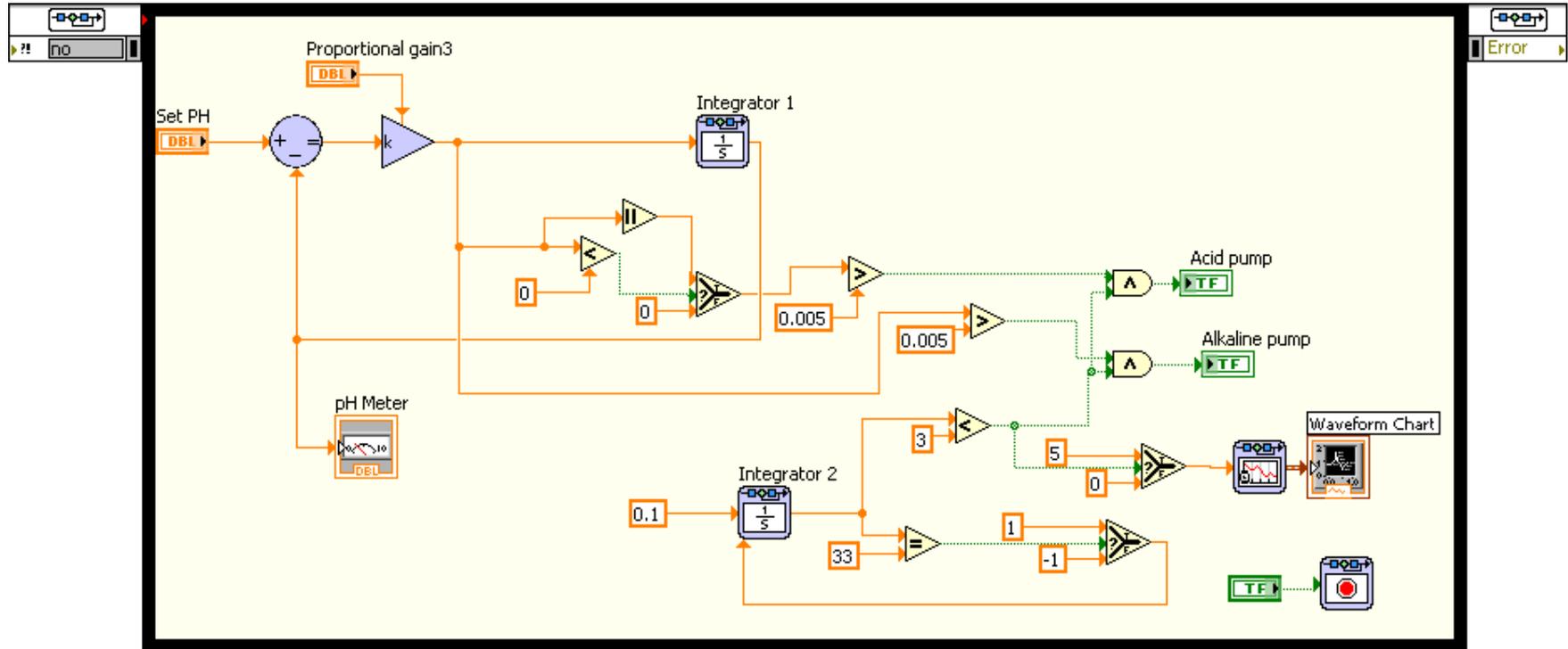


Figura 2. 8: Código gráfico para la simulación de control de pH.

Elaborado por: Autor

El bucle de control contiene un controlador proporcional y la salida de pH se simula mediante la función Integrador-1. Sobre la base de la polaridad de la salida proporcional, las señales de control se generan para operar las alcalinas o bombas de ácido con un tiempo de retención predefinido. La constante proporcional K_p se establece como 0.05.

La función Integrador-2 del VI se utiliza para establecer el tiempo de espera entre las adiciones sucesivas de los reactivos. Un sistema de encendido-apagado debe tener tiempo de retención de 5 minutos o más y el tiempo de mezclado debe ser inferior a 20% del tiempo de retención hacia arriba.

