



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DESARROLLO DE UN EQUIPO AUTOMÁTICO PARA
ESFERIFICACIÓN DE ALGINATO DE CALCIO Y UN
AGENTE DE LIBERACIÓN CONTROLADA”**

TESIS DE MAESTRÍA

**QUE PARA OBTENER GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

MARCO TULIO VARELA LOYOLA

ASESOR:

DR. ÁLVARO SAMPIERI CRODA

COASESOR:

DR. FRANCISCO MANUEL PACHECO AGUIRRE

BUAP

H. Puebla Z., marzo 2021



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA



ACTA DE REVISIÓN, LIBERACIÓN E IMPRESIÓN DE TESIS

Nombre del (de la) estudiante: Marco Tulio Varela Loyola

Matrícula: 217470557

Nombre del director: DR. ÁLVARO SAMPIERI CRODA

Nombre del codirector: DR. FRANCISCO MANUEL PACHECO AGUIRRE

Título de la Tesis:

“DESARROLLO DE UN EQUIPO AUTOMÁTICO PARA ESFERIFICACIÓN
DE ALGINATO DE CALCIO Y UN AGENTE DE LIBERACIÓN CONTROLADA”

Comisión Revisora:

Presidente: Dra. Mayra Ruiz Reyes

Firma: _____

Secretario(a): Dr. Irving Israel Ruiz López

Firma: _____

Vocal (1): Dr. Gamaliel Che Galicia

Firma: _____

Vocal (2): Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre

Firma: _____

Los integrantes de la Comisión Revisora expresamos que hemos leído y revisado el manuscrito de la tesis de maestría que presenta el (la) estudiante arriba indicado, por lo que **estamos de acuerdo en que se proceda con la impresión definitiva de la tesis y que el (la) estudiante presente su defensa y examen de grado en la fecha, horario y lugar que se indican a continuación.**

Fecha de examen: 17 de marzo de 2021

Hora: 16:00 hr

Día de la semana: miércoles

Lugar: reunión virtual por Microsoft Teams



BUAP.

Oficio: FIQ/SIEP/008/2021

Mtra. María Elena Ruiz Velasco
Director de la Dirección de Administración Escolar
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
PRESENTE

Reciba un afectuoso saludo y al mismo tiempo me permito presentar a usted a los integrantes del jurado de examen que para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Química sustentará el

ING. MARCO TULIO VARELA LOYOLA

perteneciente a la generación 2017 con número de matrícula 217470557 y cuyo tema de tesis es: "DESARROLLO DE UN EQUIPO AUTOMÁTICO PARA ESFERIFICACIÓN DE ALGINATO DE CALCIO Y UN AGENTE DE LIBERACIÓN CONTROLADA". Dicho jurado está integrado por:

JURADO

Presidente	Dra. Mayra Ruiz Reyes
Secretario	Dr. Irving Israel Ruiz López
Vocal	Dr. Gamaliel Che Galicia
Vocal	Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre

Asimismo, comunico a usted que el alumno cumple con todos los requisitos para poder llevar a cabo su examen de grado, y que los integrantes de este jurado están citados con anticipación para la fecha y lugar indicados a continuación.

FECHA DE EXAMEN: 17 de marzo 2021
HORA: 16:00 horas
LUGAR: Plataforma Microsoft Teams
DÍA: miércoles

Modalidad en línea.

Sin otro particular, me es grato quedar de usted.

Atentamente,
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Z. a 16 de marzo de 2021

Dra. Esmeralda Vidal Robles
Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado



c.c.p. Archivo
E-mail: esmeralda.vidal@correo.buap.mx

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72590
01 (222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
NOMENCLATURA	v
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCCIÓN.....	ix
ANTECEDENTES.	1
1.1 Alginato de sodio.....	1
1.2 Aplicaciones del encapsulamiento de materiales con alginato.....	2
1.2.1 Aplicaciones del alginato en la industria alimenticia.	2
1.2.2 Aplicaciones del alginato en la industria farmacéutica.....	3
1.2.3 Aplicaciones del alginato en la agricultura y remediación ambiental.	4
1.3 Métodos de producción de esferas de alginato de calcio.....	5
1.3.1 Métodos de dispersión.	5
1.3.2 Mecanismos de gelificación.....	8
1.4 Producción de esferas de alginato por goteo.	10
1.5 Equipos de esferificación de biopolímeros.....	12
1.6 Síntesis de antecedentes.....	16
OBJETIVOS.	17
Objetivo general.....	17
Objetivos específicos.	17
METODOLOGÍA.....	18
2.1 Establecer las condiciones de diseño.....	20

