



**Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DESARROLLO DEL ELEMENTO DE CONTROL AUTOMÁTICO
PARA UN REACTOR POR LOTES DE PASO CONTINUAMENTE
VARIABLE”**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de:

Licenciatura en Ingeniería Química

Presenta:

ADÁN CUEVAS CHÁVEZ

Director de Tesis:

Dr. FRANCISCO MANUEL PACHECO AGUIRRE

Puebla, Pue. 2016.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
Agradecimientos.	1
Introducción.	2
Resumen.....	3
Abstract.....	3
Planteamiento del problema.	4
Justificación.	4
Hipótesis.	4
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.	5
Capítulo 1. Generalidades.	6
1.1 Sensores, transductores y actuadores.....	7
1.1.2 Sensor.....	7
1.1.3 Transductor.....	7
1.1.4 Actuadores.....	8
1.2. Conductividad eléctrica y su relación con la curva de calibración.....	8
1.2.1 Conductividad eléctrica.	8
1.2.2 Curva de calibración.	9
1.3. Control e instrumentación	11
1.3.1. Control automático.....	11
1.3. 2 Lazo de control.....	12
1.3.3 Comparación de lazo abierto y cerrado.	12

1.3.4 Controladores automáticos.	13
1.3.5 Señales de transmisión.	14
1.3.6 Acción de control.	14
1.3.7 Control PID.	15
1.3.8 Diagramas de bloque.	15
1.3.9 Controlador lógico programable (PLC).	17
1.3.10 Arduino.	17
1.3.11 Arduino UNO.	18
1.4 Reactor por lotes.	19
Capítulo 2. Descripción del proceso de cristalización de sacarosa.	21
2.1 Cristalización de sacarosa propuesto por Ramírez y col., 2014.	22
2.2 Cristalización de sacarosa propuesto por Rodríguez y col., 2016.	28
Capítulo 3. Metodología.	36
3.1 Desarrollo de un sensor para determinar la conductividad eléctrica.	39
3.1.1 Analizar diferentes sensores de conductividad eléctrica.	39
3.1.2 Desarrollar nuevo arreglo de terminales del sensor seleccionado.	40
3.1.3 Análisis de resultados del nuevo sensor.	40
3.1.4 Construir una curva de calibración con el sensor propuesto.	41
3.2 Desarrollo de un controlador automático para el proceso de cristalización.	41
3.2.1 Analizar diferentes tipos de actuadores para agitadores de paso.	41
3.2.2 Realizar la programación del algoritmo en Arduino.	42
3.2.3 Instalar en una tarjeta (Arduino Uno) el nuevo sensor y el actuador seleccionado.	43
3.3 Instalación del sensor y actuador al proceso de cristalización de sacarosa propuesto por Ramírez y col., 2014.	45
3.3.1 Instalación del sensor en un reactor por lotes enchaquetado.	45

3.3.2 Instalación del actuador en el agitador de paso variable.....	45
3.3.3 Instalación del software en el panel de control para el proceso de cristalización de sacarosa.	46
Capítulo 4. Resultados y discusión.	47
4.1 Desarrollo de un sensor para determinar la conductividad eléctrica.	48
4.1.1 Análisis de diferentes sensores de conductividad eléctrica.	48
4.1.2 Desarrollo del nuevo sensor con diferentes arreglos de terminales.....	50
4.1.3 Análisis de resultados del sensor seleccionado.	53
4.1.4 Construcción de la curva de calibración con el sensor propuesto.....	59
4.2 Resultados del desarrollo del controlador automático para el proceso de cristalización.	62
4.2.1 Análisis de diferentes tipos de actuadores para agitadores de paso	62
4.2.3 Instalación del nuevo sensor y el actuador seleccionado en una tarjeta Arduino Uno.	67
4.3 Instalación del sensor y actuador en el equipo de cristalización de sacarosa propuesto por Ramírez y col. 2014.	67
4.3.1 Instalación del sensor en un reactor por lotes enchaquetado.	67
4.3.2 Instalación del actuador en el agitador de paso variable.	69
4.3.3 Instalación de la programación en el panel de control para el proceso de cristalización de sacarosa.	70
Conclusiones.	73
BIBLIOGRAFÍA.	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Conductividad eléctrica en soluciones, (Caudillo, 2009).	9
Figura 2. Representación gráfica de una curva de calibración.....	10
Figura 3. Lazo de control cerrado, (Ogata, 2010).....	13
Figura 4. Lazo de control abierto, (Ogata, 2010).....	13
Figura 5. Representación de un bloque, (Ogata, 2010).	16
Figura 6. Punto de suma, (Ogata, 2010).	16
Figura 7. Punto de ramificación. (Ogata, 2010).....	16
Figura 8. Señal de salida hacia un punto de suma, (Ogata, 2010).....	16
Figura 9. Señal de salida hacia un bloque, (Ogata, 2010).	17
Figura 10. Tarjeta electrónica Arduino Uno, (Arduino, 2016).	18
Figura 11. Reactor por lotes, (SEV, 2011).	20
Figura 12. Secuencia de cristalización, (Procesosbio, 2010)	22
Figura 13. Agitador de paso variable, (Ramírez y col., 2014).....	23
Figura 14. Velocidad de sedimentación de azúcar, (Rodríguez y col., 2016).....	29
Figura 15. Diagrama de dispositivos para el lazo de control propuesto por Rodríguez y col., 2016.	30
Figura 16. Puntos de muestreo propuesto por Rodríguez y col., 2016.	31
Figura 17. Representación del modelo realizado en Labview, (Rodríguez y col., 2016).....	32
Figura 18. Metodología del desarrollo del elemento de control.....	38
Figura 19. Ventana principal de Arduino.	42
Figura 20. Monitor serial (lecturas del sensor de conductividad eléctrica).	43
Figura 21. Instalación del nuevo sensor y el actuador seleccionado en la tarjeta electrónica Arduino UNO.....	44
Figura 22. Reactor de tres vías.	52
Figura 23. Arreglo de terminales del sensor a 12 cm de longitud.....	53
Figura 24. Perfiles de conductividad eléctrica.	54
Figura 25. Desviación estándar de las pruebas experimentales a diferentes longitudes del sensor.	55

Figura 26. Representación grafica de las tres pruebas experimentales de cristalización de sacarosa por enfriamiento.....	57
Figura 27. Desviación estándar en las pruebas realizadas por descenso de temperatura.....	58
Figura 28. Secuencia de cristalización por enfriamiento a temperatura ambiente.	58
Figura 29. Sensor con incrustaciones en las terminales.	59
Figura 30. Curva de calibración realizada para las tres pruebas experimentales.	61
Figura 31. Desviación estándar de la curva de calibración.	61
Figura 32. Programación del Sensor HI-69 en Arduino.....	64
Figura 33. Programación del servomotor en Arduino.	65
Figura 34. Programación del lazo de control en Arduino.....	66
Figura 35. Instalación del sensor HI-69 y el servomotor en una tarjeta electrónica Arduino Uno.	67
Figura 36. Diagrama de bloques para el elemento de control.....	68
Figura 37. Instalación del nuevo sensor en un reactor por lotes enchaquetado. ..	69
Figura 38. Instalación del actuador en la estructura de cristalización de sacarosa.	70
Figura 39. Tarjeta electrónica Arduino Mega.....	71
Figura 40. Propuesta final de la estructura para el proceso de cristalización de sacarosa.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Pruebas experimentales del agitador a paso constante y variable, (Ramírez y col. 2014).....	25
Tabla 2. Viscosidad experimental de la suspensión, (Ramírez y col., 2014).....	26
Tabla 3. Síntesis de resultados obtenidos por Ramírez y col., 2014.....	27
Tabla 4. Puntos de muestreo dentro del reacto, (Rodríguez y col., 2016).	29
Tabla 5. Dispositivos presentes en el lazo de control propuesto por Rodríguez y col., 2016.....	30
Tabla 6. Resultados de la simulación sin tomar en cuenta la precipitación de sólidos, (Rodríguez y col., 2016).....	33
Tabla 7. Resultados de la simulación tomando en cuenta la precipitación de sólidos, (Rodríguez y col., 2016).....	34
Tabla 8. Comparación entre controlador PI y PID, (Rodríguez y col., 2016).....	34
Tabla 9. Análisis de cuatro sensores para determinar conductividad eléctrica.	49
Tabla 10. Conductividad eléctrica de metales más comunes. (William D. Castiller, 2007).....	50
Tabla 11. Diagrama propuesto para pruebas del nuevo sensor.....	51
Tabla 12. Arreglo de diferentes terminales del sensor seleccionado.	52
Tabla 13. Promedio del triplicado de las pruebas experimentales de diferentes arreglos del sensor.....	54
Tabla 14. Promedio de las tres pruebas experimentales de cristalización de sacarosa por enfriamiento.....	56
Tabla 15. Promedio de datos experimentales de para curva de calibración realizada por triplicado.	60
Tabla 16. Análisis de tres servomotores TowerPro.....	63

Agradecimientos.

Principalmente a mis padres y a mi hermana que son la razón de mis sueños, por estar siempre conmigo en cada momento, por su cariño y por apoyarme siempre en mí camino.

Al I.Q. Francisco Javier Rangel Martínez, quien fue un pilar importante en mi vida, gracias a sus grandes consejos y experiencias profesionales pude decidir estudiar la licenciatura en Ingeniería Química.

Al Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre, por brindarme la oportunidad de trabajar en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU), ya que en este lugar encontré un amplio panorama para desarrollar el trabajo en equipo a demás de desarrollar habilidades para la toma de dediciones, los cuales, fueron de mucha ayuda para crecer tanto personal como profesionalmente.

A mi equipo de trabajo, Graciela Luna Luna, Scarlett Noely Gómez Aguilera, Ángel Israel Muñoz Cora, por su gran compañía, ya que juntos hemos logrado llegar muy lejos, aprendimos que a pesar de las circunstancias y el tiempo podemos seguir construyendo beneficios para la sociedad.

Introducción.

El presente trabajo, propone desarrollar un elemento de control para medir la concentración en una solución de agua – sacarosa a través de la conductividad eléctrica y que generara una señal para ser empelada en un control de agitación, que permite la inclinación en las paletas de un agitador para que las partículas de la fase solida dispersa se mantengan suspendidas durante el proceso de cristalización de sacarosa. Si consideramos que la cristalización es la formación de partículas sólidas en una solución inicialmente homogénea, y que este proceso tiene como objetivo comúnmente obtener un buen rendimiento de partículas disueltas con morfología homogénea (McCabe, 1991), en la mayoría de los casos, estas partículas cristalizadas tienden a precipitarse en el fondo del equipo de cristalización. Dicha cristalización se llevo a cabo en un reactor por lotes a escala laboratorio, acoplado a éste, el sistema de agitación, dado que los sistemas de agitación son comúnmente empleados para operaciones a pequeña escala con el fin de estudiar nuevos procesos que aún no se han desarrollado en su totalidad.

Resumen.

El presente trabajo aborda los conceptos generales del control automático de procesos correspondiente al Capítulo 1, para el desarrollo del elemento de control para un agitador de paso variable en un reactor por lotes propuesto para cristalización de sacarosa. La perspectiva continua con el conocimiento del proceso propiamente descrito en lo que correspondería al Capítulo 2, mientras que la evolución del trabajo se describe y desarrolla en la sección de metodología en el Capítulo 3 que incluye tres rubros que van desde el ajuste del sensor de conductividad hasta el ensamble del sistema de control en un reactor por lotes. Los resultados obtenidos del sistema de control durante el proceso de cristalización se muestran en el Capítulo 4, así como las respectivas conclusiones.

Abstract.

The present work deals with them concepts General of the control automatic of processes corresponding to the chapter 1, for the development of the element of control for a stirrer of step variable in a reactor by lots proposed for crystallization of sucrose. The continuous perspective with knowledge of the process as described in what would correspond to Chapter 2, while the evolution of the work describes and develops in the methodology section that includes three products ranging from the setting of the conductivity sensor to control system Assembly in a reactor batch. The results obtained of the system of control during the process of crystallization are show in the chapter 4, as well as the respective conclusions.

Planteamiento del problema.

Es común que durante la formación de cristales de azúcar dentro de un reactor por lotes, éstos se sedimenten y precipiten rápidamente, trayendo consigo una disminución de la concentración de los cristales dispersos en la solución aglomerándose en el fondo del equipo, este problema surge dado que no es posible monitorear el avance de la cristalización y controlar el sistema de agitación a partir de este parámetro sin embargo, Ramírez y col., 2014 junto con Rodríguez y col., 2016 proponen un nuevo mecanismo que opera en modo manual y que ha demostrado tener buenos resultados por lo que se pretende establecer un monitoreo y control automático.

Justificación.

Para obtener un mejor rendimiento y estabilidad en la distribución de cristales formados en la solución de estudio, así como también minimizar la sedimentación en la operación del reactor, es necesario desarrollar un elemento de control e instrumentación para el monitoreo en los cambios de concentración basado en las variaciones de conductividad eléctrica propias durante el proceso de cristalización.

Hipótesis.

Al generar un control automático específico para la cristalización de azúcar acoplado a un reactor por lotes, se espera que las partículas cristalizadas se mantengan suspendidas mientras continúan formándose por efecto de gradiente térmico (enfriamiento) modificando continuamente el parámetro de posición del sistema de agitación.

Objetivo general.

Desarrollar un elemento de control e instrumentación aplicado a un sistema de agitación de paso continuamente variable.

Objetivos específicos.

- 1) Ajustar un sensor para la evaluación en continuo de conductividad eléctrica y correlacionarla con la formación de cristales de azúcar.
- 2) Obtener la curva de calibración del sensor propuesto conductividad vs concentración.
- 3) Desarrollar un lazo de control, acoplando el sensor de conductividad con respuesta a un servo motor.
- 4) Instalar el lazo de control e instrumentación a un reactor por lotes.

Capítulo 1. Generalidades.

1.1 Sensores, transductores y actuadores.

1.1.2 Sensor.

Un sensor es un dispositivo sensible que recibe una señal de entrada y provee una señal eléctrica de salida manipulable de la variable de proceso medida, (Corona, 2014). El sensor o elemento de medición es un dispositivo que convierte la variable de salida en otra variable manejable, como un desplazamiento, una presión o un voltaje que pueda usarse para comparar la salida con de señal de entrada de referencia. Este elemento está en la trayectoria de realimentación del sistema en lazo cerrado, el punto de ajuste en el controlador debe convertirse en una entrada de referencia con las mismas unidades que la señal de realimentación del sensor o del elemento de medición, (Ogata, 2010).

Existe una amplia gama de sensores cuya función depende de la variable a medir, entre ellos podemos mencionar algunos, tales como: Presión, Nivel, Temperatura, Humedad, Flujo, pH, Concentración, entre otros. Dichas variables medidas son enviadas hacia un transductor para el procesamiento de esa información, (Corona, 2014).

1.1.3 Transductor.

Un transductor se define como un dispositivo cuya función es transformar una magnitud física medida que sale de un sensor en una señal eléctrica para su lectura en sistema de monitoreo, como por ejemplo en un panel del control. Un transductor se basa de algún principio físico de transformación de energía conocido como principio de transducción. Por mencionar algunos, los principios de transducción se enuncian a continuación (Corona, 2014):

1. Transducción piezoresistivo: se define como la relación entre la resistencia y la deformación de un material.

2. Transducción capacitivo: comúnmente utilizados dado que requiere bajo consumo de energía, baja dependencia a la temperatura y fácilmente detecta cualquier tipo de material.
3. Transducción ultrasónico: las ondas ultrasónicas son útiles para detectar y evaluar objetos a través de un medio gaseoso, líquido y sólido.
4. Transducción magnético: requiere de un campo magnético en corriente directa generado por un imán y una placa conductora.

Los transductores cambian el dominio de una variable en otra, como por ejemplo, presión, movimiento, etc., enviando la señal eléctrica convertida hacia un actuador.

1.1.4 Actuadores.

Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza mecánica externa para mover otro dispositivo, dicha fuerza depende del origen del actuador y puede ser de tres maneras: presión neumática, presión hidráulica, y fuerza eléctrica. Los actuadores se clasifican por el tipo de energía que utilizan (neumático, hidráulico y eléctrico) y por el tipo de movimiento que generan (lineal y rotatorio), (Corona, 2014).

1.2. Conductividad eléctrica y su relación con la curva de calibración.

1.2.1 Conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica se puede definir de dos maneras (Jerome, 1975):

- 1) La capacidad que tiene un cuerpo sólido para conducir el flujo de electrones a través de sí.

2) La capacidad que tiene una disolución para permitir el paso de la corriente eléctrica con la presencia de solutos iónicos como se muestra en la Figura 1.