Los parámetros de bucle de simulación como el tamaño del paso y la velocidad del reloj se fijan en 0.1 s y 1 KHz respectivamente. Los cálculos de los tiempos de retención y de las bombas de ácido/alcalino se calculan de la siguiente forma: el integrador-2 incrementa en escalones de 0.1 para cada ejecución con el valor de entrada de 0.1 y el límite superior se establece en 33 como conteo. Integrador-2 se restablece a 0 una vez que se alcanza el límite superior. Se tarda aproximadamente 5.5 minutos (330 s) para alcanzar el límite superior 33. La señal de control se activa durante 30 s, que es 10% del tiempo de retención de las bombas alcalinas o ácidas. El bucle de simulación está diseñado para un tiempo de retención de 5 minutos con 30 segundos de adiciones de los reactivos y la respuesta de tiempo de la salida del regulador de pH se muestra en la figura 2.9.

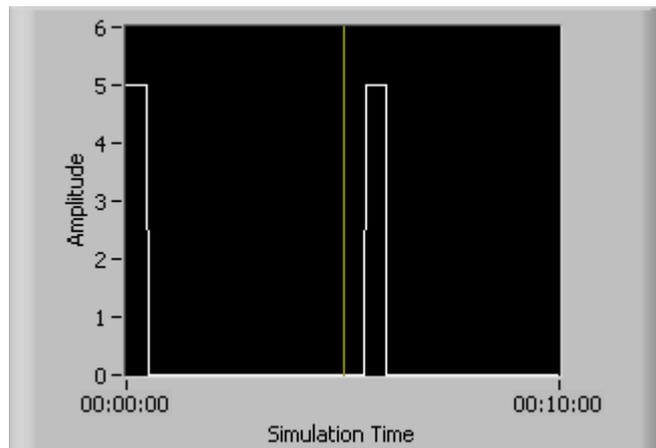


Figura 2. 9: Respuesta escalón de salida del regulador de pH para la adición de reactivos.

Elaborado por: Autor

2.5. Control de la velocidad de agitación.

En aplicaciones de control de procesos, la excitación y la agitación son controladas por el motor de corriente continua utilizando un algoritmo PID. El controlador PID está diseñado sobre la base de las especificaciones del motor de corriente continua y los coeficientes de ajuste correspondientes se pueden calcular.

2.5.1. Modelado del Motor DC.

El sistema para controlar la velocidad de agitación es modelado por un motor de corriente continua (DC) de imán permanente y por una función de transferencia, que sería la relación de la velocidad angular de salida $\omega(s)$ con la tensión de entrada $v(s)$ y que está dada por:

$$H_M(s) = \frac{\omega(s)}{v(s)} = \frac{K}{JLs^2 + (JR + bL)s + (Rb + K^2)}$$

Donde k es la constante de torsión o torque, J es el momento de inercia, R es la resistencia, L es la inductancia y b es el coeficiente de amortiguación.

Suponiendo que las especificaciones del motor son: voltaje $V = 12\text{ V}$, potencia $P = 80\text{ W}$ y velocidad máxima de $N = 1000\text{ rpm}$, la inercia del rotor $J = 0.01$, las otras constantes se calculan utilizando las ecuaciones del motor.

La máxima velocidad angular ω_m se calcula utilizando la velocidad máxima del motor y está dada por la relación:

$$\omega_m = \frac{2\pi N}{60} = \frac{V}{K}$$

K y ω_m se obtienen utilizando la ecuación anterior como 0.1146 y 104.71 rad/s respectivamente. La torsión del motor T está relacionada con la corriente I y la potencia P por la fórmula:

$$T = KI = \frac{P}{\omega}$$

Mientras que el coeficiente de amortiguación se calcula considerando la siguiente ecuación:

$$J \frac{d\omega}{dt} + b\omega = KI$$

En estado estacionario, la ecuación anterior, se convierte en:

$$KI - b\omega = 0, \quad \therefore \frac{d\omega}{dt} = 0$$

Utilizando las ecuaciones de la torsión del motor y del estado estacionario, los valores de T, I y b , para el correspondiente valor de $\omega = \omega_m$ dan como resultado $0.764 [Nm]$, $6.66 [A]$ y 0.0073 respectivamente. Sustituyendo estos valores en la función de transferencia del motor y suponiendo que $R = 1\Omega$ y $L = 0.5 H$, entonces la ecuación de $H_M(s)$ se convierte en:

$$H_M(s) = \frac{0.1146}{0.005s^2 + 0.01365s + 0.0204}$$

Esta última ecuación, representa el modelo matemático del motor y los mecanismos de control de realimentación tienen que ser diseñados para mantener la velocidad deseada en aplicaciones de procesos industriales.