2.2	Conceptualización de los procedimientos y equipos de proceso.....	21
2.3	Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) y Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI).....	23
2.4	Definir la instrumentación, automatización y programación del sistema lógico-electrónico del equipo (diagrama bifilar).	25
2.5	Procedimiento mecánico para desarrollar el prototipo.	25
2.5.1	Selección y dimensionamiento de equipos usando heurísticas.....	26
2.5.2	Selección de materiales para construcción de los equipos del EEAC.	29
2.6	Procedimiento electrónico y eléctrico para el desarrollo del prototipo.	31
2.7	Estandarizar la operación y realizar un manual de operación del EEAC.	32
RESULTADOS		33
3.1	Establecer las condiciones de diseño del EEAC.	33
3.2	Conceptualizar los procedimientos para el diseño del EEAC.	34
3.3	Diagrama de flujo de proceso (DFP) y diagrama de tubería e instrumentación (DTI).....	35
3.4	Definir la instrumentación necesaria para la operación automática del equipo. ..	38
3.5	Desarrollo mecánico del EEAC.....	47
3.5.1	Dimensionamiento de los tanques de almacenamiento TA-201 y TA-202.	47
3.5.2	Selección y dimensionamiento de la bomba de alimentación.	52
3.5.3	Selección y dimensionamiento de la tubería.....	55
3.5.4	Sistema de goteo.	55
3.5.5	Reactor de gelificación.	56
3.5.6	Manual de operación para el EEAC.....	64
CONCLUSIONES.....		72
ANEXOS.		74
	Anexo 1.....	74

Anexo 2.....	75
Anexo 3.....	76
Anexo 4.....	87
BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Síntesis de antecedentes.	16
Tabla 2. Asignación de áreas de proceso.....	22
Tabla 3. Códigos de identificación para los equipos.....	23
Tabla 4. Tipos de adhesivos para unir acrílico.	30
Tabla 5. Propiedades físicas y químicas de las materias primas.	34
Tabla 6. Lista de instrumentos del EEAC.	41
Tabla 7. Válvulas de control de flujo del EEAC.	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructuras de los componentes del Alginato.	1
Figura 2. Métodos de dispersión de alginato (Leong et al., 2016).	6
Figura 3. Mecanismos de gelificación de alginato, (Leong et al., 2016).....	8
Figura 4. Variables que intervienen en la producción de esferas de alginato de calcio.	11
Figura 5. Mecanismo de gelificación de alginato de calcio (Haldar y Chakraborty, 2018).....	12
Figura 6. Aparato para producir perlas de alginato de calcio por el método de vibración, (Zhou et al., 2009).....	13
Figura 7. Aparato experimental para la producción de perlas de alginato de calcio, (Islam, et al., Chan, 2013).	14
Figura 8. Esquema del dispositivo experimental propio para fabricar perlas de alginato, (Voo, et al., 2016).....	15
Figura 9. Ruta metodológica propuesta para el desarrollo del EEAC.....	19
Figura 10. Metodología para establecer las condiciones de diseño.....	20
Figura 11. Desarrollo metodológico para la ingeniería conceptual.....	21
Figura 12. Metodología para el trazado del DFP y DTI.....	23
Figura 13. Metodología para el desarrollo mecánico	26
Figura 14. Metodología para el desarrollo eléctrico.....	31
Figura 15. Vista en perspectiva y superior del arreglo propuesto para el EEAC.....	37
Figura 16. Diagrama de flujo de estados de operación del EEAC.	40
Figura 17. Regulador de voltaje LM7805 de 12 V CD a 5 V CD (lado izquierdo) y módulo de dos relevadores optoacoplados a 5 V CD (lado derecho).	44
Figura 18. Placa Arduino UNO R3 y circuito integrado TIP120.	45
Figura 19. Botonera y potenciómetro del panel de control del EEAC.....	45
Figura 20. Compartimiento superior de la caja de conexiones y panel de control.....	46
Figura 21. Compartimiento inferior de la caja de conexiones y panel de control.....	46
Figura 22. Sensor de temperatura y humedad DHT11.	47
Figura 23. Hoja de especificación para el tanque de almacenamiento TA-201.	48
Figura 24. Tanque de almacenamiento TA-201 fabricado en acrílico.	49

Figura 25. Hoja de especificación para el tanque de almacenamiento TA-202.	50
Figura 26. Tanque de almacenamiento TA-202 fabricado en acrílico.	51
Figura 27. Hoja de especificación para la bomba peristáltica BP-201.	53
Figura 28. Hoja de especificación para la bomba peristáltica BP-202.	54
Figura 29. Bombas peristálticas BP-201 y BP-202.	55
Figura 30. Boquilla para goteo de alginato de sodio y bentonita en suspensión.	56
Figura 31. Hoja de especificaciones para el recipiente exterior del reactor RG-301.	57
Figura 32. Recipiente externo del reactor de gelificación RG-301.	58
Figura 33. Hoja de especificaciones para el recipiente interior del reactor de gelificación RG-301.	59
Figura 34. Recipiente interior del reactor de gelificación RG-301.	60
Figura 35. Tanque de almacenamiento TA-201 con 300 mL de bentonita y alginato de sodio en suspensión.	61
Figura 36. Tanque de almacenamiento TA-202 con 500 mL de solución de cloruro de calcio.	61
Figura 37. Goteo de alginato de sodio y bentonita en suspensión en el reactor RG-301.	62
Figura 38. Extracción de esferas de Alg-Ca del reactor RG-301, expulsión del recipiente contenedor de las esferas (lado izquierdo) y liberación de las esferas en el recipiente contenedor de producto terminado (lado derecho).	63
Figura 39. Producto terminado.	63
Figura 40. Botón de encendido del EEAC en el costado de la caja de conexiones.	64
Figura 41. Válvulas para el control de flujo de solución de cloruro de calcio y suspensión de alginato de sodio.	65
Figura 42. Botón de arranque de la bomba BP-202 y led indicador de funcionamiento.	66
Figura 43. Botón de arranque de la bomba BP-201, led indicador de funcionamiento y potenciómetro para regular la velocidad de alimentación de alginato.	66
Figura 44. Parte del programa en el que es posible cambiar los tiempos de alimentación de las bombas BP-201 y BP-202.	67
Figura 45. Botón para accionar los servomotores y led indicador de funcionamiento de servomotores.	67
Figura 46. Extracción del recipiente contenedor de las esferas de Alg-Ca.	68