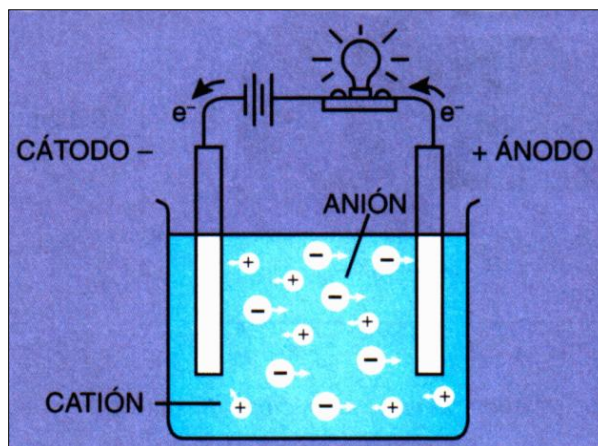


Figura 1. Conductividad eléctrica en soluciones, (Caudillo, 2009).

Partiendo de ambas definiciones, la conductividad es el inverso de la Resistencia (Ω) por unidad de distancia, comprendiendo que las unidades de la conductividad son siemens por metro [$(\Omega \cdot m)^{-1}$]. Es posible determinar la cantidad de solutos presentes en una solución a través de un dispositivo apropiado conocido como conductímetro y correlacionándolo con una curva de calibración previa.

1.2.2 Curva de calibración.

Una curva de calibración es una representación gráfica de una señal (índice de refracción, grados brix, conductividad eléctrica, etc.), que se mide en función de la concentración de un analito. La calibración incluye la selección de un modelo para estimar los parámetros que permitan determinar la linealidad de dicha curva. La curva de calibración es útil para obtener un resultado que sea directamente

proporcional a la concentración de un compuesto en una muestra como se muestra en la Figura 2, (Daniel, 2001).

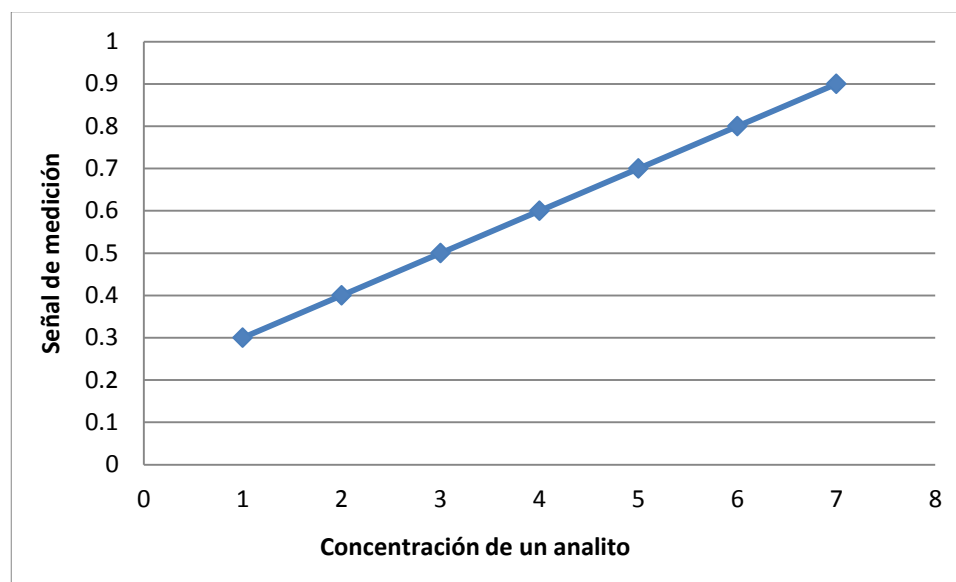


Figura 2. Representación gráfica de una curva de calibración.

A partir de la curva de calibración se puede evaluar la concentración de una muestra con la ayuda de un método conocido como interpolación a partir de una señal determinada como se muestra en la Ecuación 1.

$$X = X_1 + (Y - Y_1) \frac{(X_2 - X_1)}{(Y_2 - Y_1)} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde: X es la variable desconocida, X_1 es límite inferior, X_2 es el límite superior respecto de la ordenada (concentración), Y es la variable conocida, Y_1 es el límite inferior, Y_2 es el límite superior respecto de la abscisa (señal de medición).

1.3. Control e instrumentación

1.3.1. Control automático.

El control automático se define como la acción de mantener una variable de proceso fija en un valor de operación deseado. Las variables de proceso, tales como; temperatura, flujo, presión, nivel y concentración, son dinámicas por naturaleza, es por ello que se desea implementar un diseño de control automático de proceso, (Smith, 1991).

Para desarrollar un sistema de control automático, se requiere de los siguientes cuatro elementos básicos (Smith, 1991):

- 1) Elemento primario (sensor).
- 2) Elemento secundario (transmisor).
- 3) Monitoreo del sistema (controlador).
- 4) Elemento final (válvulas, motores, bombas, etc.).

El mecanismo del control automático, consiste en medir la variable de proceso a través del elemento primario, enviando una señal de entrada a un transmisor, este transmisor emite una señal de salida hacia un controlador comparando el valor de la señal de entrada con el valor predeterminado, enviando otra señal al elemento final para mantener fija la variable de proceso.

La importancia de los elementos anteriores es fundamental para realizar las tres operaciones obligatorias que deben estar presentes en un sistema de control automático:

- 1) Medición (M). Lectura determinada de la variable que se desea controlar.
- 2) Decisión (D). Con base en la medición, el controlador decide que hacer para mantener la variable en el valor deseado.
- 3) Acción (A). Como resultado de la decisión, el controlador efectúa una acción final.

El controlar un proceso tiene como objetivo que la variable manipulada es aquella que se utiliza para mantener la variable controlada en un punto de control (Setpoint) a pesar de las perturbaciones, sin la intervención de la mano del operador a través de un lazo de control, (Smith, 1991).

1.3. 2 Lazo de control.

Un lazo de control es el conjunto de elementos que componen al sistema de control, ya sea abierto o cerrado.

Lazo cerrado. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación, (Ogata, 2010).

Lazo abierto. Los sistemas en el cual la salida no tiene efecto sobre la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto, es decir, no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. En cualquier sistema de lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia, así, cada entrada de referencia corresponde a una condición de operación fija.

1.3.3 Comparación de lazo abierto y cerrado.

Una ventaja en el sistema de control en lazo cerrado como se muestra en la Figura 3, es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema. Desde el punto de vista de estabilidad, el sistema de control en lazo abierto es más fácil de desarrollar, como se muestra en la Figura 4, (Ogata, 2010).

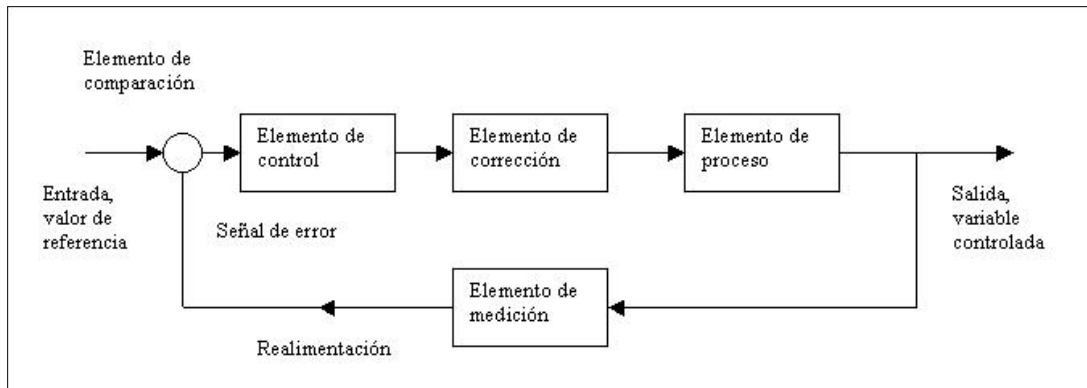


Figura 3. Lazo de control cerrado, (Ogata, 2010).

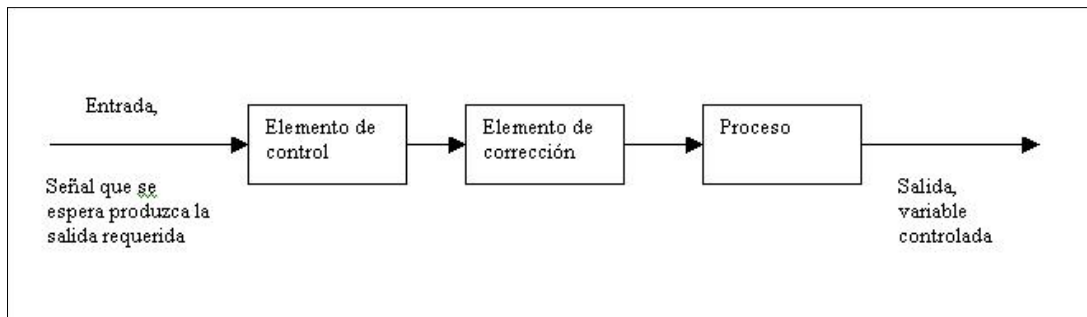


Figura 4. Lazo de control abierto, (Ogata, 2010).

1.3.4 Controladores automáticos.

Un controlador automático se define como un dispositivo en el cual se lleva a cabo que la variable de proceso se mantenga en un valor fijo. En algunos procesos, la variable controlada se desvía del punto de control a causa de las perturbaciones. El termino control regulador se utiliza para referirse a los sistemas diseñados para compensar las perturbaciones, en algunos casos, la perturbación que más afecta el proceso es el punto de control mismo; es decir; el punto de control puede cambiar en función del tiempo (típico en los procesos por lote) y en consecuencia la variable controlada debe ajustarse al punto de control utilizando señales de transmisión, (Smith, 1991).

1.3.5 Señales de transmisión.

Las señales de transmisión son la comunicación entre los instrumentos de control para ajustar las variables de proceso, las cuales son (Ogata, 2010):

- a) Señal neumática o presión de aire. Generan una señal neumática variable linealmente de 3 a 15 PSI para el campo de medida de 0 – 100% de la variable.
- b) Señal eléctrica o electrónica. Generan una señal estándar de 4 – 20 mA y un voltaje de 1 – 5 V
- c) Señal digital. Consiste en una serie de impulsos de pequeña duración en forma de bits. Cada bit consistirá en dos signos (1,0) que corresponden al paso o no de corriente. La ventaja de este tipo de transmisor es que su señal de salida puede ser recibida directamente por un procesador.

1.3.6 Acción de control.

Se denomina acción de control al controlador automático que compara el valor real de salida con la entrada de referencia (valor deseado), determina la desviación y produce una señal de control que reduce la desviación a cero o a un valor pequeño respecto al punto de referencia. La salida de un controlador automático se alimenta a un actuador; como por ejemplo; un motor, válvula, bombas, entre otros, en la cual, el controlador automático produce una señal de control por acción precalculada. El objetivo del control por acción precalculada es medir las perturbaciones y compensarlas antes de que la variable controlada se desvíe del punto de control, (Ogata, 2010).

1.3.7 Control PID.

El control PID es un mecanismo de control que a través de un lazo de retroalimentación permite regular la velocidad, temperatura, presión y flujo entre otras variables de un proceso en general. El controlador PID calcula la diferencia entre la variable real contra la variable deseada, (Ogata, 2010).

El algoritmo de control incluye tres parámetros fundamentales como son:

- 1) Ganancia proporcional (P). El parámetro proporcional mide la diferencia entre el valor actual y el set-point y aplica el cambio.
- 2) Integral (I). Se refiere al tiempo que se toma para llevar a cabo la acción correctiva. Mientras el valor sea más pequeño, mas rápido es la respuesta
- 3) Derivativo (D). Emite una acción predictiva, es decir, prevé el error e inicia una acción oportuna. Responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes que la magnitud del error se vuelva demasiado grande.

La correcta sintonización o programación de estos parámetros ayuda a controlar de manera efectiva el proceso mediante diagramas de bloque.

1.3.8 Diagramas de bloque.

Un sistema de control puede tener varios componentes, para mostrar las funciones de cada componente se emplean diagramas de bloque, que es una representación grafica de las funciones que muestran el proceso. Un diagrama de bloques contiene información relacionada con el comportamiento dinámico del sistema. El bloque es un símbolo para representar la operación sobre la señal de entrada para producir una señal de salida, dicho bloque se denomina como función de transferencia $G(s)$ como se muestra en la Figura 5, (Ogata, 2010).

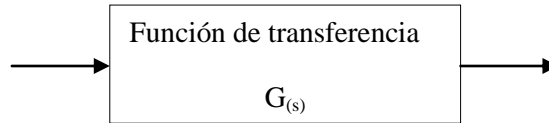


Figura 5. Representación de un bloque, (Ogata, 2010).

El punto de suma es la adición de una señal a otra, su representación es un círculo con una cruz en su interior, que indica una operación de suma en la alimentación hacia el bloque $G(s)$, como se muestra en la Figura 6.

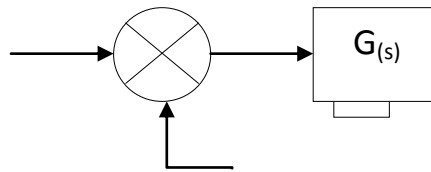


Figura 6. Punto de suma, (Ogata, 2010).

Punto de ramificación ó también llamado punto de derivación como se muestra en la Figura 7, es una sección en la cual, la señal de salida se dirige hacia otro bloque dentro del mismo diagrama ó hacia un punto de suma, como se muestran en las Figuras 8 y 9 respectivamente.

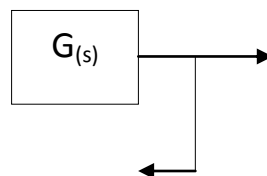


Figura 7. Punto de ramificación, (Ogata, 2010).

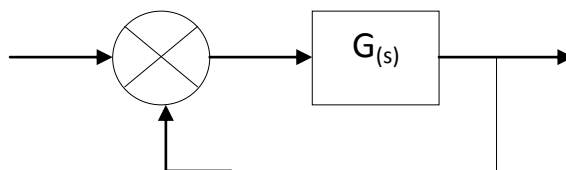


Figura 8. Señal de salida hacia un punto de suma, (Ogata, 2010).

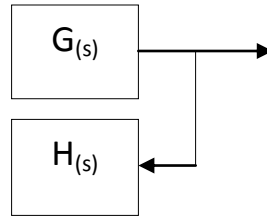


Figura 9. Señal de salida hacia un bloque, (Ogata, 2010).

1.3.9 Controlador lógico programable (PLC).

Un PLC, por sus siglas en inglés (Programmable Logic Controller), es un dispositivo electrónico de estado sólido que controla la operación de una máquina, utilizando funciones lógicas que son programadas en su memoria a través de un software. Estos dispositivos fueron creados para reemplazar a los circuitos auxiliares de mando para reducir costos en el desarrollo de un sistema de control, (Hammer, 2001). Entre los dispositivos de programación se encuentra Labview, RaspberryPI, Arduino, entre otros.

1.3.10 Arduino.

Arduino es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Está pensado para artistas, diseñadores, ingenieros o como hobby y para cualquier persona interesada en crear nuevos dispositivos o entornos interactivos, como se muestra en la Figura 10, (Arduino, 2016).

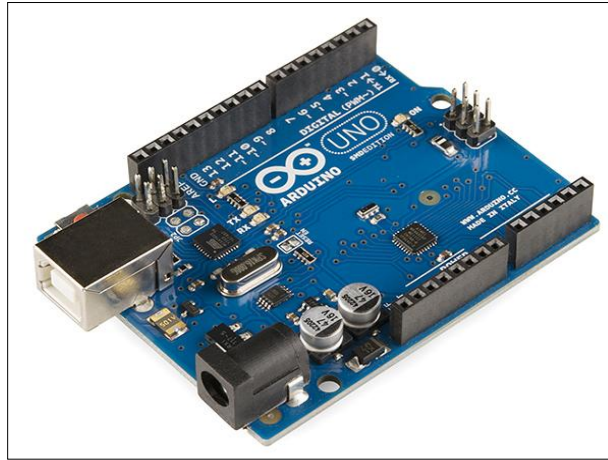


Figura 10. Tarjeta electrónica Arduino Uno, (Arduino, 2016).

Arduino opera en un entorno mediante la recepción de entradas desde una variedad de sensores y puede transmitir el control de luces, motores y otros artefactos. El microcontrolador de la placa se programa usando el *Arduino Programming Language* (basado en Wiring) y el *Arduino Development Environment* (basado en Processing). Los proyectos de Arduino pueden ser autónomos o se pueden comunicar con software en ejecución en un ordenador, (Arduino, 2016).

1.3.11 Arduino UNO.

Existe una amplia gama de versiones Arduino, entre la más común se encuentra Arduino Uno. La tarjeta Arduino UNO es una plataforma el cual posee 18 puertos de comunicación mejor conocidos como PIN y están clasificados en 3 tipos de señales de entrada o salida, tales como, puerto PWM, puerto Digital y puerto Análogo, todos ellos en función del tiempo.