2.5.2. El algoritmo de control del motor.

Los coeficientes de ajuste se calculan utilizando el segundo método de Ziegler-Nichols ya explicado en el capítulo 1, en el que el sistema está obligado a generar oscilaciones sostenidas utilizando controladores proporcionales y los coeficientes de ajuste son calculados a través del período de oscilaciones prolongados y la constante de proporcionalidad.

La oscilación prolongada para el sistema representado en la anterior ecuación $[H_M(s)]$ se muestra en la figura 2.10 y el período de oscilación en

estado estacionario se calcula como $P_u = 3 s$. Las oscilaciones prolongadas se generan para la ganancia proporcional $K_u = 0.485$ y se conoce como ganancia final. Utilizando las constantes K_u y P_u , se calculan los coeficientes del controlador PID.

Los coeficientes calculados del controlador PID son las constantes: proporcional $K_p = 0.6K_u = 0.291$, integral $T_i = 0.5P_u = 1.5$ y derivativa $T_D = 0.125P_u = 0.375$.

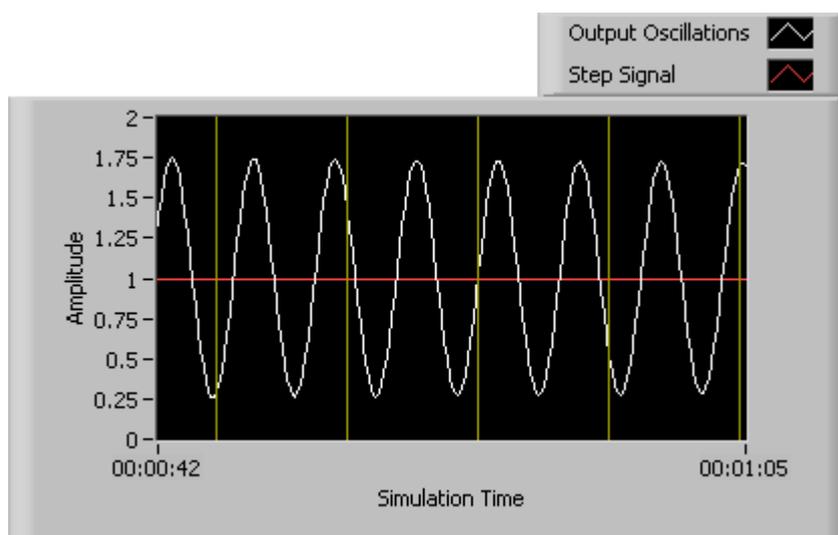


Figura 2. 10: Oscilaciones prolongadas para la prueba de circuito cerrado de Ziegler-Nichols.

Elaborado por: Autor

La función de transferencia del controlador PID se obtiene sustituyendo los valores K_p , T_i y T_D en la siguiente ecuación:

$$U_M(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right)$$

$$U_M(s) = 0.291 \left(1 + \frac{1}{1.5s} + 0.375s \right)$$

2.5.3. Sistema de Control de realimentación del Motor DC.

La función de transferencia en bucle abierto del sistema de control del motor de corriente continua está dada por:

$$G_M(s) = H_M(s)U_M(s) = \frac{0.0125s^2 + 0.333s + 0.222}{0.005s^3 + 0.02615s^2 + 0.0204s}$$

Con esta expresión se obtiene la respuesta escalón para el sistema de control unitario de realimentación como una función de transferencia en bucle abierto a través de las plataformas de simulación MatLab y LabVIEW. El bucle de control de la simulación gráfica se muestra en la figura 2.11.