Figura 47. Pantalla del monitor serial de Arduino UNO.....	69
Figura 48. Válvula de VF-301 para eliminar la solución de cloruro de calcio agotado del reactor RG-301.....	70

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción
ANSI	American National Standard
CAD	Computer Aided Design
CAS	Chemical Abstracts Service
cm	Centímetro
D	Diámetro interior del tanque
D_i	Diámetro del impulsor
DFP	Diagrama de flujo de proceso
DTI	Diagrama de tubería e instrumentación
d_d	Diámetro de la gota [milímetros]
d_p	diámetro de la esfera de alginato [milímetros]
d_T	diámetro de la boquilla [milímetros]
E	Distancia del fondo del tanque a el impulsor [centímetros]
F_o	Número de Fourier [adimensional]
H	Altura del líquido en el tanque [centímetros]
ISA	Instrumentation Symbols and Identification
L	Largo de las paletas del agitador [centímetros]
m	Metro
min	Minuto
mL	Mililitro
mm	Milímetro
m/v	Masa/volumen
N	Revoluciones por segundo del impulsor

Np	Número de potencia [adimensional]
Nq	Número de flujo [adimensional]
Oh	Número de Ohnesorge [adimensional]
P	Potencia consumida por el impulsor [kW]
Q	Flujo [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
Re	Número de Reynolds [adimensional]
rpm	Revoluciones por minuto
t	Tiempo [segundos]
u	Velocidad de caída de la gota [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
W	Ancho de las paletas del agitador [metros]

Letras griegas

γ	Tensión superficial [$\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$]
ρ	Densidad [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
μ	Viscosidad dinámica [Pa.s]
μL	Microlitro
μm	Micrómetro

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló un equipo automático para esferificación de alginato de calcio y un agente de liberación controlada que será usado en la Facultad de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Se inició estableciendo las condiciones de diseño a partir de la recopilación, análisis y síntesis de 1) las especificaciones de las esferas de alginato requeridas por el grupo de investigación de Ingeniería de los Procesos Químicos y Remediación Ambiental; 2) las propiedades físicas y químicas del alginato de sodio, la bentonita y el cloruro de calcio a partir de una consulta de las hojas de seguridad de estas materias primas de los proveedores química Meyer y Sigma Aldrich y 3) de las condiciones operacionales del equipo. Posteriormente, mediante la ingeniería conceptual, se homologaron las operaciones unitarias con los equipos necesarios para cada una de las áreas del proceso. Se trazaron los diagramas de flujo de proceso (DFP) y de tubería e instrumentación (DTI) siguiendo la metodología establecida por Turton, *et al.*, (2012) y Towler y Sinnott, (2013). Se seleccionaron y dimensionaron los equipos necesarios para llevar a cabo las operaciones unitarias almacenamiento de líquidos, transporte de fluido, reacción de gelificación por intercambio iónico y separación mecánica de un sólido de un líquido. Por último, se construyó cada uno de los recipientes necesarios para el proceso, con el material seleccionado a partir de una evaluación realizada a diversos materiales de prototipado, se realizaron las pruebas de funcionamiento de cada equipo individual y de todo el proceso.

ABSTRACT

In this work an automatic equipment for production of calcium alginate spheres and a controlled release agent was developed, in the first stage, the design conditions were established from the collect, analysis and synthesis of 1) calcium alginate spheres specification established by the Chemical Process Engineering and Environmental Remediation group; 2) physical and chemical properties of raw materials as sodium alginate, bentonite and calcium chloride and, 3) operational conditions of the equipment. Subsequently, through conceptual engineering, unit operations were homologated with the necessary equipment for each of process areas. The process flow diagram (DFP) and pipeline and instrumentation diagram (DTI) were drawn following the methodology proposed by Tourton *et al.*, (2012) and Towler & Sinnott (2013). The necessary equipment for liquid storage, fluid transport, liquid dispersion, gelation reaction by ionic exchange and mechanical separation of solid from a liquid was selected and sized, the construction material was selected evaluating prototyping materials. The vessels, pumps, valves and pipelines were assembled, finally the whole process was tested in order to assure the alginates spheres production.

INTRODUCCIÓN

El alginato de sodio es un biopolímero que se obtiene principalmente de algas marinas marrones y por sus propiedades se usa como espesante y estabilizante en la industria alimentaria, sin embargo, la propiedad de mayor interés que tiene este biopolímero, es la de formar geles en presencia de un ion divalente como Ca^{2+} , Mg^{2+} , por mencionar algunos, (Lopes da Silva, *et al.*, 2017). Por lo que ha habido una amplia investigación basada en el encapsulamiento de materiales para su liberación controlada usando alginato. Estas investigaciones han cobrado gran relevancia debido a que el encapsulamiento con alginato de calcio tiene bajo costo, es biocompatible y biodegradable, (He, *et al.*, 2015).