A continuación se describen los 3 tipos de señales mencionados (Arduino, 2016):

Puerto PWM (Pulse Width Modulation). Enumerados del 0 al 7, son puertos que emiten señales de salida.

Puerto Digital. Enumerados del 8 al 13, son puertos que se pueden configurar como señales de entrada o salida, teniendo como principal función on/off.

Puerto análogo. Enumerados del A0 al A5, son puertos para determinar lecturas como señal de entrada de algún dispositivo, dichas lecturas oscilan en un rango de 0 a 1023, dando interpretación de acuerdo al dispositivo en función.

1.4 Reactor por lotes.

Un reactor por lotes (BATCH), es un equipo el cual, se le alimenta una cierta cantidad de materia prima, reacciona y posteriormente se drena como se muestra en la Figura 11. Estos equipos se emplean para operaciones a pequeña escala con la finalidad de probar nuevos procesos que aún no se han desarrollado en su totalidad, para fabricar nuevos procesos. El reactor tiene la ventaja de permitir una alta conversión de la materia prima, que se puede obtener dejando el reactivo dentro del reactor por periodos prolongados, (Fogler, 2008).



Figura 11. Reactor por lotes, (SEV, 2011).

Capítulo 2. Descripción del proceso de cristalización de sacarosa.

2.1 Cristalización de sacarosa propuesto por Ramírez y col., 2014.

El proceso de cristalización de sacarosa consiste en la formación de partículas sólidas suspendidas en la solución sobresaturada de estudio a través del cambio en la temperatura como se muestra en la Figura 12, dicha solución es transferida a fase sólida en forma de cristales que tienden a precipitar con el paso del tiempo, aglomerándose en el fondo del equipo propuesto.

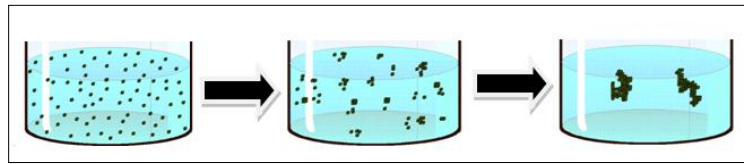


Figura 12. Secuencia de cristalización, (Procesosbio, 2010).

Para este trabajo se abordaron dos condiciones importantes a tomar en cuenta para que se lleve a cabo la cristalización:

- 1) Sobresaturar la solución de estudio, ya que es la fuerza motriz que da paso a la formación de cristales.
- 2) Dado que la solubilidad de azúcar en agua es aumenta al incrementar la temperatura, se emplea la cristalización por enfriamiento.

La fuerza impulsora para la transferencia de masa implica un gradiente de concentración, de la misma manera que el gradiente de temperatura es la fuerza impulsora de la transferencia de calor, (McCabe, 1991). Existe una amplia gama de agitadores para diferentes fluidos y dependiendo de la viscosidad y densidad de la solución a impulsar se determina el agitador más apropiado, la suspensión de partículas solidas así como su morfología durante la caracterización dependen del agitador seleccionado para prevenir la sedimentación de dichas partículas sólidas.

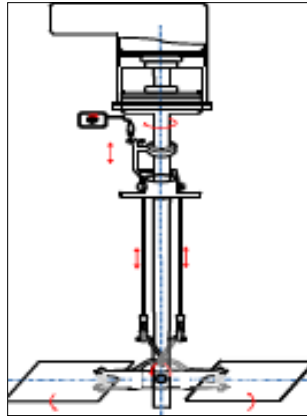


Figura 13. Agitador de paso variable, (Ramírez y col., 2014).

Con el fin de favorecer que las partículas se mantengan suspendidas durante el proceso de cristalización de sacarosa, Ramírez y col., 2014 proponen una solución preparada con 1050 gramos de azúcar estándar, obtenida del Ingenio Emiliano Zapata, en 295 ml de agua, así como el diseño y pruebas experimentales de un agitador manual de paso variable como se muestra en la Figura 13, para el proceso de cristalización de sacarosa por enfriamiento utilizaron agua de enfriamiento a 22°C, partiendo de una temperatura inicial de 80°C y disminuyendo a 22°C en un reactor enchaquetado de vidrio borosilicato, cuya capacidad es de 1000 ml y de geometría cilíndrica y una velocidad de agitación de 120 rpm.

Para determinar la viscosidad experimental de la suspensión de estudio, se utilizó un viscosímetro (Brookfield Dial modelo RVT, USA). Para determinar la densidad experimental inicial, se pesó un filtro de celulosa, cuyo diámetro de porosidad es 2 µm, en una balanza (Adventure Pro, OHAUS, USA) posteriormente se tomó alícuotas de 2 ml depositándolas en el mismo filtro y se procedió a pesar el filtro con la muestra. Empleando la Ecuación 2 se determina la densidad de la solución de estudio, (Ramírez y col., 2014).

$$\rho_m = \frac{W_M - W_B}{V_m} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde, ρ_m es la densidad de la solución de estudio, W_M es el peso del filtro con la muestra, W_B es el peso del filtro sin muestra y V_M es el volumen de la alícuota.

El diseño del agitador se basó en las secciones VII y VIII del código ASME (materiales de construcción) tomando en cuenta tres aspectos, tales como, esfuerzo del material, suspensión de estudio y costo del material. Seleccionando de este modo, placas de aluminio para dos paletas cuyo espesor es de 1 mm, 2.3 cm de largo y 1.8 cm de ancho, acero al carbón grado 55 para el eje del agitador con un diámetro de 2 mm. Así como las dimensiones del agitador con respecto al reactor propuesto para cristalización fue basado en reglas heurísticas, como son: altura de las paletas de la propela y la altura del agitador con respecto de la tapa inferior del recipiente. La fuerza motriz del agitador es proporcionada por un motor de agitación (HT-50T, WiseStir Digital Overhead Stirrer, Korea) que cuenta con un controlador para mantener una velocidad constante deseada, (Ramírez y col. 2014).

Ramírez y col., 2014, realizaron cinco condiciones experimentales para evaluar el agitador de paso variable, tres en paso constante de 0, 45 y 90°, y dos en paso variable de 0 a 45° y de 0 a 90° tal como se muestra en la Tabla 1, con una velocidad constante de agitación de 120 rpm durante el proceso de cristalización de sacarosa observando la morfología de los cristales.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CRISTALIZACIÓN

Tabla 1. Pruebas experimentales del agitador a paso constante y variable, (Ramírez y col., 2014).

Experimento	Paso del agitador	Ángulo de las paletas	Tipo de agitador
1	Constante	0°	IH
2	Constante	45°	PBT
3	Constante	90°	SBT
4	Variable	0 – 45°	IH a PBT
5	Variable	0 – 90°	IH a SBT

De acuerdo con la Tabla1, se define lo siguiente:

- 1) IH: por sus siglas en inglés (Hydrofoil impeller) es un agitador hidropelano, cuyo ángulo de las paletas es 0° con respecto del eje horizonte.
- 2) PBT: por sus siglas en inglés (Pitched blade turbine) es una propela de paleta inclinada, cuyo ángulo de las paletas es 45°.
- 3) SBT: por sus siglas en inglés (Straight blade turbine) es una propela recta y un ángulo de paletas a 90°.

Partiendo de lo anterior, se hacen dos combinaciones de agitadores a paso variable, tales como:

- 1) IH a PBT: de agitador hidropelano a propela de paleta inclinada, es decir, cambio de paletas de 0 a 45°.
- 2) IH a SBT: de agitador hidropelano a propela recta, es decir, cambio de paletas de 0 a 90°.

Los resultados de la viscosidad experimental obtenidos por Ramírez y col., 2014, bajo diferentes temperaturas se muestran en la Tabla 2.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CRISTALIZACIÓN

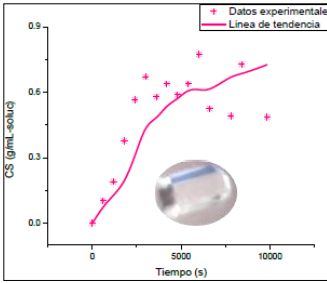
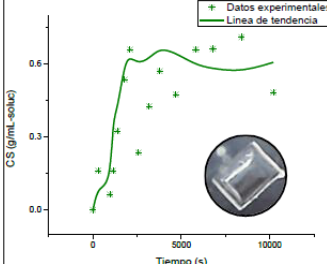
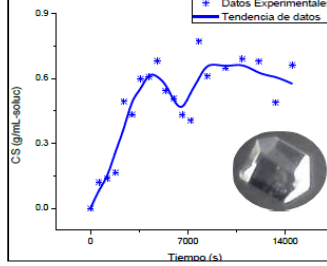
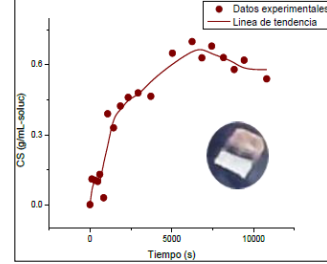
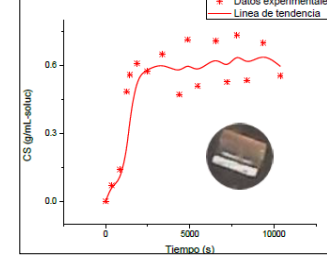
Tabla 2. Viscosidad experimental de la suspensión, (Ramírez y col., 2014).

Temperatura (°C)	Viscosidad (Pa's)
80	0.1
75	0.2
70	0.52
60	0.76
55	0.8
50	1
44.3	1
40	1
35.7	0.9
35	1
20.1	1.2

Durante el proceso de cristalización de sacarosa, Ramírez y col., 2014, tomaron muestras de 2 ml para observar la formación de cristales de las diferentes pruebas del ángulo del impulsor con la ayuda de una cámara de video adaptada a un microscopio, las cuales se muestran en la Tabla 3:

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CRISTALIZACIÓN

Tabla 3. Síntesis de resultados obtenidos por Ramírez y col., 2014.

Experimento	Agitador de paso	Morfología
1	Constante (0°)	
2	Constante (45°)	
3	Constante (90°)	
4	Variable (0 - 45°)	
5	Variable (0 - 90°)	

A partir de la caracterización de la solución de estudio durante el proceso de cristalización de sacarosa, Ramírez y col., 2014, observaron el cambio del comportamiento del flujo, iniciando en un régimen laminar y finalizando en un régimen de transición. Mientras que en la experimentación realizada con paso variable (0 a 45° y 0 a 90°), la solución de estudio presentó una mejor estabilidad en cuanto a la concentración de partículas sólidas suspendidas en comparación con la agitación de paso constante (0, 45 y 90°), obteniendo como resultado el incremento de la velocidad de formación de cristales.

2.2 Cristalización de sacarosa propuesto por Rodríguez y col., 2016.

Por su parte, Rodríguez y col., 2016, desarrollaron la modelación y simulación dinámica en cuanto a la variación de las propiedades de la solución propuesta por Ramírez y col., 2014, acoplado a un lazo de control PI con set point variable, cuyo objetivo es permitir el ajuste óptimo de la posición de las paletas del agitador paso variable para asegurar la suspensión de partículas disueltas.

Con el fin de mantener el tamaño de la partícula suspendida Rodríguez y col., 2016, han desarrollado modelos predictivos para determinar el perfil del proceso de cristalización por enfriamiento. Para el desarrollo de dicha modelación y simulación se dividió el trabajo en dos etapas para el proceso de cristalización de sacarosa, la primera etapa consiste en realizar pruebas experimentales para la obtención de los parámetros de la suspensión así como la implementación de dispositivos necesarios para el lazo de control, la segunda etapa consiste en el planteamiento del modelo del proceso de cristalización con base en los datos obtenidos en la primera etapa.

En lo que respecta a la primera etapa, Rodríguez y col., 2016, realizaron pruebas para determinar la velocidad de sedimentación así como el diámetro de partícula correspondiente a cada velocidad utilizando tamices cuyos poros son 1 mm, 840, 710, 355 y 250 μm respectivamente como se muestra en la Figura 14.

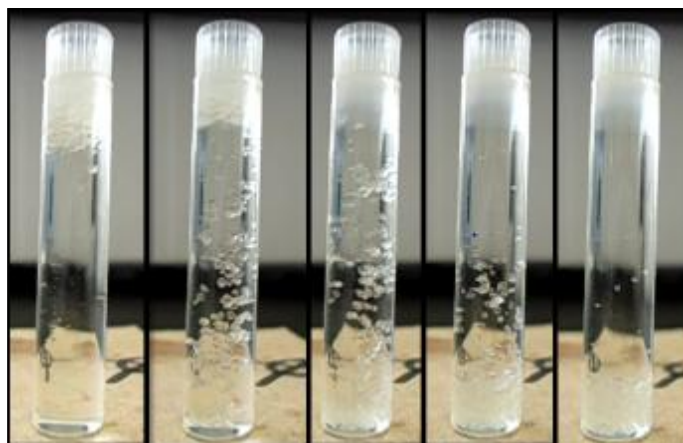


Figura 14. Velocidad de sedimentación de azúcar, (Rodríguez y col., 2016).

Para determinar la distribución de partículas sólidas dentro del reactor propuesto por Ramírez y col., 2014, se tomaron muestras de 2 ml de la suspensión en cuatro puntos específicos de muestreo, las cuales son a 2 profundidades respecto del nivel de la suspensión y dos distancias respecto de la pared del reactor hacia el centro como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Puntos de muestreo dentro del reactor, (Rodríguez y col., 2016).

Puntos de muestreo	Profundidad respecto del nivel de la solución de estudio (cm)	Distancia respecto de la pared (cm)
1	7	0
2	7	4.75
3	2	0
4	2	1.5

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CRISTALIZACIÓN

La implementación de dispositivos presentes en el lazo de control para el proceso de cristalización propuesto por Rodríguez y col., 2016 se muestra en la Tabla 5 así como el diagrama para el sistema de control automático para el proceso de cristalización de sacarosa se muestra en la Figura 15.

Tabla 5. Dispositivos presentes en el lazo de control propuesto por Rodríguez y col., 2016.

Dispositivo	Función	Rango de operación
DS18B20 (Termopar)	Elemento primario	-55 – 125 °C
Arduino Mega 2560	Microcontrolador	5 V
Servo TowerPro MG885	Actuador	180° de rotación
Motor de paso Nema 17 a 4988	Rotación del eje	1.8°/pasos, 200 pasos/rev
	Driver de Nema 17	8 – 35 V

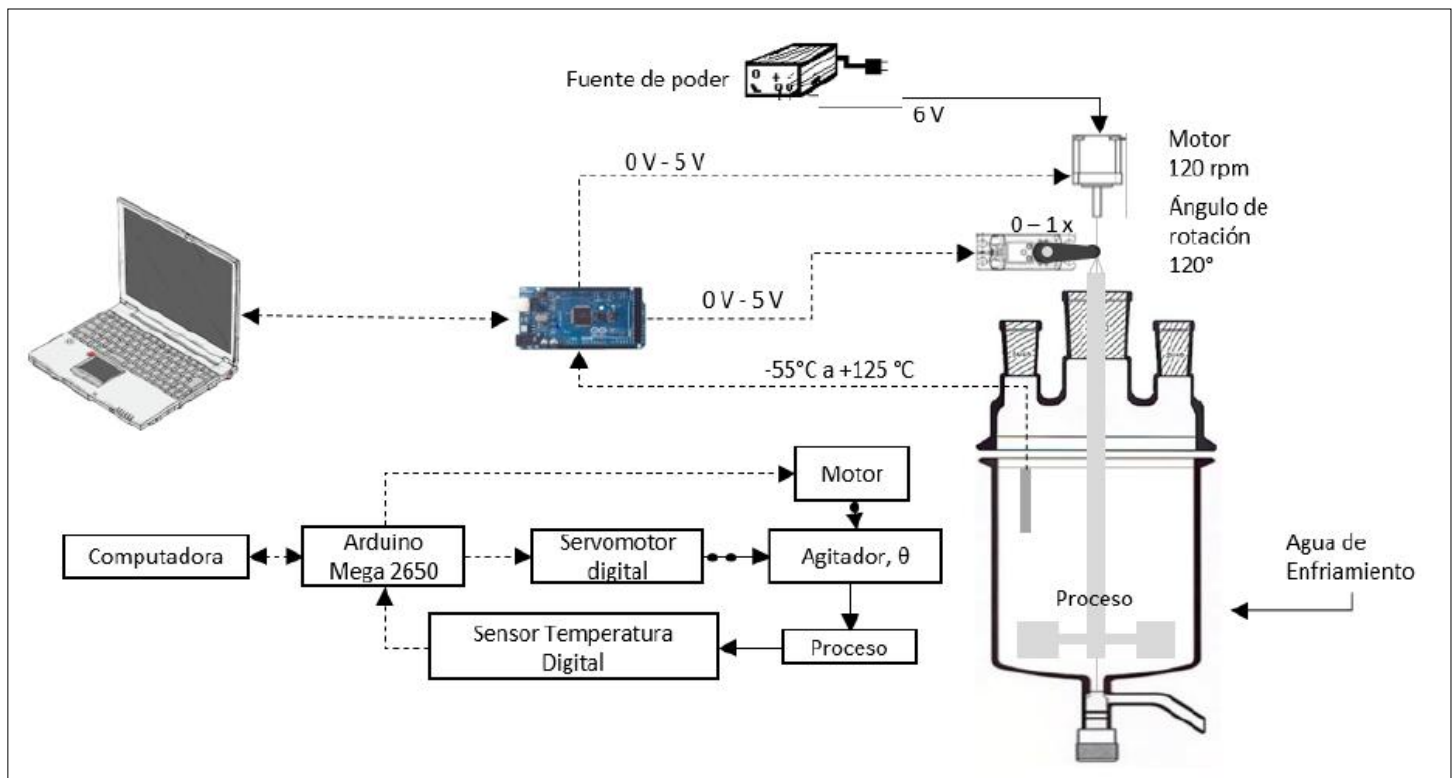


Figura 15. Diagrama de dispositivos para el lazo de control propuesto por Rodríguez y col., 2016.