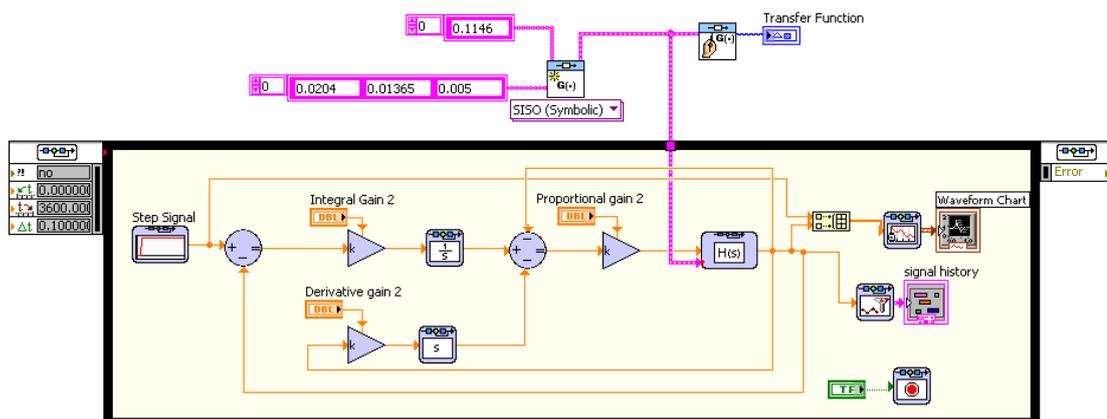


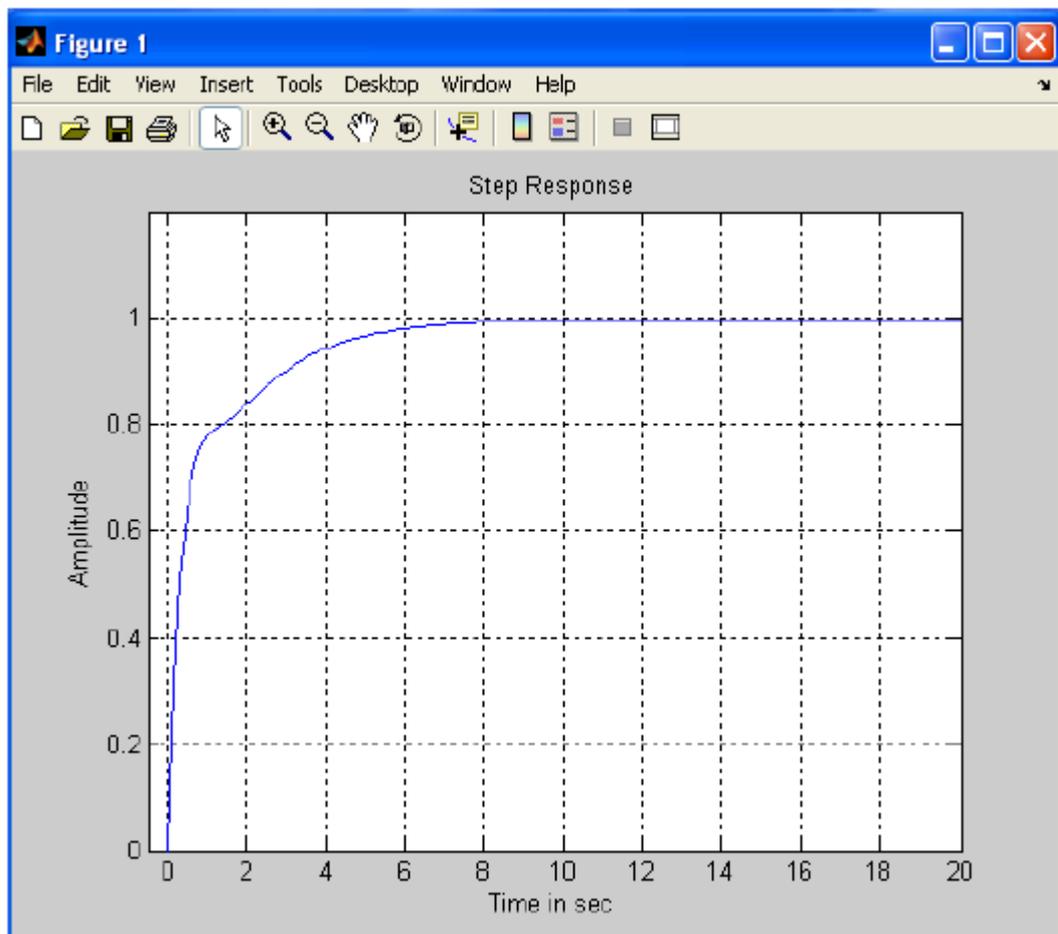
Figura 2. 11: Programación gráfica para la simulación del control de motores DC.
Elaborado por: Autor