En la Facultad de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) se han llevado a cabo investigaciones sobre el uso de fertilizantes de liberación controlada que han resultado positivas en cultivos de hidroponía para lechuga (*Lactuca saliva*), estas pruebas se han realizado con esferas de alginato de calcio (Alg-Ca) obtenidas en el laboratorio mediante la técnica de dispersión líquido-aire y gelificación externa. Este método, llamado extrusión por goteo, es uno de los más usados en él que se extruye una solución de alginato a través de un capilar y se deja caer gota a gota en una solución de cloruro de calcio. La gelificación es prácticamente instantánea, por lo que la producción de esferas de alginato se hace difícil de controlar para obtener un producto de tamaño homogéneo.

Con el desarrollo de un equipo automatizado para esferificar Alg-Ca se obtiene un medio de transporte para un agente de liberación controlada, ya sea fertilizante o herbicida que pueden ser contenidos en materiales arcillosos, zeolíticos o cerámicos que permita un mejor aprovechamiento de estos agroquímicos en los cultivos o que puedan ser usados para remediación ambiental. Al producir esferas de Alg-Ca con un solo equipo y siguiendo un procedimiento estándar, se obtiene un producto cuyas características físicas sean homogéneas, además, se incrementa la producción de esferas de Alg-Ca.

ANTECEDENTES.

1.1 Alginato de sodio.

Los alginatos son biopolímeros de fórmula general $(C_6H_8O_6)_n$ que están compuestos por 1,4- β -D ácido manurónico (monómero M) y α -L-ácido gulurónico (monómero G), como se muestra en la Figura 1. Los alginatos se obtienen de dos principales fuentes: bacterias y algas marinas (algas marrones).

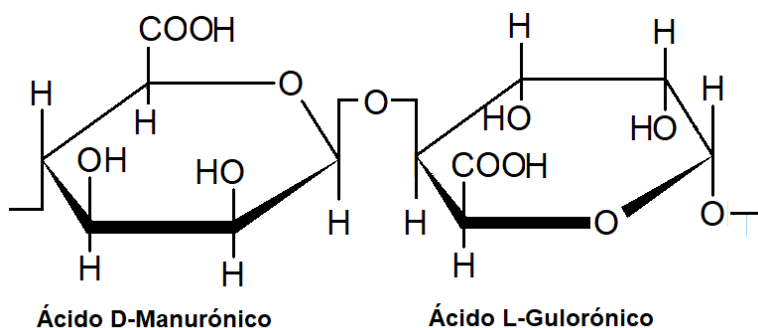


Figura 1. Estructuras de los componentes del Alginato.

De acuerdo con Qin, *et al.*, (2018), las aplicaciones del alginato están basadas en tres propiedades principalmente, la primera de ellas es como espesante ya que cuando el alginato se disuelve en una solución acuosa aumenta la viscosidad de la solución, la segunda propiedad es la de formar fibras o películas de alginato de sodio o calcio y la tercera, que es la propiedad principal del alginato, es la de formar geles en presencia de algún catión divalente (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} y Ba^{2+}).

La aplicación de esta última propiedad en biotecnologías emergentes es tan amplia que va desde la administración de fármacos de liberación controlada, fabricación de fibras, inmovilización de microorganismos y encapsulamiento de fertilizantes y herbicidas para su lenta liberación (Lopes da Silva *et al.*, 2017).

El encapsulamiento está definido como el proceso de confinamiento de un compuesto o compuestos activos dentro de una matriz polimérica en forma de partículas. El objetivo del encapsulamiento podría ser, proteger, estabilizar, liberar de forma controlada el o los compuestos activos (Lee, *et al.*, 2013).

Los productos de la gelificación de alginato se pueden agrupar en tres categorías de acuerdo con el tamaño de la partícula que se obtiene, nanopartículas, micropartículas y tamaño milimétrico.

Las nanopartículas tienen un tamaño menor a 100 nm y una forma irregular, en ellas se pueden encapsular células, sólidos, líquidos y suspensiones coloidales que se encuentran en la fase continua del hidrogel.

Las microcápsulas y de tamaño milimétrico son de un tamaño mayor a 1,000 μm pueden tener una forma esférica u oval, en esta forma es posible encapsular células, sólidos o fármacos, los materiales encapsulados con alginato pueden estar dispersos en una fase continua como esferas de una sola capa o dispersos entre las membranas en las esferas multicapa.

1.2 Aplicaciones del encapsulamiento de materiales con alginato.

El alginato de sodio se ha usado para encapsular diversos agentes, desde células vivas, fármacos proteicos, enzimas, ingredientes alimentarios, compuestos volátiles y catalizadores. Los sistemas inmovilizados se han empleado en diversas aplicaciones, entre ellas la ingeniería de tejidos, la administración controlada de fármacos, la biocatálisis para la producción de productos químicos, la estabilización de los ingredientes alimentarios, la adsorción de contaminantes y el almacenamiento de energía (Leong, *et al.*, 2016).

1.2.1 Aplicaciones del alginato en la industria alimenticia.

El alginato de sodio se emplea en la industria alimenticia como estabilizante para la elaboración de helado ya que permite reducir la formación de cristales de hielo durante su

congelación, también se usa el alginato de propilenglicol para estabilizar la espuma de la cerveza (Qin, *et al.*, 2018).