En lo que respecta a la segunda etapa, Rodríguez y col., 2016, establecieron seis puntos de muestreo para predecir que la concentración de partículas solidas disueltas es la misma de acuerdo al ángulo de inclinación de las paletas del agitador de paso variable como se muestra en la Figura 16.

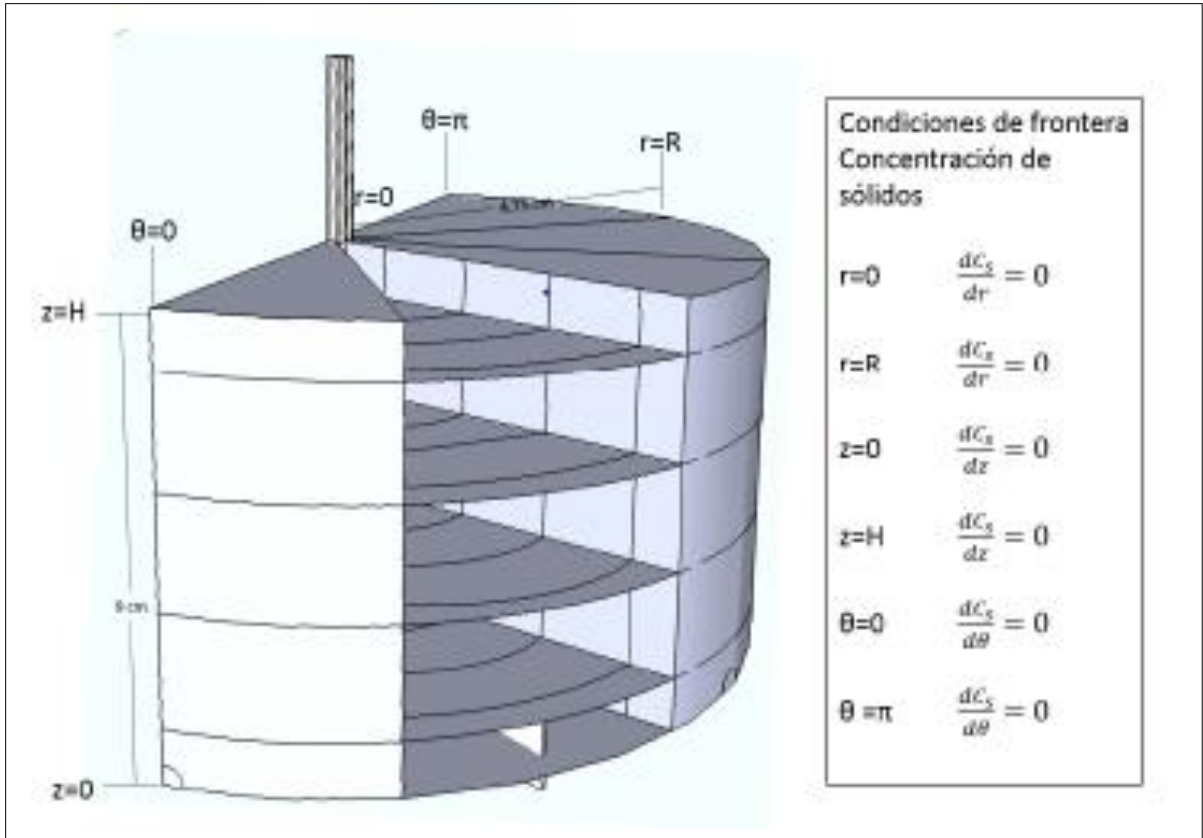


Figura 16. Puntos de muestreo propuesto por Rodríguez y col., 2016.

Para el desarrollo del modelo y simulación del proceso de cristalización de sacarosa, Rodríguez y col., 2016, utilizaron la plataforma Labview como se representa en el diagrama de bloques de la Figura 17.

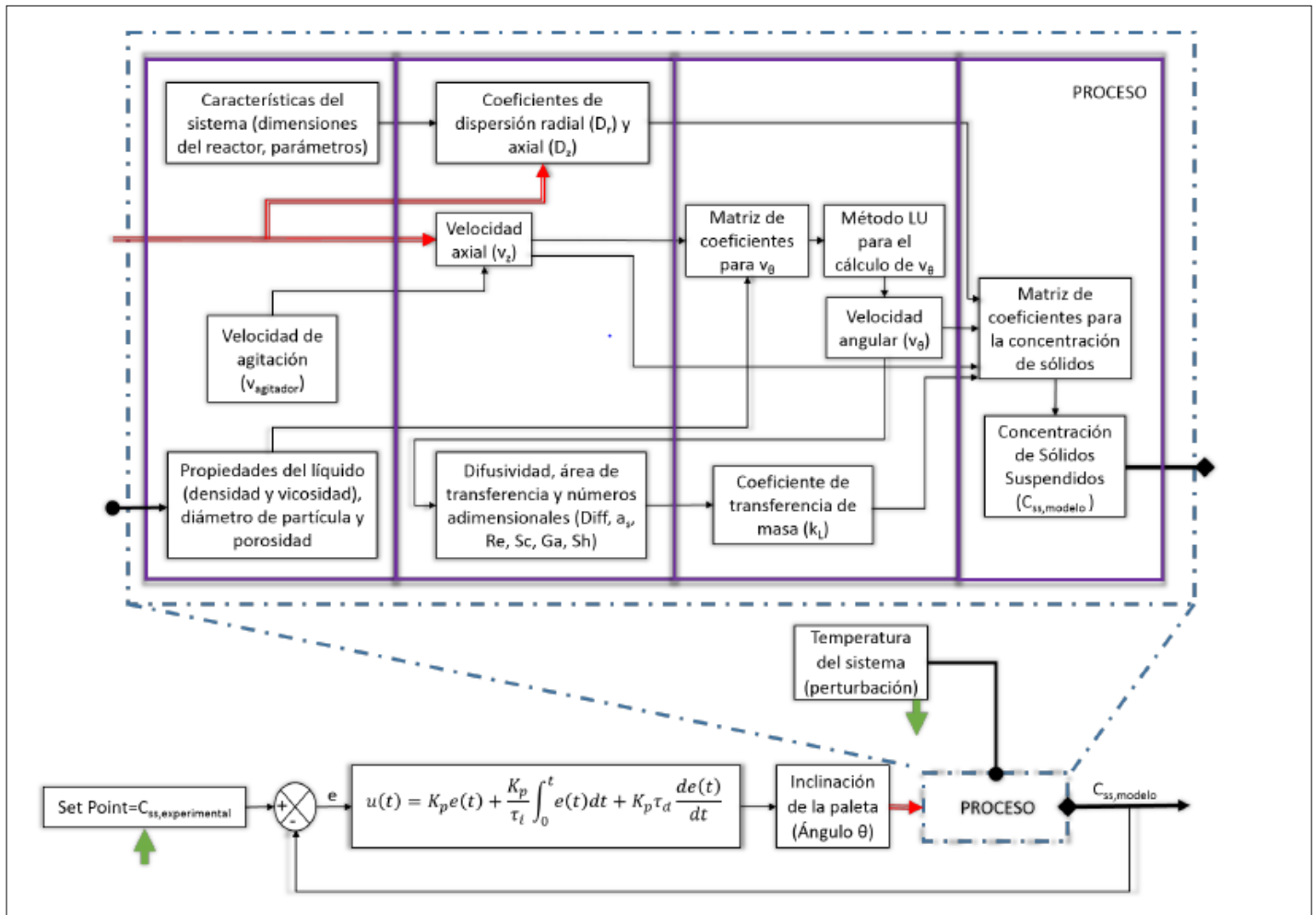


Figura 17. Representación del modelo realizado en Labview, (Rodríguez y col., 2016).

Para la simulación se establecieron diferentes pruebas experimentales sin tomar en cuenta el efecto de precipitación de las partículas suspendidas comparando los ajustes de los datos experimentales, apreciando que se generan oscilaciones al inicio de la simulación y con forme el modelo se va estableciendo se aproxima al setpoint como se muestra en la Tabla 6.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CRISTALIZACIÓN

Tabla 6. Resultados de la simulación sin tomar en cuenta la precipitación de sólidos, (Rodríguez y col., 2016).

Controlador	Representación grafica
$P = 0.05$	
$P = 0.075, I = 0.075$	
$P = 0.1, I = 0.1$	
$P = 0.025, I = 0.025$	

Las simulaciones realizadas tomando en cuenta el término de precipitación añadido se muestran en la Tabla 7. Dado que conforme va aumentando el diámetro de partícula esta tiende a precipitarse, para lograr que la concentración de sólidos del modelo diseñado se mantenga constantemente suspendidos es necesario aumentar la inclinación de las paletas del agitador de paso variable.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CRISTALIZACIÓN

Tabla 7. Resultados de la simulación tomando en cuenta la precipitación de sólidos, (Rodríguez y col., 2016).

Controlador	Representación grafica
$P = 1.98, I = 41.667$	
$P = 1.0, I = 0.1, D = 0.001$	

Tabla 8. Comparación entre controlador PI y PID, (Rodríguez y col., 2016).

Controlador	Representación grafica
PI	
PID	

Rodríguez y col., 2016, concluyen que las propiedades como son la viscosidad y la densidad de la solución agua-sacarosa, así como la inclinación de las paletas del agitador afectan en gran medida la concentración de sólidos suspendidos. El ángulo generado por PI genera oscilaciones al inicio de la simulación manteniendo un comportamiento estable, mientras que el controlador generado por PID al inicio y durante la simulación se comporta de manera inestable como se muestra en la tabla 8.

Capítulo 3. Metodología.

A continuación se describe la metodología del trabajo, la cual se divide en tres secciones, la primera corresponde al desarrollo de un sensor para determinar conductividad eléctrica en soluciones de sacarosa, la segunda es el desarrollo del controlador automático en el reactor in situ y finalmente la instalación de dicho sensor junto con un actuador a un agitador de paso variable que a su vez, será acoplado a un reactor por lotes propuesto por Ramírez y col., 2014.

La secuencia del trabajo para describir la evolución del párrafo anterior motivó el desarrollo de un diagrama de bloques como se muestra en la Figura 18.

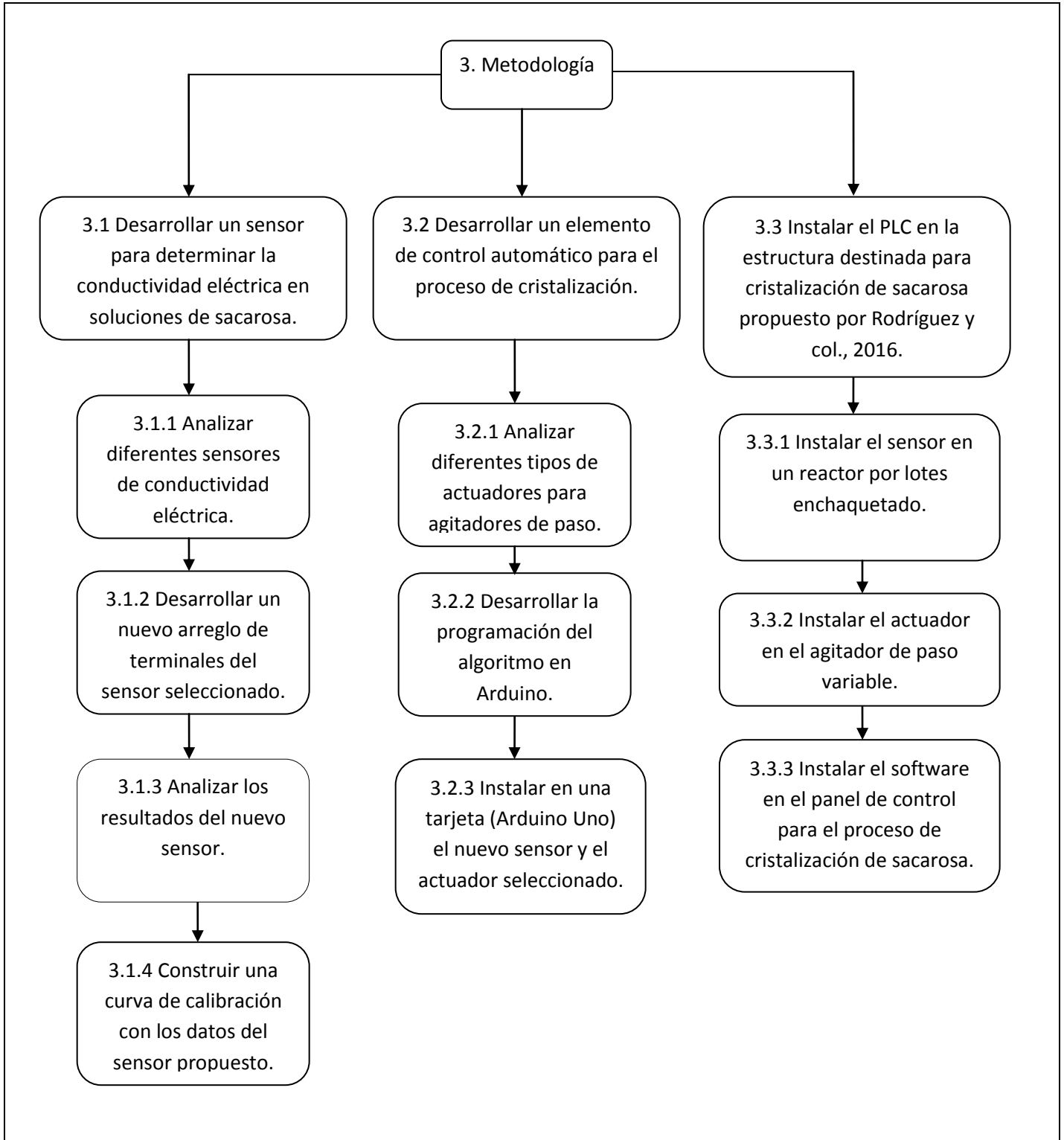


Figura 18. Metodología del desarrollo del elemento de control.

3.1 Desarrollar un de un sensor para determinar la conductividad eléctrica en soluciones de sacarosa.

Los sensores de conductividad eléctrica son comúnmente dispositivos para medir el paso de electrones en una solución conductiva (agua-sal). A continuación se describe paso a paso el desarrollo de un sensor de conductividad eléctrica, así como las modificaciones entre las terminales de dicho sensor para una mejor determinación de conductividad en soluciones poco conductivas.

3.1.1 Analizar diferentes sensores de conductividad eléctrica.

En lo que respecta al análisis de los sensores idóneos para su implementación como elementos de cuantificación de conductividad eléctrica, en soluciones de sacarosa saturadas con un rango de temperatura de 20 a 80 °C, es necesario realizar un análisis de diferentes sensores para conductividad eléctrica, convencional, tales como, por mencionar algunos (Arduino, YI-69, China), (Oakton, TDS3560700, Singapur), (Ruosull, DJS-1W, China) y (Soil Test, HI 98331, USA) y seleccionar el sensor que aporte una mejor lectura siendo compatibles con placa electrónica Arduino Uno dada sus funcionalidades mencionadas en el Capítulo 1, apartado 1.3.11.

A partir del análisis, se llevará a cabo una selección del sensor que cubra mejor los requerimientos adicionales, dentro de lo que podemos destacar entre estos: un tamaño lo más pequeño posible para evitar perturbación e interferencia dentro de la reología del reactor, que pueda ser versátil en el sentido de poder reemplazar componentes del mismo, especialmente las terminales para incrementar la sensibilidad a la conductividad eléctrica.