La estructura del controlador PID en la implementación de LabVIEW se modifica para poder eliminar el punto de ajuste “kick” accionando la acción derivada sólo en la realimentación. Los valores de la respuesta escalón en instantes de tiempo específicos para la simulación MATLAB, así como LabVIEW se muestran en la tabla 2.3 y las gráficas correspondientes se muestran en la figura 2.12.

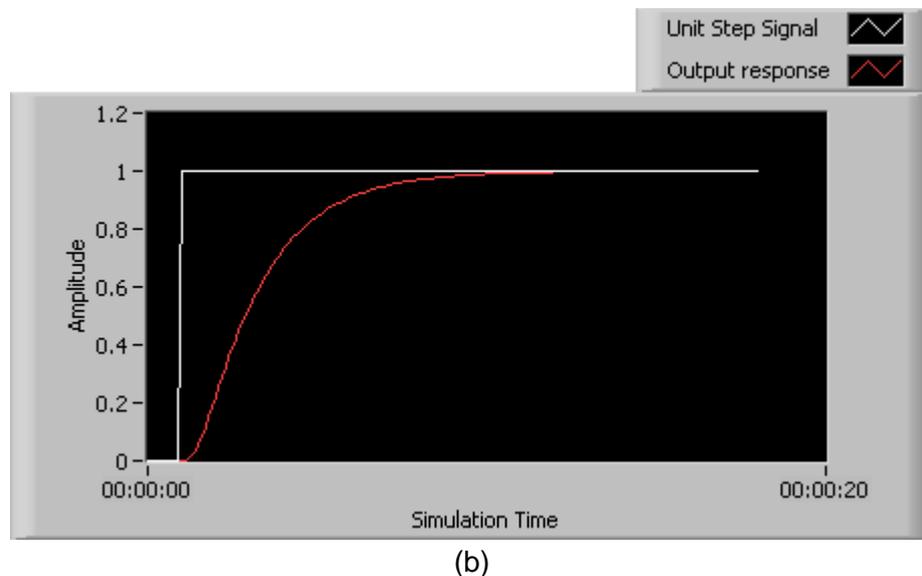
Tabla 2. 3: Puntos de señal de respuesta escalón unitario del sistema de control de motores de CC.

SI. No.	Tiempo en segundos	Amplitud	
		Simulación en MATLAB	Simulación en LabVIEW
1	0	0	0
2	0.2	0.38	0
3	0.4	0.59	0
4	0.6	0.7	0
5	1	0.78	0
6	2	0.84	0.218
7	3	0.9	0.530
8	4	0.94	0.727
9	5	0.96	0.842
10	10	0.99	0.989
11	15	0.999	0.999
12	18	1	1

Elaborado por: Autor



(a)



(b)

Figura 2. 12: Respuesta escalón unitario de la simulación del sistema de control del motor DC utilizando (a) MatLab, y (b) LabVIEW.

Elaborado por: Autor

2.6. GUI para el control de los parámetros de procesos.

El algoritmo de control para los diferentes parámetros de proceso se combinan en un solo bucle de simulación y el panel frontal se presenta en la figura 2.13. Los terminales de control y los indicadores se eligen adecuadamente para reflejar su funcionalidad en el sistema. Los parámetros del sistema se describen como coeficientes de la función de transferencia y las funciones de transferencia correspondientes también se muestran en el panel frontal. El método de control empleado para pH es el control de encendido y apagado, por lo tanto, sólo el coeficiente proporcional se encuentra en el GUI.