Por otra parte, la propiedad de gelificar a temperatura ambiente del alginato de sodio ha sido aplicada para encapsular componentes alimenticios como ciertos antioxidantes (Ozkan, *et al.*, 2019), el extracto de cocoa (Lupo, *et al.*, 2015) y para producir una imitación de caviar que se obtiene extruyendo una solución de alginato de sodio con colores y sabores seleccionados en una solución de cloruro de calcio para obtener esferas de aspecto y textura parecidos al caviar (Goh, *et al.* 2012).

Aunque otros biopolímeros como quitosano, pectina, y la carboximetilcelulosa son usados para encapsular componentes alimentarios en sistemas reticulados, el alginato de sodio es el más utilizado por sus propiedades no tóxicas, biodegradables, biocompatibles y de gelificación superiores (Ozkan, *et al.*, 2019).

1.2.2 Aplicaciones del alginato en la industria farmacéutica.

En la industria farmacéutica se requiere de un sistema que pueda liberar los fármacos de forma controlada, el encapsulamiento de estos fármacos permite su protección contra descomposiciones o reacciones químicas no deseadas, (Leick, *et al.*, 2011).

El alginato de calcio presenta excelentes propiedades de biodegradabilidad, biocompatibilidad y no toxicidad, por ello se ha utilizado para encapsular fármacos como los que se describen a continuación.

El alginato de sodio en combinación con poliésteres biodegradables se usó para incrementar el encapsulamiento de compuestos hidrofílicos, también se propuso un método de fabricación de una sola etapa, como resultado se mejoró la captó liberación de los fármacos solubles en agua como la metoclopramida (Lim, *et al.*, 2013).

La metformina es un agente hipoglucemiante oral que se utiliza en el tratamiento de diabetes tipo 2 que tiene baja biodisponibilidad y vida media corta, Maestrelli, *et al.*, (2017) utilizaron metformina liofilizada en dispersión niosoma incorporadas en perlas de alginato como una forma de dosificación oral y sostenida del fármaco.

El aceite esencial de tomillo (*Thymus vulgaris*) es conocido por sus propiedades expectorantes, antiespasmódicas, relajantes musculares y diuréticas, para prevenir su oxidación y volatilización, incrementar su vida útil y permitir su liberación controlada, Volić, *et al.*, (2018) propusieron el uso de alginato con proteína de soya para encapsular este aceite esencial y así obtener una liberación controlada. El material encapsulado se probó en condiciones del tracto digestivo humano obteniendo buenos resultados.

En general, la liberación de fármacos solubles en agua está controlada predominantemente por la difusión, mientras que la liberación de los que son insolubles en agua depende fuertemente de la erosión del gel (Goh, *et al.*, 2012).

1.2.3 Aplicaciones del alginato en la agricultura y remediación ambiental.

De acuerdo con la secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación (SAGARPA,2003), el uso de fertilizantes se ha vuelto indispensable debido a la baja fertilidad de la mayoría de los suelos para los altos rendimientos y la buena calidad que se esperan en la actualidad, por lo que hacer un uso adecuado de ellos es importante para una agricultura sostenible.

Con el afán de incrementar la producción agropecuaria se han realizado diferentes pruebas para suministrar fertilizantes y herbicidas a los cultivos. En la Facultad de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla se han realizado investigaciones que incluyen el encapsulamiento de fertilizantes con alginato de calcio en esferas de tamaño milimétrico para su aplicación en cultivos hidropónicos de lechuga (*Lactuca saliva*) con resultados positivos.

En este orden de ideas, el fósforo es uno de los macronutrientes requeridos por las plantas para su crecimiento, sin embargo, el uso excesivo de fertilizantes químicos ha provocado la acumulación de fosfatos insolubles en forma de CaHPO_4 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, FePO_4 y AlPO_4 , Liu, Wu, y Chang, (2008) propusieron el encapsulamiento de fertilizante bacteriano (*C. cellulans GS6 cells*) para liberar y movilizar fosfatos insolubles en el suelo y que puedan ser aprovechados por las plantas.

Respecto a la aplicación de herbicidas, se han realizado investigaciones para reducir su uso utilizando formulaciones de liberación controlada. Se estudió el encapsulamiento con alginato de calcio y bentonita de herbicidas con alta solubilidad en agua como la metribuzina y el cloridazón, y se encontró que el uso del encapsulamiento disminuyó la presencia de estos herbicidas en un suelo calcáreo, (Flores Céspedes, *et al.*, 2013).

Por otra parte, en el ámbito de la remediación ambiental, el alginato de sodio en combinación con montmorillonita se ha usado para absorber pesticidas catiónicos como el dicloruro de paraquat (1,1,-dimetil-4-4-dicloruro de piridina) de soluciones acuosas (Etcheverry, *et al.*, 2017).

En este mismo orden de ideas, las esferas de alginato de calcio con arcilla de aluminio encapsulada se han usado para adsorber contaminantes como pentaclorofenol (biocida) o de la safranina que es un colorante catiónico (Lezehari, *et al.*, 2010).

1.3 Métodos de producción de esferas de alginato de calcio.

Se han reportado diversos métodos de producción de esferas de alginato de calcio, por lo que, la elección del método de producción depende de las características requeridas en el producto final. El proceso para la producción de esferas de alginato de calcio se divide en dos partes principales, la primera es la dispersión del alginato en una solución y la segunda es la gelificación de las gotas de la solución de alginato (Leong, *et al.*, 2016).

1.3.1 Métodos de dispersión.

Para realizar la dispersión de la solución de alginato se utilizan tres métodos mostrados en la Figura 2.