Es por ello que se pretende reemplazar las terminales del sensor seleccionado por terminales nuevas con las medidas específicas para una mejor recepción en la lectura de conductividad. Siendo necesario realizar una investigación de los materiales capaces de medir conductividad eléctrica, como son: cobre, aluminio, latón, entre otros y seleccionar el material que aporte mejor conductividad.

3.1.2 Desarrollar nuevo arreglo de terminales del sensor seleccionado.

Una vez realizado los análisis correspondientes y seleccionado el sensor compatible con la placa electrónica Arduino Uno, se procederá a realizar el desarrollo de un nuevo sensor reemplazando las terminales con el material de conductividad seleccionado, lo más cercano entre ambas terminales y así como a diferentes longitudes, dado que dichas especificaciones son requeridas para el reactor propuesto por Rodríguez y col., 2016 para evitar el efecto mampara dentro del reactor.

3.1.3 Analizar los resultados del nuevo sensor.

Realizar pruebas en una solución de (agua – azúcar) a condiciones propuestas por Ramírez y col., 2014 descrito en el Capítulo 2, apartado 2.1, dentro de un reactor de 3 vías con agitación. Introduciendo el sensor en la vía derecha de dicho reactor y partiendo de una temperatura inicial de 80°C, registrar conductividad eléctrica cada 5°C conforme va descendiendo la temperatura hasta 30°C.

Realizar por triplicado prueba anterior, graficar los resultados y seleccionar la grafica que muestre un mejor comportamiento de partículas suspendidas en la suspensión utilizando el sensor seleccionado a diferentes longitudes de las terminales modificadas.

3.1.4 Construir una curva de calibración con los datos del sensor propuesto.

Preparar diferentes soluciones a diferentes cantidades de azúcar diluida en agua y determinar la conductividad eléctrica con el sensor específico requerido por Rodríguez y col., 2016, tabular los resultados del sensor con respecto a su concentración y a su vez graficar dichos resultados.

Posteriormente realizar por duplicado una curva de calibración graficando los resultados tabulados y seleccionar la curva que muestre un mejor comportamiento en la gráfica.

3.2 Desarrollar un elemento de control automático para el proceso de cristalización.

A continuación se describe el desarrollo de un controlador automático para un agitador de paso variable a través de la placa electrónica Arduino Uno, utilizando como elemento de entrada un sensor de conductividad eléctrica previamente seleccionado; y como elemento de salida un actuador, que será la fuerza motriz de la inclinación de las paletas de dicho agitador para el proceso de cristalización de sacarosa.

3.2.1 Analizar diferentes tipos de actuadores para agitadores de paso.

Para desarrollar el controlador automático de un agitador de paso variable, es necesario realizar un análisis de tres de actuadores comunes (Servomotores) compatibles con la tarjeta electrónica Arduino Uno, tales como, (TowerPro, SG90s, USA), (TowerPro, MG90, USA) y (TowerPro, MG995, USA).

Partiendo del análisis de los tres actuadores mencionados, se seleccionara el actuador que aporte la fuerza necesaria para vencer el peso de la solución al

mover las paletas del agitador de paso variable respecto del eje horizontal así como el más rápido en cuanto a la señal de respuesta.

3.2.2 Desarrollar la programación del algoritmo en Arduino.

Para realizar la programación, se procederá a descargar e instalar el software Arduino en un ordenador, así como la instalación de la tarjeta electrónica Arduino Uno en el mismo ordenador. Posteriormente en la ventana principal de Arduino, como se muestra en la Figura 19, se llevará a cabo la programación algoritmo del nuevo sensor para determinar la conductividad eléctrica, enviando las lecturas como señal de entrada a la tarjeta electrónica Arduino Uno, dichas lecturas se observan en el monitor serial a través del ordenador como se muestra en la Figura 20. Abriendo una nueva ventana principal de Arduino se llevara a cabo la programación algoritmo del servomotor seleccionado, controlando la rotación del eje del servomotor.

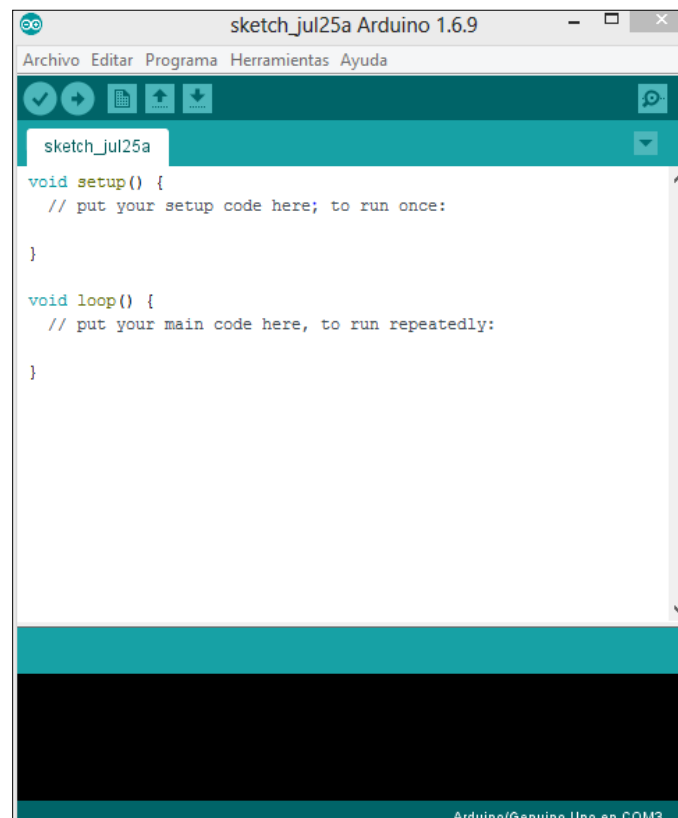


Figura 19. Ventana principal de Arduino.

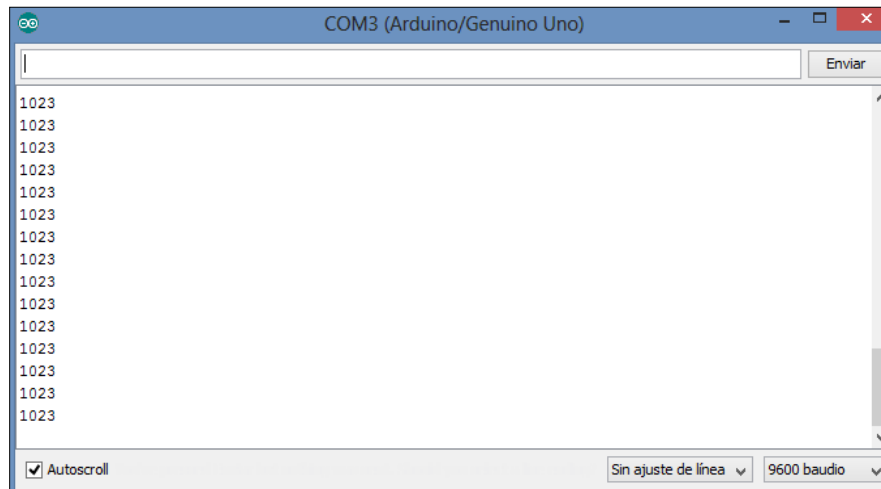


Figura 20. Monitor serial (lecturas del sensor de conductividad eléctrica).

Por último, en la misma ventana donde se llevara a cabo la programación del nuevo sensor, se acoplará la programación del algoritmo del servomotor antes mencionado y ajustar la rotación de dicho servomotor con respecto a los parámetros de las lecturas obtenidas del nuevo sensor de conductividad eléctrica.

3.2.3 Instalar en una tarjeta (Arduino Uno) el nuevo sensor y el actuador seleccionado.

Teniendo lista la programación del algoritmo del nuevo sensor junto con el servomotor, se procederá a realizar la instalación de los mismos como se muestra en la Figura 21 de acuerdo a los siguientes pasos:

Para el sensor.

- 1) Insertar la línea azul en el PIN (A0).
- 2) insertar la línea negra en el PIN (GND).
- 3) Insertar la línea roja en el PIN (5V).

Para el servomotor.

- 1) Insertar la línea amarilla del servo en el PIN (PWM 7).
- 2) insertar la línea negra en el PIN (GND).
- 3) Insertar la línea roja en el PIN (5V).

A este conjunto de dispositivos (sensor, actuador y tarjeta electrónica Arduino Uno) lo consideraremos como PLC.

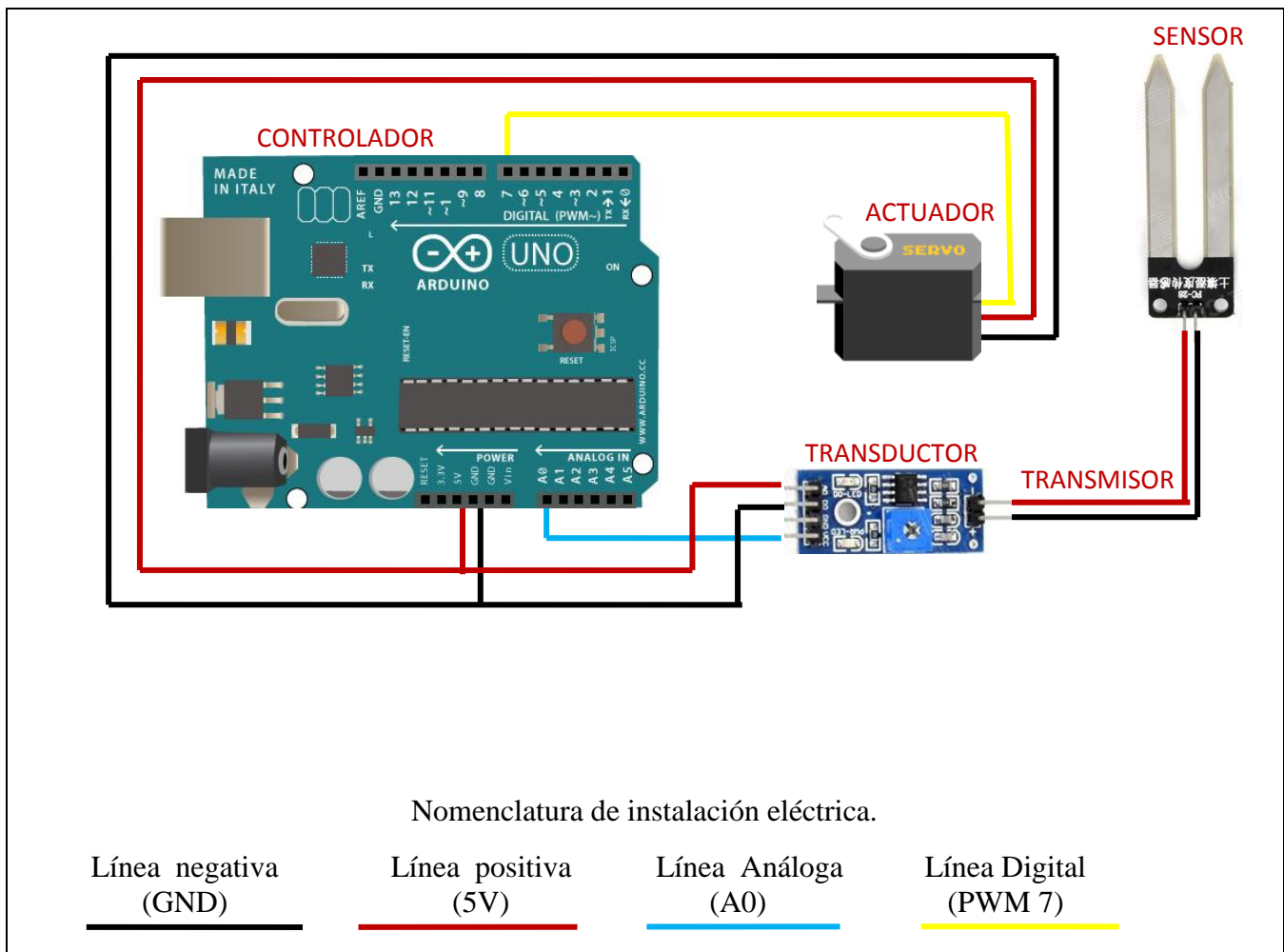


Figura 21. Instalación del nuevo sensor y el actuador seleccionado en la tarjeta electrónica Arduino UNO.

3.3 Instalar el PLC en la estructura destinada para cristalización de sacarosa propuesto por Rodríguez y col., 2016.

En este último apartado de la metodología se describe los pasos a seguir para instalación del PLC propuesto en la estructura del proceso de cristalización de sacarosa junto con el agitador de paso variable propuesto por Rodríguez y col., 2016.

3.3.1 Instalar el sensor en un reactor por lotes enchaquetado.

Instalar el nuevo sensor en la vía izquierda de un reactor por lotes de 3 vías enchaquetado con capacidad de 1000 ml. Dicho sensor se ajustará lo más cercano de distancia respecto de la pared hacia el centro del reactor y lo más corto de profundidad respecto al nivel de la solución, así como ensamblar el agitador de paso variable desarrollado por Rodríguez y col., 2016 en la vía central del reactor mientras que en la vía derecha se fijará un termómetro para monitorear la temperatura dentro del reactor.

3.3.2 Instalar el actuador en el agitador de paso variable.

Ensamblar el servomotor seleccionado en la parte inferior de la estructura donde será montado el reactor enchaquetado para el proceso de cristalización de sacarosa propuesto por Ramírez y col. 2014; y a su vez ensamblar el servomotor en la parte superior del eje del agitador de paso variable modificado por Rodríguez y col., 2016, que será colocado en la vía central de dicho reactor.

3.3.3 Instalar el software en el panel de control para el proceso de cristalización de sacarosa.

Instalar la programación del algoritmo del lazo de control en una tarjeta electrónica Arduino Uno y ensamblar dicha tarjeta en la estructura donde estará sujeto el reactor propuesto por Ramírez y col .2014, junto con el nuevo sensor desarrollado, el agitador de paso variable desarrollado por Rodríguez y col., 2016 y el servomotor seleccionado.

Capítulo 4. Resultados y discusión.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos tanto en el desarrollo del nuevo sensor para determinar conductividad eléctrica, el desarrollo del elemento de control para el proceso de cristalización de sacarosa propuesto por Ramírez y col., 2014, así como la instalación del nuevo sensor y el actuador en la estructura destinada para el proceso de cristalización propuesto por Rodríguez y col. 2016.



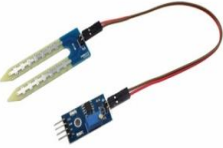

4.1 Desarrollo de un sensor para determinar la conductividad eléctrica.

4.1.1 Análisis de diferentes sensores de conductividad eléctrica.

De acuerdo con el análisis realizado de cuatro diferentes sensores para determinar la conductividad eléctrica como se muestra en la Tabla 9, se seleccionó el sensor (Arduino, HI-69, China), ya que dicho sensor cumple con las características requeridas, tales como, el más pequeño, más ligero, compatible con la tarjeta electrónica Arduino Uno, cuenta con la opción de modificar las terminales, a demás de ser más accesible económicamente y fácil de utilizar sin la necesidad de realizar calibraciones.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 9. Análisis de cuatro sensores para determinar conductividad eléctrica.

Especificaciones	Sensor HI98331	Conductímetro Oakton	Sensor HI-69	Sensor DJS-1W
Imagen				
Rango de temperatura	0 – 50 °C	0 – 50 °C	0 – 100 °C	5 – 40 °C
Calibración	Manual	Manual	No requiere	Manual
Batería / Tipo	4 x 1.5 V (tipo botón)	4 x 1.5 V (AAA)	Energía eléctrica 5V	Energía eléctrica 5V
Dimensiones LxAxH	16.3 x 4 x 2.6 cm	19.1 x 8.9 x 4.5 cm	3 x 1.6 x 0.7 cm	3.2 x 9.8 x 1.7 cm
Volumen	169.52 cm ³	764.95 cm ³	3.36 cm ³	53.31 cm ³
Peso	100 gramos	453.59 gramos	5 gramos	15 gramos
Costo aproximado	\$ 423.08	\$ 5,800.00	\$ 80.00	\$ 2,296.00
País proveedor	USA	USA	México	México
Compatible con Arduino	No	No	Si	Si

Para el reemplazo de las terminales del sensor HI-69, se seleccionó el material cobre, ya que, como se muestra en la Tabla 10, en relación costo beneficio, es el metal que ofrece mayor conductividad eléctrica, es maleable, a demás de ser más accesible. Para ello se utilizaron filamentos de cobre de 0.9 mm de diámetro ya que utilizando este diámetro se prevé que no afectara el régimen de agitación dentro del reactor propuesto para cristalización de sacarosa.