Los coeficientes de ajuste del PID se establecen para el control de temperatura y el control del motor de corriente continua con el terminal de

control clásico de deslizamiento vertical. Los indicadores de los parámetros del sistema: la temperatura, el pH y la velocidad de agitación se seleccionan utilizando la función clásica apropiada de visualización de control numérico de LabVIEW.

Los accionamientos del control de salida indican que las funciones de salida del sistema de control diseñado son indicadas por el clásico LED de visualización booleana.

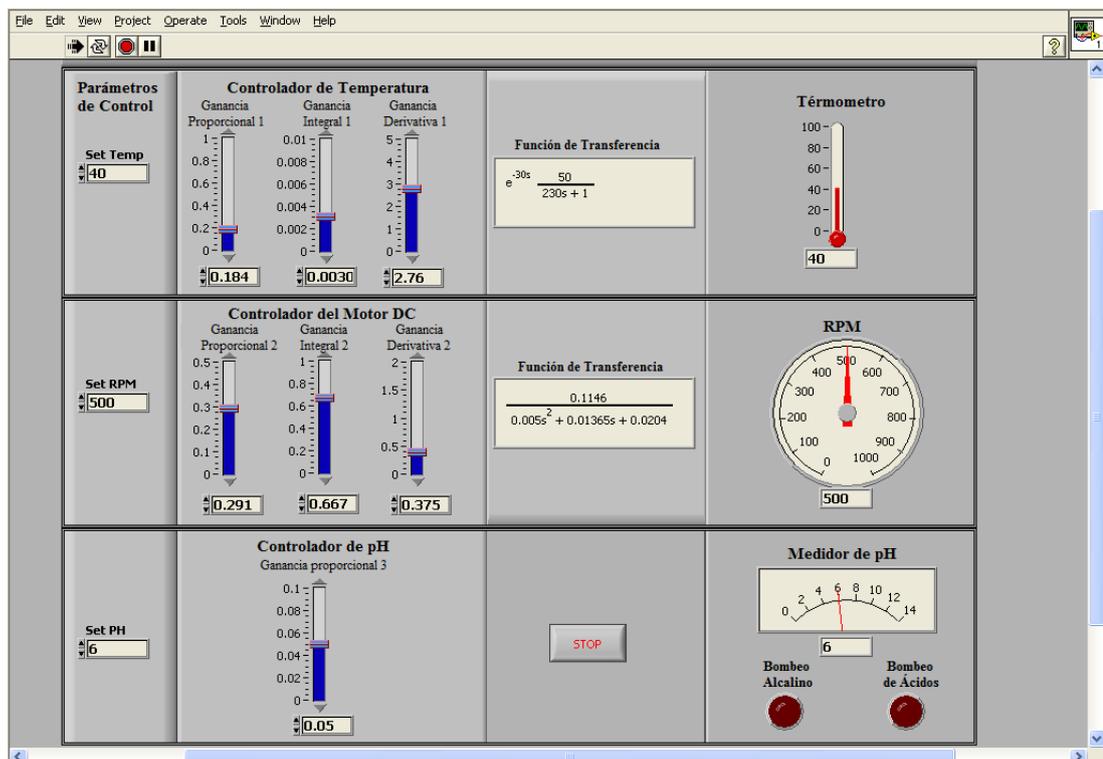


Figura 2. 13: Panel frontal de LabVIEW para la simulación de control de procesos.
Elaborado por: Autor

Los medidores muestran los valores actuales de proceso derivadas de la función de transferencia del sistema. Los parámetros de control se establecen dentro de la gama y las acciones de control correspondientes

que se notan a través de indicadores en el panel frontal. El controlador puede ser optimizado por la comprensión completa de la planta. Así, el módulo de simulación se puede utilizar para validar los parámetros bajo restricciones de tiempo real.

Los parámetros de simulación pueden ser definidos mediante programación o la señal de tiempo también se puede derivar con el hardware externo. Una vez que el sistema de control está diseñado con el módulo de control y simulación, el algoritmo se puede implementar para controlar un sistema físico real.