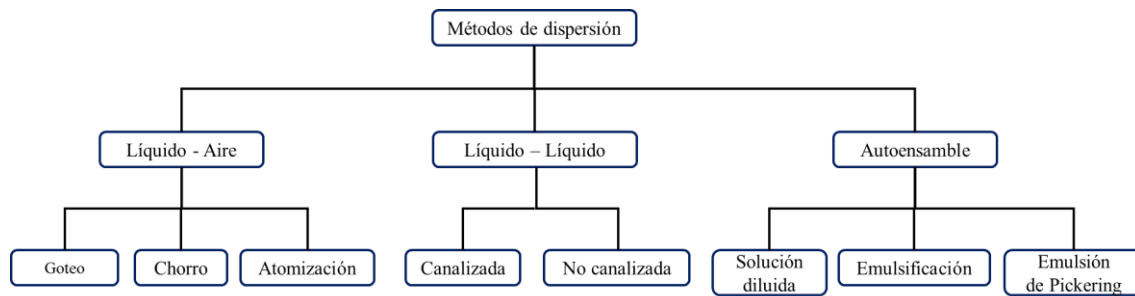


Figura 2. Métodos de dispersión de alginato (Leong *et al.*, 2016).

1.3.1.1 Líquido – aire.

Este método implica la dispersión de una solución de alginato en gotas de líquido en aire usando un sistema de boquillas. Hay tres categorías dentro de este método que dependen del flujo volumétrico al que se extruye el alginato en la boquilla:

- a. Goteo. Presenta baja tasa de flujo volumétrico y es el método más usado debido a que es muy simple, las gotas de solución de alginato son extruidas a través de una boquilla y se dejan caer una a una en una solución que contiene el catión divalente (Ca^{2+}). Las perlas obtenidas por este método son grandes, (mayores a 1 mm) por la acumulación de volumen en la caída. Este método se usa para producciones bajas.
- b. Chorro. Flujo volumétrico moderado, la producción de perlas se puede acrecentar aumentando el flujo volumétrico del alginato para formar un chorro de flujo laminar. El chorro de líquido se rompe naturalmente para formar gotas que caen en la solución que contiene el catión bivalente para formar las perlas de alginato. Usando este método se pueden producir perlas de 2 mm de diámetro
- c. Atomización. Tasa de flujo volumétrico alta, básicamente es la dispersión de un sol del alginato en aerosol para formar micropartículas, el método es sencillo y el tamaño de las partículas formadas va desde 10 a 100 μm .

1.3.1.2 Líquido -Líquido.

Consiste en la dispersión de un sol de alginato en una fase continua de líquido inmisible que forma un modelo de emulsión agua en aceite antes de la gelificación, este método es conocido como el método de emulsificación y se usa normalmente para producir un tamaño de partículas de alginato que varía de 1 a 1,000 μm . Los factores que influyen en el perfil del tamaño de partícula son la concentración del alginato, las condiciones de gelificación y la formulación del surfactante, esta técnica se divide en dos categorías:

- a. Emulsión canalizada. En este proceso, las gotitas se forman una a una desde un canal y su diámetro dependerá de la longitud del canal. Las gotitas monodispersas se forman usando aberturas de canal uniformes, tal como se usan en microfluidos y emulsificación por membrana.
- b. Emulsión no canalizada. Se usa agitación mecánica, normalmente a velocidades de mezclado menores a 1,000 rpm. El tamaño de la microperlas es inversamente proporcional a la entrada de energía durante la agitación. Este método puede producir microperlas con un amplio rango de tamaños de 20 a 1,000 μm , aunque la distribución de tamaño generalmente es amplia.

1.3.1.3 Autoensamble.

La clave de este proceso es la formación de partículas coloidales a través de procesos químicos antes de que los bloques se auto ensamblen en nanopartículas de alginato. Se han desarrollado tres tipos de autoensamblaje:

- a. Soluciones diluidas. En este método las nanopartículas de alginato se forman dejando caer una solución diluida de cloruro de calcio (por ejemplo 0.008% m/v) en una solución diluida de polímero de alginato (por ejemplo 0.05 m/v) bajo agitación vigorosa.
- b. Microemulsiones. A diferencia de otras técnicas de emulsificación que requieren de fuerza de corte, la formación de gotas en una microemulsión es espontánea mediante el uso de tensoactivos.

- c. Emulsiones de Pickering. En este método se usan partículas sólidas para estabilizar la emulsión, en algunos casos se usan nanopartículas de alginato de calcio o CaCO_3 (Leong *et al.*, 2016), esta técnica se ha usado para preparar esferas con núcleo de aceite.

1.3.2 Mecanismos de gelificación.

Después de la dispersión del sol de alginato dentro de las gotas, el siguiente paso es la gelificación mediante cationes bivalentes. Las bivalentes se unen a los bloques de guluronato para formar la estructura llamada “caja de huevo”. El grado de afinidad del alginato hacia los cationes bivalentes varía de la siguiente manera $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Ba} > \text{Sr} > \text{Ca} > \text{Co}$, sin embargo, el catión de calcio (Ca^{2+}) es el más usado por su baja toxicidad comparado con los otros cationes (Mørch, *et al.*, 2006).