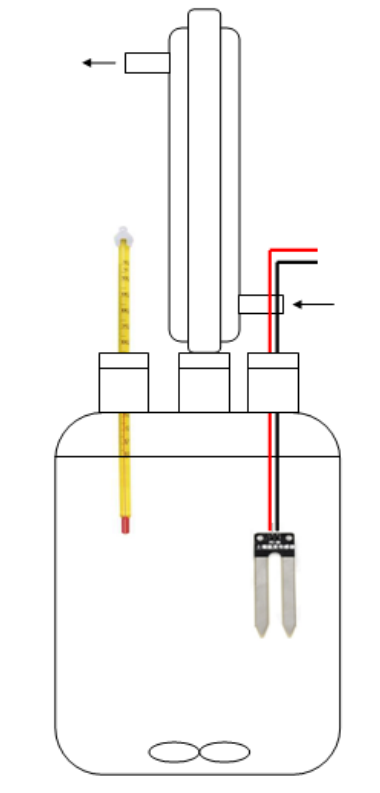

Tabla 10. Conductividad eléctrica de metales más comunes. (William D. Castiller, 2007).

Conductividad eléctrica de ocho metales a temperatura ambiente			
Metal	$[(\Omega\text{-m})^{-1}]$	Metal	$[(\Omega\text{-m})^{-1}]$
Plata	$6,8 \times 10^7$	Latón	$1,6 \times 10^7$
Cobre	$6,8 \times 10^7$	Hierro	$1,0 \times 10^7$
Oro	$4,3 \times 10^7$	Acero al carbón	$0,6 \times 10^7$
Aluminio	$3,8 \times 10^7$	Acero inoxidable	$0,2 \times 10^7$

4.1.2 Desarrollo del nuevo sensor con diferentes arreglos de terminales.

Las pruebas experimentales se realizaron dentro de un reactor por lotes de tres vías fijando en la vía izquierda un termómetro para monitorear la temperatura dentro del reactor, en la vía central un condensador de tubo concéntrico y en la vía derecha el nuevo sensor desarrollado como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Diagrama propuesto para pruebas del nuevo sensor.

Diagrama preliminar	Diagrama real
	

Partiendo de las dimensiones de un reactor de tres vías como se muestra en la Figura 22, se tiene el diámetro interno (10.2 cm) y la altura interna (14.1 cm), para el desarrollo de diferentes arreglos entre las terminales del sensor seleccionado como se muestra en la Tabla 12.



Figura 22. Reactor de tres vías.

Tabla 12. Arreglo de diferentes terminales del sensor seleccionado.

Sensor	Longitud entre terminales (cm)	Distancia entre terminales (cm)
1	12	0.25
2	11	0.25
3	10	0.25
4	9	0.25
5	8	0.25
6	7	0.25
7	6	0.25
8	5	0.25
9	4	0.25
10	3	0.25
11	2	0.25

Dado que la altura de la solución de agua – sacarosa dentro del reactor es de 12.3 cm aproximadamente, se propuso que la longitud máxima de las terminales del sensor sea de 12. cm como se muestra en la Figura 23.



Figura 23. Arreglo de terminales del sensor a 12 cm de longitud.

4.1.3 Análisis de resultados del nuevo sensor.

Utilizando cada arreglo del sensor seleccionado se realizaron pruebas experimentales por triplicado determinando la conductividad eléctrica en una solución de 1050 gramos de azúcar diluida en 295 ml de agua a 80°C para mantener la saturación dentro del reactor de tres vías con agitación constante.

Los datos del sensor seleccionado obtenidos a través del monitor serial de la plataforma Arduino son Resistencia al paso de los electrones dentro de una solución, dado que la conductividad eléctrica es la inversa de la resistencia, es decir, (conductividad = $1 R^{-1}$ ó bien $1/R$), se determinó la conductividad eléctrica para las pruebas experimentales anteriormente mencionadas bajo diferentes longitudes de las terminales del nuevo sensor, posteriormente se determinó un valor promedio entre los valores obtenidos tal como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Promedio del triplicado de las pruebas experimentales de diferentes arreglos del sensor.

Temperatura (°C)	Longitud entre terminales (cm)	Resistencia promedio (Ω)	Conductividad eléctrica promedio [$(\Omega\text{-m})^{-1}$]
80	12	399	0.002506266
80	11	412	0.002427184
80	10	439	0.002281369
80	9	448	0.002232143
80	8	458	0.002183406
80	7	486	0.002057613
80	6	500	0.00200000
80	5	530	0.001886792
80	4	565	0.001769912
80	3	605	0.001652893
80	2	676	0.00147929

Los perfiles de conductividad eléctrica, así como la desviación estándar de éstos para las tres pruebas realizadas anteriormente se muestran en la Figura 24 y Figura 25 respectivamente.

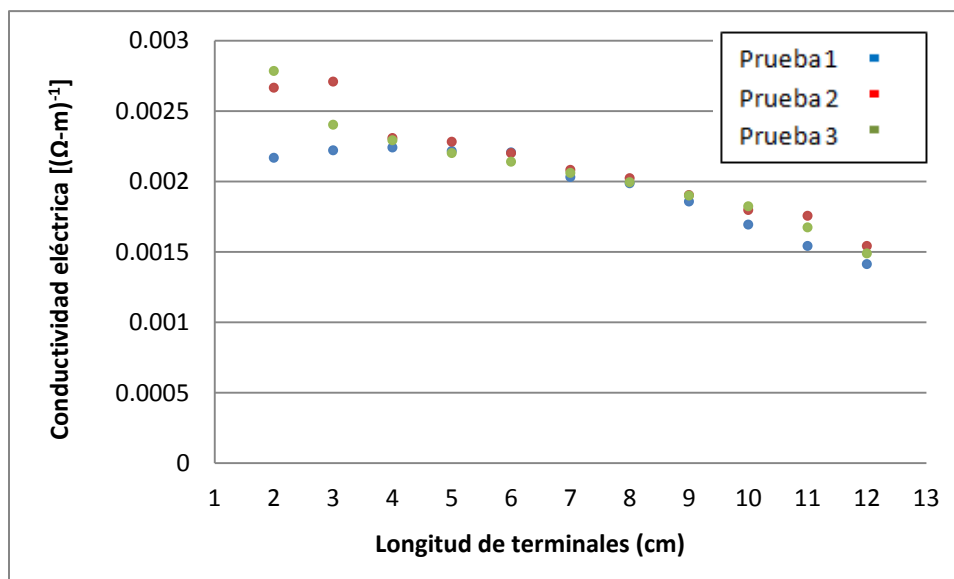


Figura 24. Perfiles de conductividad eléctrica.

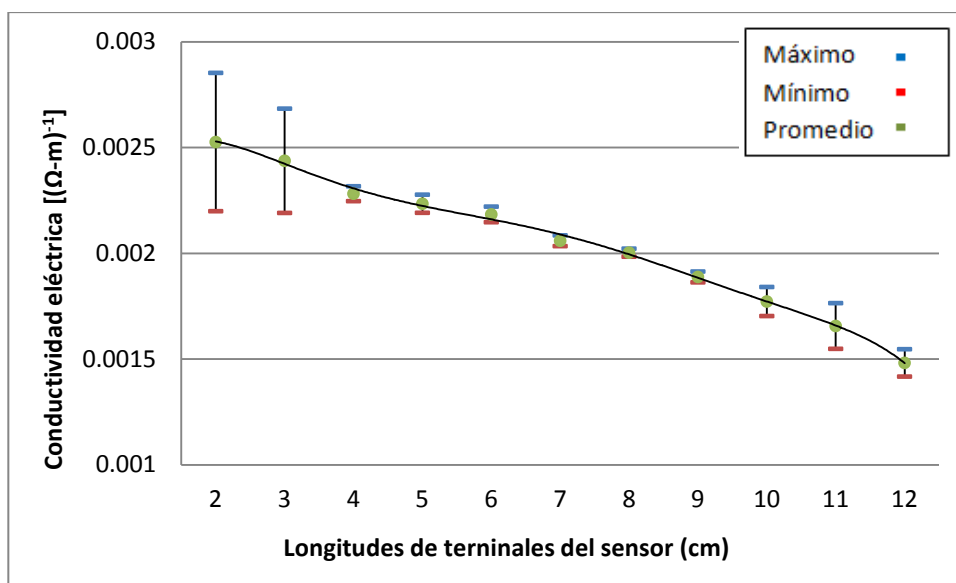


Figura 25. Desviación estándar de las pruebas experimentales a diferentes longitudes del sensor.

De la Figura 24 se deduce que es preferible utilizar un sensor cuya longitud de terminales oscile entre 4 y 9 cm, debido a que el comportamiento del sistema se mantiene estable en ese rango.

De acuerdo con la Figura 25, se observa que la desviación estándar entre 2 y 3 cm de longitud de las terminales del sensor es muy alta, presentando un margen de error alto, dado que se encuentra alejado de la línea promedio, mientras que con el sensor cuya longitud de terminales entre 10 y 12 cm la desviación estándar es baja dado que presenta un margen de error mínimo.

Posteriormente se realizaron pruebas experimentales por triplicado determinando conductividad eléctrica de la solución de sacarosa por enfriamiento a temperatura ambiente, partiendo de una temperatura inicial de 80°C y conforme disminuye la temperatura se determinó conductividad eléctrica cada 5 °C hasta llegar a 30°C. Los datos promedio de las tres pruebas experimentales se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Promedio de las tres pruebas experimentales de cristalización de sacarosa por enfriamiento.

Temperatura (°C)	Resistencia promedio (Ω)	Conductividad eléctrica promedio [(Ω-m)⁻¹]
80	668	0.00149925
75	700	0.00142857
70	730	0.00136986
65	760	0.00131579
60	795	0.00125786
55	831	0.00120337
50	808	0.00123762
45	771	0.00129702
40	730	0.00136986
35	724	0.00138122
30	711	0.00140647

De acuerdo con la anterior tabla del promedio de las pruebas experimentales de cristalización por enfriamiento se construyó una gráfica para observar el comportamiento de la solución sometida a enfriamiento. Deduciendo que hay un rango de temperatura comprendido entre 50 y 65°C respectivamente y que en dicho rango la conductividad eléctrica máxima oscila entre los valores 0.00123762 y 0.00131579 como se muestra en la Figura 26. Cabe mencionar que la primera prueba experimental se realizó con un reactor diferente, es decir, un reactor de fondo convexo, mientras que la segunda y la tercera prueba experimental se realizaron en un reactor de fondo plano, deduciendo que la conductividad eléctrica depende de la composición de la solución, pero a su vez, la composición de dicha solución depende de la agitación y de la forma geométrica del reactor.

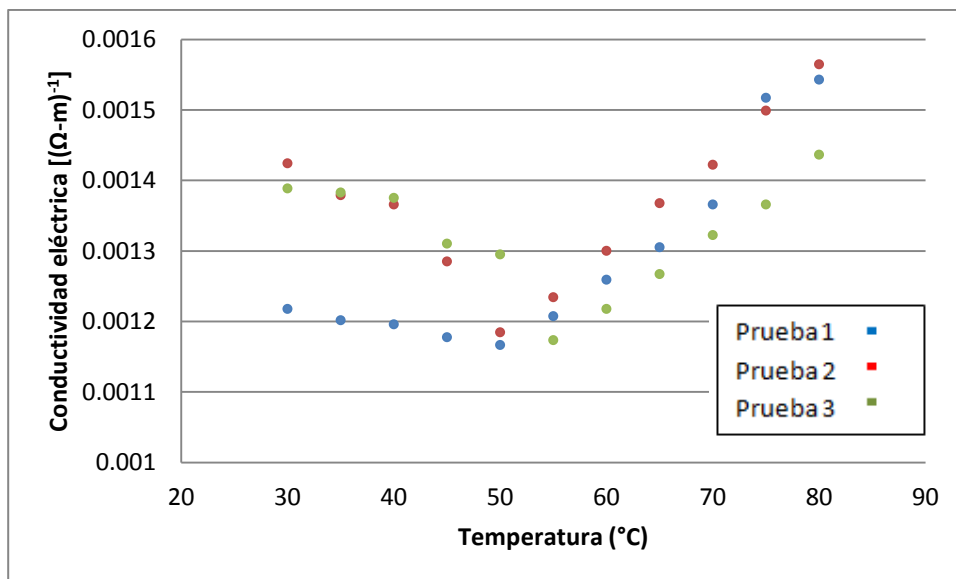


Figura 26. Representación grafica de las tres pruebas experimentales de cristalización de sacarosa por enfriamiento.

Posteriormente se obtuvo la desviación estándar de las tres pruebas experimentales de cristalización de sacarosa por enfriamiento como se muestra en la Figura 27. Interpretando que partiendo de una temperatura inicial de 80°C la conductividad eléctrica es mayor, dado que a esas condiciones se colocó el nuevo sensor desarrollado a 2 cm de profundidad respecto del nivel de la solución y 1.5 cm respecto de la pared al centro, manteniendo uniforme dicha zona líquida del reactor, conforme desciende la temperatura la conductividad disminuye dado que empieza a presentarse formación de partículas sólidas en la zona líquida dando paso a una suspensión dentro de dicho reactor. Como se observa en la Figura 27, la temperatura dentro del reactor cuya conductividad eléctrica es máxima se alcanza a 55°, por consiguiente la conductividad eléctrica comienza a aumentar, dado que en la superficie de la suspensión las partículas comienzan a sedimentarse dejando la superficie líquida libre de partículas sólidas como se observa en la Figura 28.

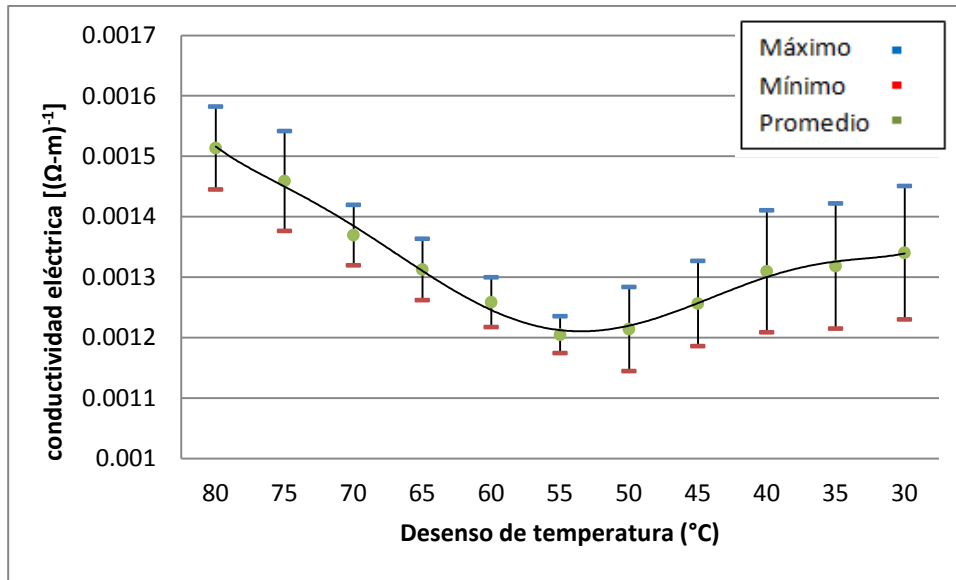


Figura 27. Desviación estándar en las pruebas realizadas por descenso de temperatura.



Figura 28. Secuencia de cristalización por enfriamiento a temperatura ambiente.

Después de realizar la tercera prueba de cristalización de sacarosa por descenso de temperatura, el sensor presentó incrustaciones de sólidos en la parte superior de las terminales, así como ligera corrosión de dichas terminales como se muestra en la Figura 29.



Figura 29. Sensor con incrustaciones en las terminales.

4.1.4 Construcción de la curva de calibración con los datos del sensor propuesto.

Para la construcción de la curva de calibración se realizaron tres pruebas experimentales. Para cada prueba experimental se prepararon diez porciones de azúcar de 105 gramos cada uno dentro del reactor de tres vías con una temperatura de 80°C. Dentro de dicho reactor se agregó 295 ml de agua y se agregaron 105 gramos de azúcar, posteriormente se introdujo el nuevo sensor en la vía derecha del reactor y determino la conductividad eléctrica. Conforme se va agregando cada porción de azúcar se determinó conductividad eléctrica, tal como como se muestra en la Tabla 15 se calculó un valor promedio para las tres pruebas experimentales realizadas.

Tabla 15. Promedio de datos experimentales de para curva de calibración realizada por triplicado.

Concentración (gramos)	Resistencia promedio (Ω)	Conductividad elétrica promedio [(Ω-m)⁻¹]
0	263	0.003802281
105	277	0.003610108
210	296	0.003378378
315	316	0.003164557
420	351	0.002849003
525	386	0.002590674
630	440	0.002272727
735	486	0.002057613
840	546	0.001831502
945	606	0.001650165
1050	668	0.001497006

De acuerdo con los datos experimentales de las tres pruebas realizadas se construyo una curva de calibración graficando la cantidad de sacarosa con respecto de la conductividad eléctrica determinada a una temperatura constante de 80°C como se muestra en la Figura 30, observando que conforme aumenta la concentración de sacarosa disminuye la conductividad eléctrica, dado que la sacarosa es un compuesto orgánico que obstruye la conductividad dentro de una solución.