El algoritmo implementado se puede ejecutar en sistemas de PC de escritorio o en tiempo real. El funcionamiento de un sistema de control en el escritorio del PC es posible, simplemente cambiando el modelo de la planta con la entrada de hardware y funciones de salida y el bucle de simulación de parámetros de temporización se equiparía con el tiempo de adquisición de dato.

Conclusión

El diseño de algoritmos de control y los sistemas de control de retroalimentación para los parámetros de control de procesos biorreactores se derivan a través del módulo de diseño y simulación de control de LabVIEW. El sistema de retroalimentación negativa SISO se simula con éxito para los parámetros de proceso biorreactor tales como temperatura, pH y velocidad de agitación.

Algunos de los cambios que se han incorporado en el desarrollo de la simulación de control PID en los resultados de LabVIEW dan una mejor respuesta de salida en comparación con la simulación en MatLab. El diseño del entorno de simulación para el sistema de control de proceso es posible teniendo en cuenta las especificaciones reales del sistema; por lo tanto el control es muy cercano a sistemas reales.

Referencias Bibliográficas.

Adhikari, N. P., Choubey, M., & Singh, R. (2012). *Dc Motor Control Using Ziegler Nichols and Genetic Algorithm Technique*. Computer Engineering, 1(1), 33-36.

Alfaya, A., Bejarano, G., Ortega, M. G., & Rubio, F. R. (2014). *Control robusto multivariable de un ciclo de refrigeración*. XXXV Jornadas de Automática, 3-5.

Duman, S., Maden, D., & Güvenç, U. (2011). *Determination of the PID controller parameters for speed and position control of DC motor using gravitational search algorithm*. In Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2011 7th International Conference on (pp. 1-225). IEEE.

Gahinet, P., Chen, R., & Eryilmaz, B. (2013). *Automated PID controller design*. The Mathworks, INC., Massachusetts.

Guide, U., & Specifications, N. I. (2011). USB-6008/6009; Mayo 2008:<www.ni.com/pdf/manuals/371303l.pdf>;>. Última Revisión: Septiembre.

Manyari R, M. H. (2012). *Sintonización digital de controladores PID en plantas industriales*. XIX CONIMERA.

Medina, M. A. P. L., Saba, M. G. H., de Guevara Durán, M. E. L., & Reynoso, A. C. G. (2012). *Diseño de control difuso por substitución de control PID*. Revista de la Ingeniería Industrial, 6(1), 20-28.

Moreno, F. E., Becerra, J. A., Cárdenas, A. O., & Sandoval, O. R. (2014). *Modelación y simulación de un sistema de control para una torre de destilación en la producción de Kerosene*. Scientia et Technica, 19(1), 29-34.

Moreno, F. E., Mondragón, J. E., & Becerra, J. A. (2012). *Implementación de un algoritmo PID en un controlador lógico programable bajo una red de comunicación industrial*. Scientia et Technica, 2(50), 33-39.

Osorio, J. A. C., & Luna, R. A. F. (2012). *Desarrollo de un modelo para el seguimiento de patrones mediante reconocimiento óptico*. Scientia et Technica, 2(50), 197-202.

Romero P., J. A., Arrieta, O., Padula, F., Reynoso M., G., García N., S., & Balaguer, P. (2012). *Estudio comparativo de algoritmos de auto-ajuste de controladores PID. Resultados del Benchmark 2010-2011 del Grupo de Ingeniería de Control de CEA*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 9(2), 182-193.

Ruiz, V. M. A. (2011). *Actualización del método de sintonización de controladores de Ziegler y Nichols*. Revista Ingeniería, 15(1-2).

Saborío, E. S., & Ruiz, V. M. A. (2011). *Sintonización de controladores PI y PID utilizando modelos de polo doble más tiempo muerto*. Revista Ingeniería-Engineering Research, 16(2).

Sotaquira, D. C., & Muñoz, E. A. P. (2015). *Control analógico y digital de la velocidad de un motor DC*. Revista Matices tecnológicos, 5.