Se pueden usar diferentes tipos de sales de calcio para obtener el gel de alginato, estas sales se dividen en tres categorías: soluble, parcialmente soluble e insoluble. El cloruro de calcio (CaCl_2) es muy soluble en agua (74.5 g/100 mL de agua) y causa gelificación instantánea, por otra parte, el sulfato de calcio (CaSO_4), que es parcialmente soluble (0.205 g/100 mL de agua) permite la lenta disociación de los iones Ca^{2+} pero se dificulta el control de la cinética de la gelificación, por último, el carbonato de calcio (CaCO_3) es prácticamente insoluble (0.00066 g/100 mL de agua) por lo que se usa cuando se desea una reticulación gradual.

La Figura 3 presenta los mecanismos de gelificación que se describen en los párrafos siguientes.

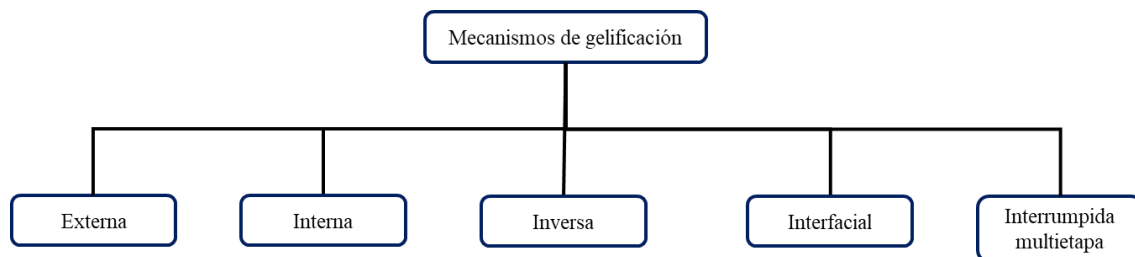


Figura 3. Mecanismos de gelificación de alginato, (Leong *et al.*, 2016).

1.3.2.1 Externo.

La gelificación externa es el proceso clásico y quizás el que se usa más ampliamente para la formación de hidrogeles de alginato. En este proceso los iones de Ca^{2+} son introducidos dentro de las gotas de alginato formadas por los métodos de dispersión líquido – líquido o aire – líquido. Los iones de Ca^{2+} se difunden hacia adentro en los espacios intersticiales entre las cadenas de polímeros de alginato para iniciar la reticulación.

1.3.2.2 Interno.

En este método se usa una sal de calcio insoluble como CaCO_3 , un sol de alginato que contiene el carbonato de calcio se emulsiona en una fase oleosa para después agregar ácido acético para reducir el pH y así inducir la disociación del CaCO_3 en Ca^{2+} , dióxido de carbono y agua, con lo cual comienza la gelificación, dado que la reticulación y gelificación se inician en el interior de la gota, el método se denomina gelificación interna.

1.3.2.3 Inverso.

En este método de gelificación una solución acuosa o agua/aceite conteniendo los iones de Ca^{2+} son extruidos gota a gota dentro de una solución de alginato. Después del contacto los iones de Ca^{2+} se difunden fuera de la periferia de la gota y se entrecruzan con las capas de polímero de alginato que rodean a la gota. El proceso de gelificación ionotrópica continúa hasta que se agotan los iones libres de Ca^{2+} , al final, la gota de solución de los iones Ca^{2+} es engullida por la membrana semipermeable de Ca – alginato. Este método solo se usa cuando las gotas del núcleo líquido (acuoso o aceite) se generan mediante el método de aire - líquido. La característica principal de este método es el uso de un aparato simple para producir las cápsulas, no se requiere de una boquilla concéntrica, sin embargo, las cápsulas producidas no siempre obtienen la forma esférica debido a la deformación que sufren al chocar con el fondo del recipiente.

1.3.2.4 Interfacial.

En este proceso, un aceite se emulsiona en una dispersión acuosa de nanopartículas de CaCO_3 . Se permite que las nanopartículas se auto ensamblen en la interfaz para formar una emulsión agua/aceite de Pickering. La emulsión de Pickering se separa antes de que se recoja la parte superior (que es rica en gotitas de aceite) y se disperse en sol de alginato. Posteriormente se agrega ácido acético al sistema de emulsión para inducir la disolución de las nanopartículas de CaCO_3 en la interfaz agua/aceite. Después de la disolución se liberan los iones de Ca^{2+} y se entrecruzan con los polímeros de alginato en la interfaz agua/aceite para formar la membrana del gel. La gelificación interfacial es mejor para formar cápsulas de alginato con núcleo de aceite, en comparación con los otros procesos.

1.3.2.5 Gelificación interrumpida en multipasos.

En este mecanismo, el hidrogel se prepara por la interrupción y repetición de un mecanismo de gelificación externa en la que las capas de membrana se forman secuencialmente desde la capa externa hacia la capa interna del núcleo mediante la inmersión alternante en una solución de CaCl_2 y agua.

1.4 Producción de esferas de alginato por goteo.

La producción de esferas de alginato de calcio con la forma y el tamaño deseados depende de las propiedades del alginato en suspensión como la viscosidad, la tensión superficial y la densidad y de las características de los equipos de producción como el diámetro de la boquilla, la distancia entre la superficie de la solución de cloruro de calcio y la boquilla y por último, la profundidad de la solución de cloruro de calcio, la Figura 4 muestra las variables involucradas en el proceso de producción de esferas de alginato de calcio, (Chan, *et al*, 2009).