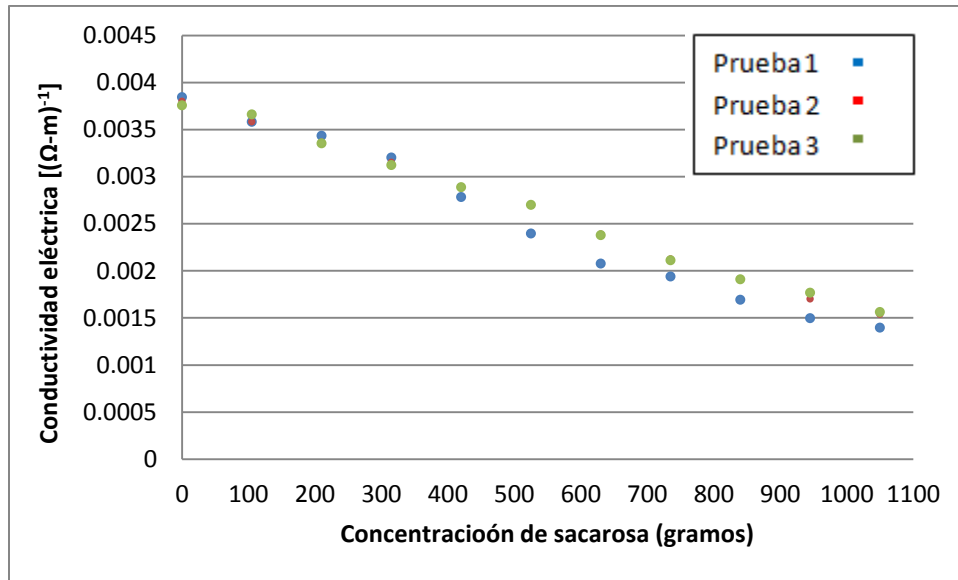


Figura 30. Curva de calibración realizada para las tres pruebas experimentales.

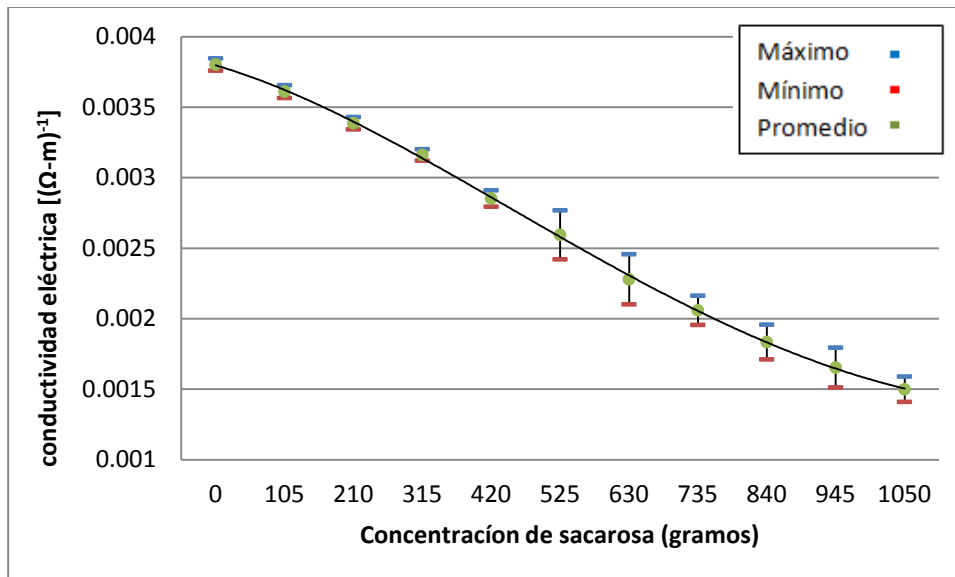


Figura 31. Desviación estándar de la curva de calibración.

En la Figura 31 se muestra el comportamiento de la desviación estándar, observando que teniendo una concentración de 525 a 1050 gramos de azúcar diluida el proceso muestra ligeras variaciones conforme va aumentando la concentración de la solución de estudio hasta llegar a la saturación.

4.2 Resultados del desarrollo del elemento de control automático para el proceso de cristalización.

4.2.1 Análisis de diferentes tipos de actuadores para agitadores de paso.


Como se muestra en la Tabla 16, se realizó un análisis de 3 servomotores diferentes compatibles con Arduino y se selecciono el servomotor (TowerPro, MG955, USA), ya que cumple con las características necesarias basando en la relación costo beneficio, tales como, el material de los engranes, bajo consumo energético y la característica más importante que es la fuerza que ofrece para poder mover el eje del agitador de paso variable propuesto por Rodríguez y col., 2016.

Tabla 16. Análisis de tres servomotores TowerPro.

Especificaciones	Servomotor MG90S	Servomotor SG90S	Servomotor MG995
Imagen			
Voltaje de funcionamiento	4.8 - 6 V	4.8 - 5 V	4.8 V
Dimensiones LxAxH	2.25 x 1.2 x 3.55 cm	2.22 x 1.18 x 3.1 cm	4.0 x 2.0 x 3.65 cm
Volumen	9.58 cm ³	8.12 cm ³	29.2 cm ³
Peso	13.4 gramos	9 gramos	48 gramos
Fuerza máxima permisible	2.2 Kgf/cm	1.8 Kgf/cm	15 Kgf/cm
Material de engranes	Metal	Plástico	Metal
Costo aproximado	\$ 90.00	\$ 70.00	\$ 140.00
País proveedor	México	México	México
Compatible con Arduino	si	si	Si

4.2.2 Desarrollo de la programación del algoritmo en Arduino.

Teniendo instalado el software Arduino en un ordenador, se procederá a abrir la ventana principal de dicho software, introduciendo los comandos del algoritmo para el nuevo sensor y abriendo otra ventana de Arduino, se llevó a cabo la programación del algoritmo para el servomotor seleccionado como se muestra en la Figura 32 y Figura 33 respectivamente.



```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
}  
  
void loop() {  
  int sensorValue = analogRead(A0);  
  Serial.println(sensorValue);  
  delay(500);  
}
```

Libreria invalididad encontrada en C:\Users\adan\Documents\Ardu

11 Arduino/Genuino Uno en COM3

Figura 32. Programación del Sensor HI-69 en Arduino.



```
servo §

#include <Servo.h>
Servo servoX;

void setup() {
  servoX.attach(7);
  servoX.write(0);
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  servoX.write(9);
  delay(6000);
  servoX.write(45);
  delay(4000);
}

Libreria invalida encontrada en C:\Users\adan\Documents\Ardu

15 Arduino/Genuino Uno en COM3
```

Figura 33. Programación del servomotor en Arduino.

Por último, abriendo una ventana, se llevo a cabo una programación nueva, juntando los algoritmos del nuevo sensor y del servomotor ajustando la rotación de dicho servomotor con respecto a los parámetros de las lecturas obtenidas del nuevo sensor de conductividad como se muestra en la Figura 34.



The screenshot shows the Arduino IDE interface with the following code in the main editor:

```
#include <Servo.h>
Servo servoX;
int SENSOR1 = A0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(SENSOR1, INPUT);
  servoX.attach(7);
  servoX.write(0);
}

void loop() {
  int valor_SENSOR1 = analogRead(A0);
  Serial.println(valor_SENSOR1);
  delay(500);

  if ((valor_SENSOR1 < 857) and (valor_SENSOR1 > 844))
  servoX.write(10);

  if ((valor_SENSOR1 < 800) and (valor_SENSOR1 > 600))
  servoX.write(45);

  if ((valor_SENSOR1 < 600) and (valor_SENSOR1 > 400))
  servoX.write(90);

}
```

At the bottom of the IDE, the serial monitor shows the error message: "Libreria invalida encontrada en C:\Users\adan\Documents\Ardu". The status bar at the bottom indicates "25" and "Arduino/Genuino Uno en COM3".

Figura 34. Programación del lazo de control en Arduino.

4.2.3 Instalación del nuevo sensor y el actuador seleccionado en una tarjeta Arduino Uno.

La instalación del nuevo sensor y el actuador se llevaron a cabo en una tarjeta electrónica Arduino Uno, por lo cual lo consideramos como PLC, como se muestra en la Figura 35.

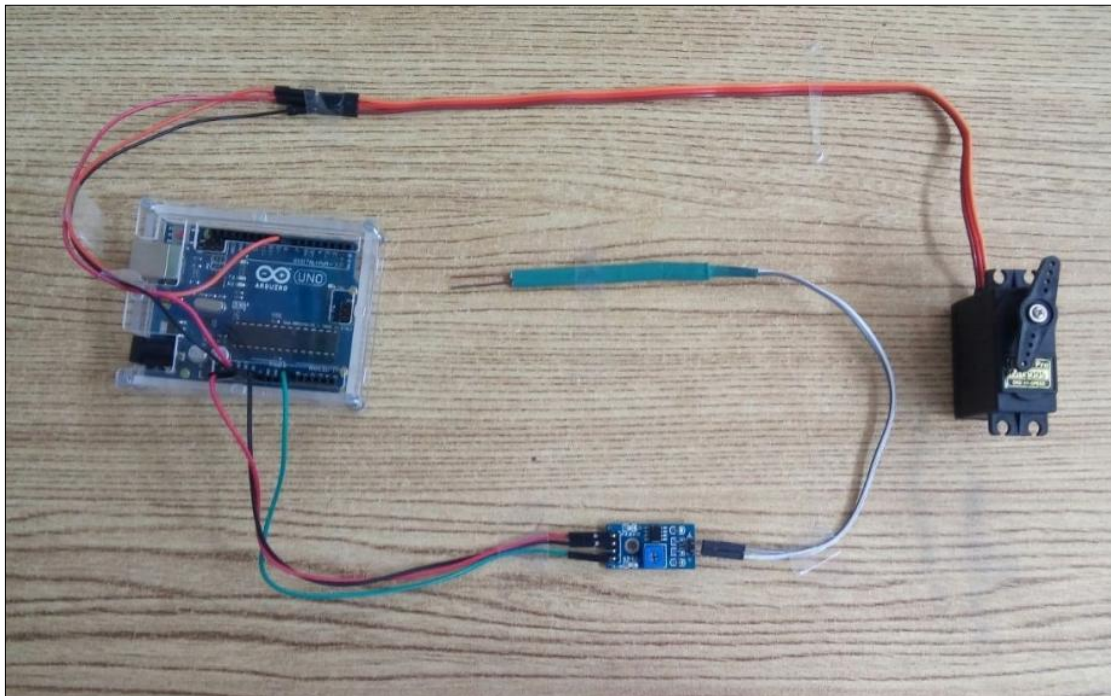


Figura 35. Instalación del sensor HI-69 y el servomotor en una tarjeta electrónica Arduino Uno.

4.3 Instalación del PLC en la estructura destinada para cristalización de sacarosa propuesto por Rodríguez y col., 2016.

4.3.1 Instalación del sensor en un reactor por lotes enchaquetado.

En la Figura 36 se muestra el diagrama de bloques retroalimentado para el elemento de control, donde el sensor, cuya función es enviar una señal de resistencia a través de un transmisor hacia un transductor para ser convertida en señal analógica, posteriormente dicha señal analógica es enviada hacia un controlador (tarjeta electrónica Arduino Uno), donde la información es procesada y

programada a través de un ordenador para finalmente enviar una señal digital como respuesta hacia el actuador.

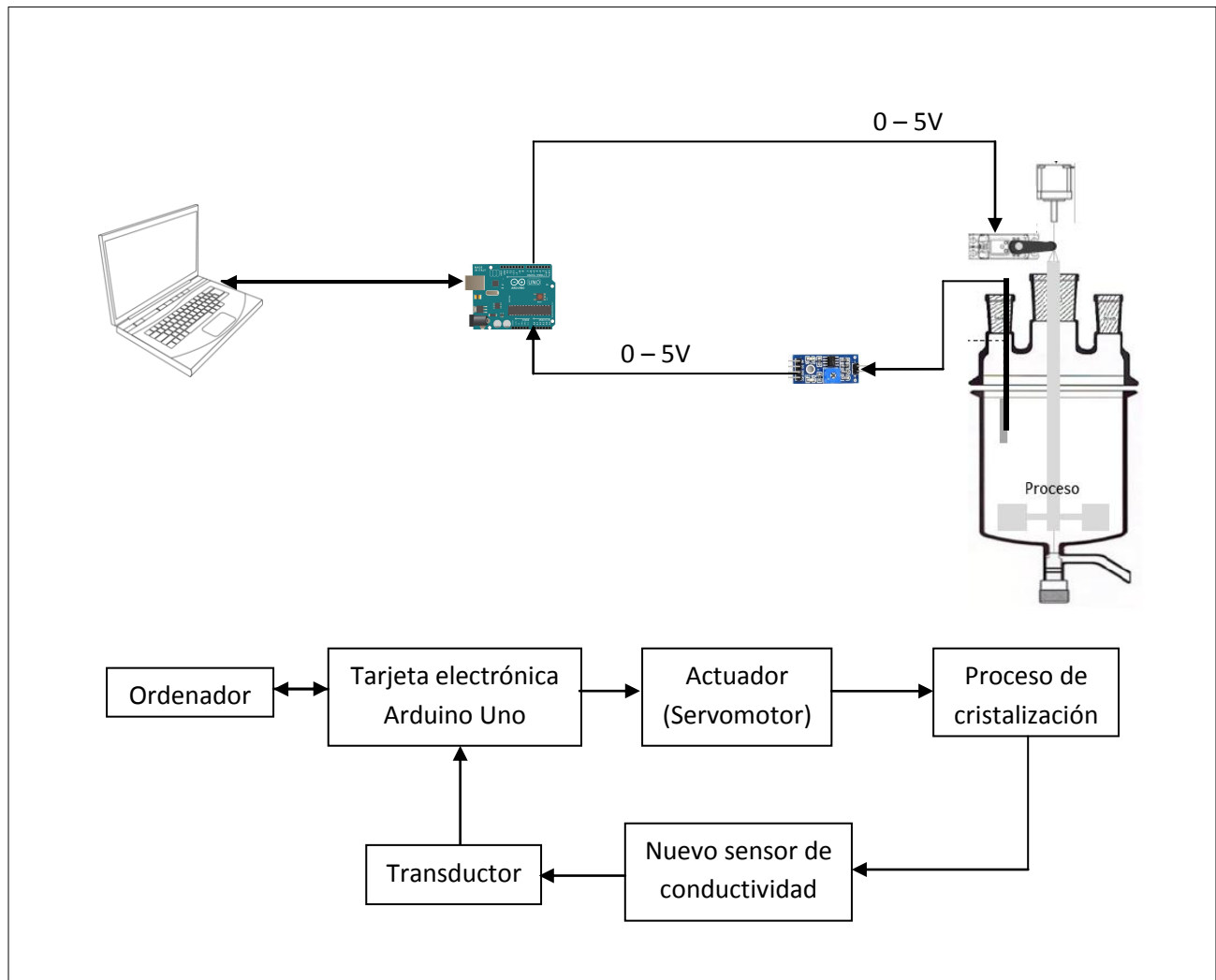


Figura 36. Diagrama de bloques del elemento de control para el proceso de cristalización de sacarosa.

Partiendo de las especificaciones requeridas por Rodríguez y col., 2016, el nuevo sensor desarrollado se propone instalarlo en la vía izquierda del reactor encaquetado propuesto por Ramírez y col., 2014, fijándolo a una distancia de 2 cm de profundidad respecto del nivel de la solución y 1.5 cm respecto de la pared de dicho reactor al centro como se muestra en la Figura 37.

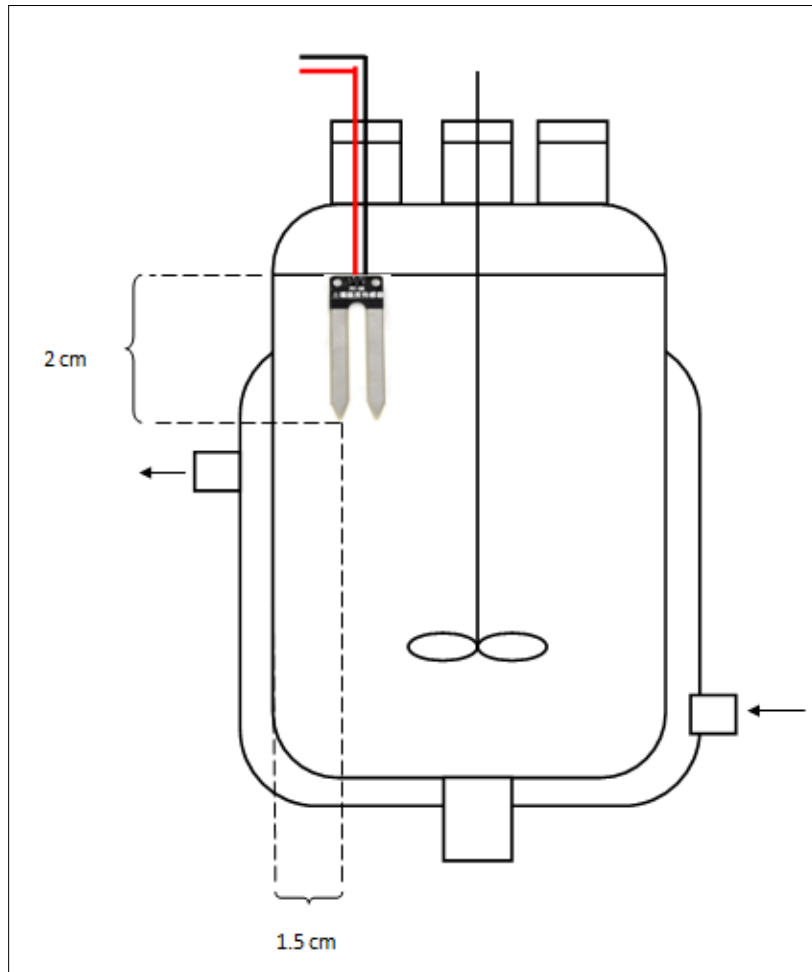


Figura 37. Instalación del nuevo sensor en un reactor por lotes enchaquetado.

4.3.2 Instalación del actuador en el agitador de paso variable.

El actuador seleccionado (servomotor) se instaló en la parte superior del agitador modificado por Rodríguez y col., 2016, como se muestra en la Figura 38 así como en la parte interna de la estructura del equipo propuesto para cristalización de sacarosa.

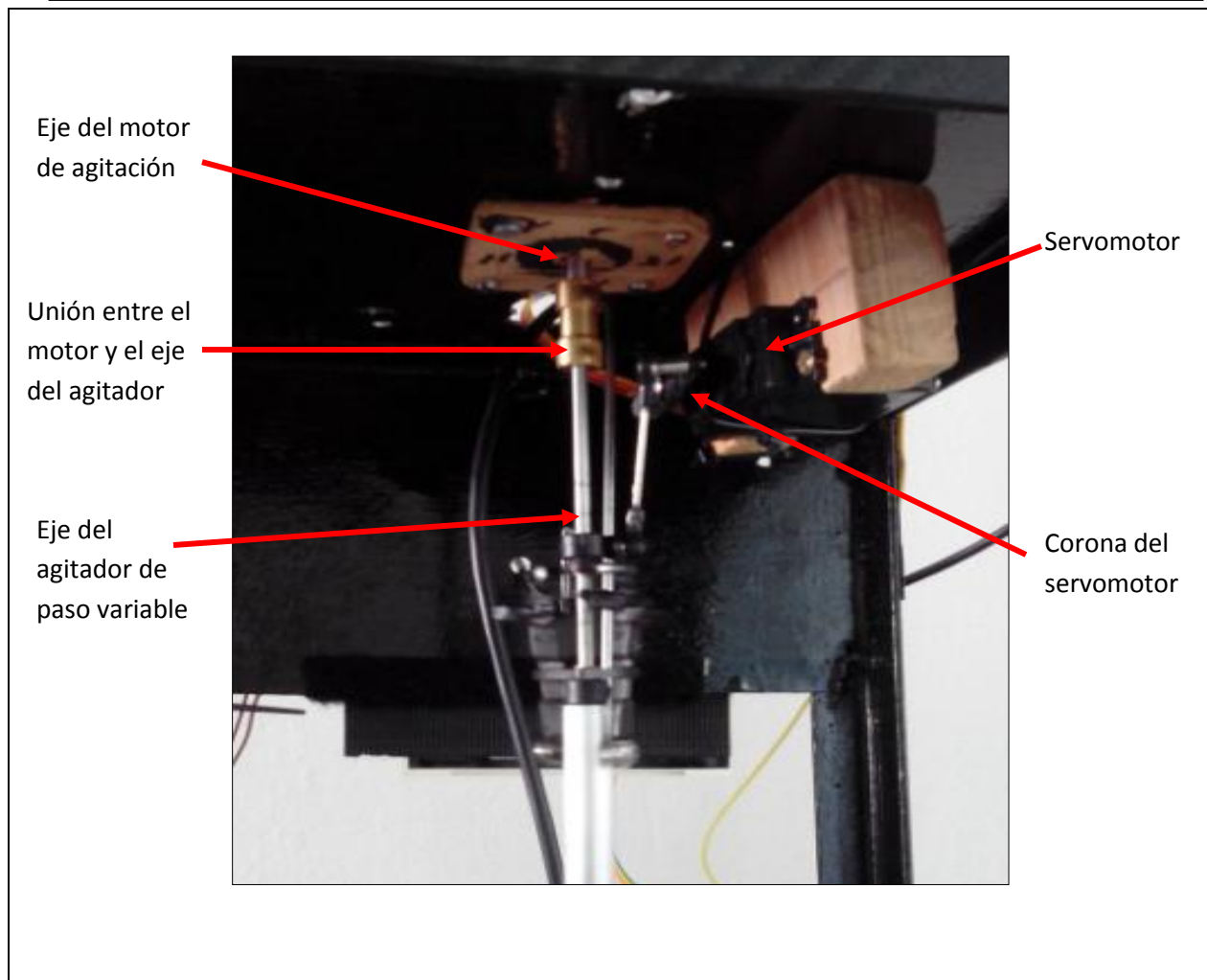


Figura 38. Instalación del actuador en la estructura de cristalización de sacarosa.

4.3.3 Instalación del software en el panel de control para el proceso de cristalización de sacarosa.

Teniendo lista la programación del sensor con respuesta a un servomotor, se procedió a instalar dicha programación en la tarjeta electrónica Arduino Mega, la cual está instalada en la estructura del equipo de cristalización como se muestra en la Figura 39.

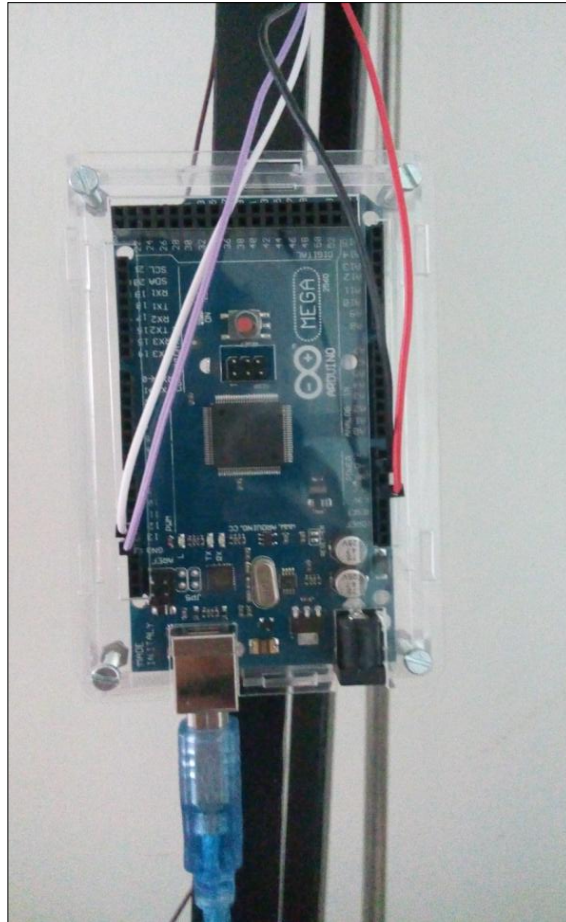


Figura 39. Tarjeta electrónica Arduino Mega.

Por último se propone la siguiente estructura del elemento de control ya finalizada para el proceso de cristalización de sacarosa propuesto por Ramírez y col., 2014, junto con Rodríguez y col., 2016, instalando en la vía izquierda el nuevo sensor desarrollado, en la vía central el agitador de paso variable mientras que en la vía derecha se propone el espacio para la toma de muestras, como se observa en la Figura 40.

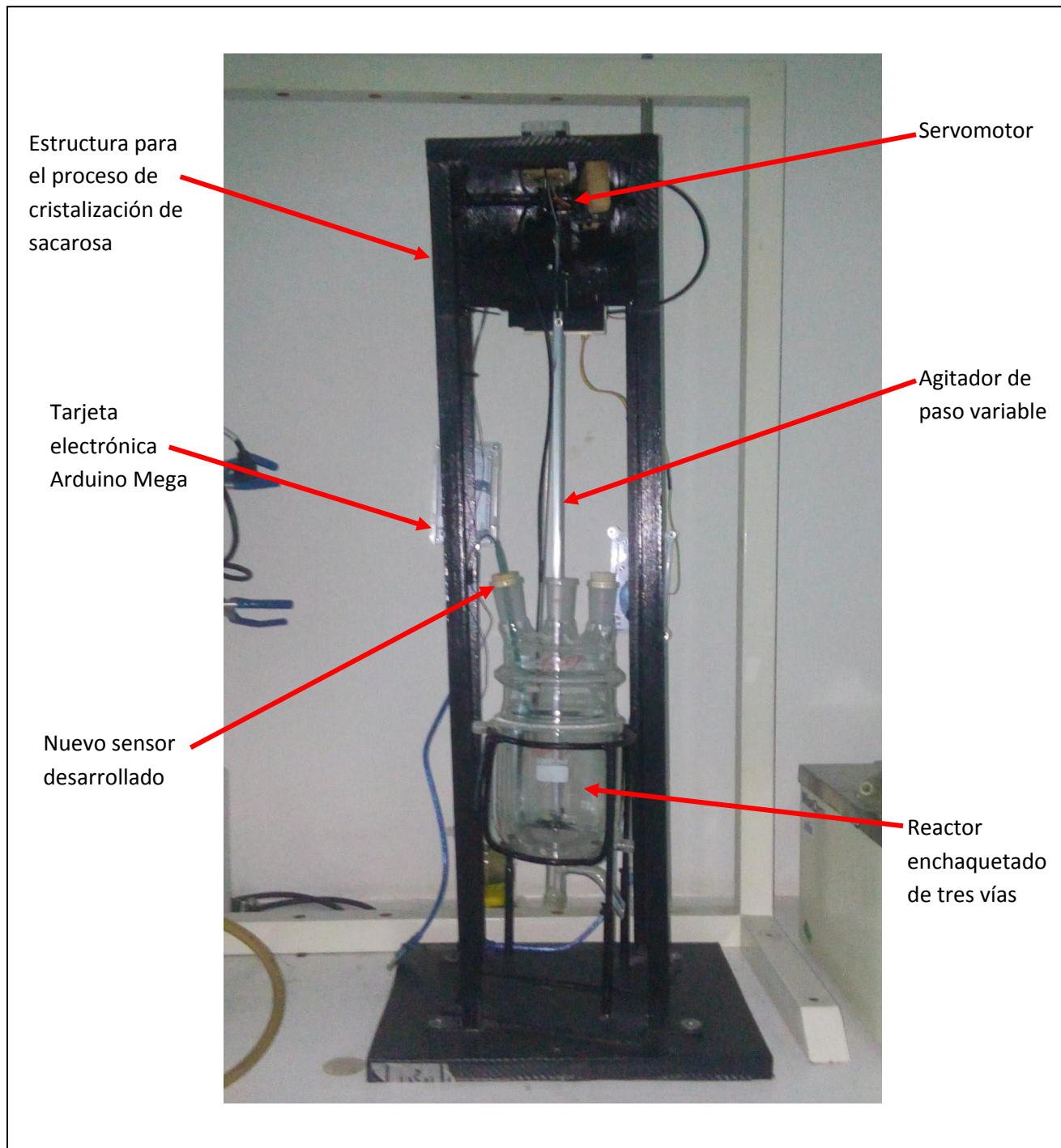


Figura 40. Propuesta final de la estructura para el proceso de cristalización de sacarosa.

Conclusiones.

A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se concluyó lo siguiente:

1. La investigación tanto de los antecedentes para el proceso de cristalización como los diferentes sensores de conductividad eléctrica compatibles con la tarjeta electrónica Arduino, permitió el desarrollo de un nuevo sensor para evaluar la conductividad eléctrica durante el proceso de cristalización de sacarosa.
2. A través del desarrollo de diferentes pruebas experimentales, fue posible generar una curva de calibración para correlacionar la conductividad eléctrica, la concentración de sacarosa y los cristales dispersos formados.
3. A través de los antecedentes de control automático e instrumentación, fue posible desarrollar un lazo de control PI reuniendo cinco etapas principales del sistema:
 - I. Tarjeta lógica programable (PLC).
 - II. Sensor (terminales compuestas por filamentos de cobre de 0.9 mm de diámetro y dos cm de largo).
 - III. Transductor (que transforma la señal enviada por el sensor).
 - IV. Generar respuesta a un actuador (servomotor).
 - V. Integración de todos los componentes en una estructura final (reactor por lotes).
4. Finalmente fue posible instalar el sistema propuesto de control en la estructura destinada como soporte principal para el reactor propuesto para el proceso de cristalización de sacarosa por lo que se puede concluir que se cumplieron cabalmente los objetivos planteados en el presente trabajo de tesis.

BIBLIOGRAFÍA.

Arduino. (2016). Genuino. Recuperado el 23 de Mayo de 2016, de <https://www.arduino.cc/>

Bohmer, M. (2011). Beginning android ADK with Arduino. United States of America: TECHNOLOGY IN ACTION.

Bolton. (2001). Control de Ingeniería. México: Alfaomega.

Caudillo, R. (2009). webcindario. Recuperado el 29 de Octubre de 2016, de <http://ricardi.webcindario.com/quimica/eltroqui.htm>

Corona, L. (2014). Sensores y actuadores, aplicaciones con Arduino. México: Grupo editorial Patria.

Crystallization, C. D. (2009). Model based soft-sensor. World academy of science, Engineering and thecnology , 1-3.

Daneri, P. A. (2008). PLC Automatización y control industrial. Buenos Aires: Hasa.

Daniel, H. (2001). Análisis Químico Cuantitativo. España: Reverte.

Electronics, T. (9 de Abril de 2014). Talos electronics. Recuperado el 25 de Abril de 2016, de <https://www.taloselectronics.com/producto/sensor-de-humedad-del-suelo/>

Fogler, S. H. (2008). Elementos de ingeniería de las reacciones químicas. México: Pearson Educación.

Hammer, C. (2001). Controladores lógicos programables. EATON.

Herrador, R. E. (2009). Guía de usuario de Arduino. Córdoba: Univerdidad de Córdoba.

HETPRO. (2016). HETPRO. Recuperado el 05 de Octubre de 2016, de <https://hetpro-store.com/sensor-de-conductividad-electrica/>

Instruments, H. (2012). Patente nº D462,024. Estados Unidos.

Jerome, H. (1975). Thermal conductivity and electrical resistivity standar reference materials. Washington: National Bureau Standars.

McCabe, W. L. (1991). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Madrid: McGraw-Hill.

Njoroge, K. P. (2008). Patente nº F17/2442/2008.

Oakton. (1998). Patente nº 08/00R2. Singapore.

Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.

Procesosbio. (Octubre de 2010). wikispaces. Recuperado el 06 de Junio de 2016, de <http://procesosbio.wikispaces.com/Cristalizaci%C3%B3n>

Ramírez, C. (2014). Diseño de agitador de paso variable y su aplicación en el proceso de cristalización de azúcar. AMIDIQ , 3199-3204.

Robotica, T. d. (2012). Libro básico de Arduino. Bogotá: Robótica.

Rodríguez, R. (2016). Desarrollo de un sistema de control PID para un mecanismo de agitacion de paso variable. Puebla: BUAP.

SEV. (2011). Seve-prendo (Equipo y vidrio científico). Recuperado el 04 de Noviembre de 2016, de <http://www.sevmexico.com/categorias/productos/galeria/?pr=321>

Smith, C. A. (1991). Control Automático de Procesos teoría y práctica. México: Limusa.

Stephanopoulos, G. Chemical Process Control and Introduction to theory and practice . New Jersey: PTR PRENTICE HALL.

TowerPro. (2014). Online shop, servomotor MG90S. Recuperado el 14 de Agosto de 2016, de <http://www.towerpro.com.tw/product/mg90s-3/>

TowerPro. (2014). Online shop, servomotor SG90. Recuperado el 14 de Agosto de 2016, de <http://www.towerpro.com.tw/product/sg90-7/>

TowerPro. (2009). Servomotor MG995, ficha técnica. Geelmed , 1-2.

William D. Castiller, J. (2007). Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2. Barcelona, España: Editorial Reverté.