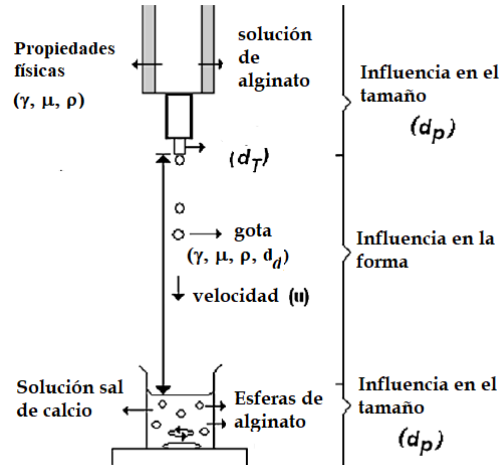
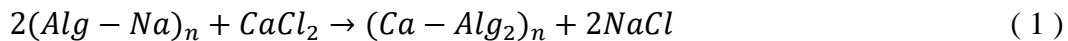


Figura 4. Variables que intervienen en la producción de esferas de alginato de calcio.

Donde γ es la tensión superficial de la suspensión en $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$, μ es la viscosidad en $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, ρ es la densidad en $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$, d_T es el diámetro de la boquilla en m, d_p es el diámetro de la gota y u es la velocidad de caída de la gota en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

La reacción química de gelificación por intercambio iónico es prácticamente instantánea Ecuación (1), se lleva a cabo cuando una gota de alginato de sodio (Alg-Na) entra en contacto con la superficie de una solución de CaCl_2 .



El mecanismo de gelificación propuesto por (Haldar y Chakraborty, 2018), mostrado en la Figura 5 es el siguiente, una vez que la solución de Alg-Na se agrega gota a gota a la solución de cloruro de calcio, los cationes (Ca^{2+}) se comienzan a unir con la parte aniónica de la cadena (O^-). La reacción de gelificación comienza cerca de la interfaz donde la gota toca la superficie de la solución de CaCl_2 . El proceso de gelificación implica la reorganización de las cadenas poliméricas orientadas al azar en una estructura de red ordenada, este proceso también está asociado con la eliminación del agua atrapada. Los iones de Na^+ producidos de la disociación del sol de alginato pasan a través de la membrana primaria hacia la solución de electrolito, simultáneamente, los iones de Ca^{2+} pasan del electrolito hacia dentro de la membrana para

ocupar los lugares vacíos dejados por los iones Na^+ en la macromolécula de alginato, el proceso neto es una transferencia de iones en ambas fases, sol y electrolito. Es evidente que la rapidez de formación del gel (el proceso de intercambio de los iones de Na^+ entre la macromolécula del sol y el ion de Ca^{2+} de la solución de electrolito), es más grande al inicio y después decrece en tiempos más largos.

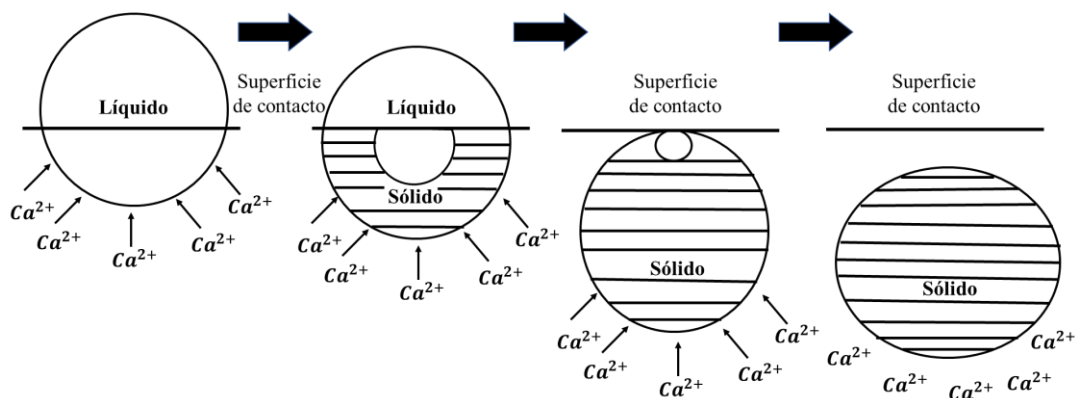


Figura 5. Mecanismo de gelificación de alginato de calcio (Haldar y Chakraborty, 2018).

De acuerdo con (Lee *et al.*, 2013) los factores que influyen en la esfericidad y tamaño del producto son la aceleración de la gota en la caída, la concentración de calcio en la solución gelificante y el diámetro de la boquilla del goteador. El tiempo de curado en la solución gelificante influye solo en el tamaño de la esfera de alginato de calcio.

1.5 Equipos de esferificación de biopolímeros.

Lee, *et al.*, (2013) proponen algunas características que se deben tomar en cuenta para el diseño de las esferas de alginato como son, el tamaño, la distribución del tamaño, las propiedades de transporte de masa, la biocompatibilidad, las propiedades de hinchamiento, la solubilidad y la estabilidad física y química de la esfera. Los equipos mostrados a continuación fueron desarrollados a nivel laboratorio.

El equipo propuesto en la Figura 6 se utilizó para producir esferas de alginato de calcio de tamaño y forma controladas con proteínas inmovilizadas utilizando vibración sónica (Zhou, *et al.*, 2009).

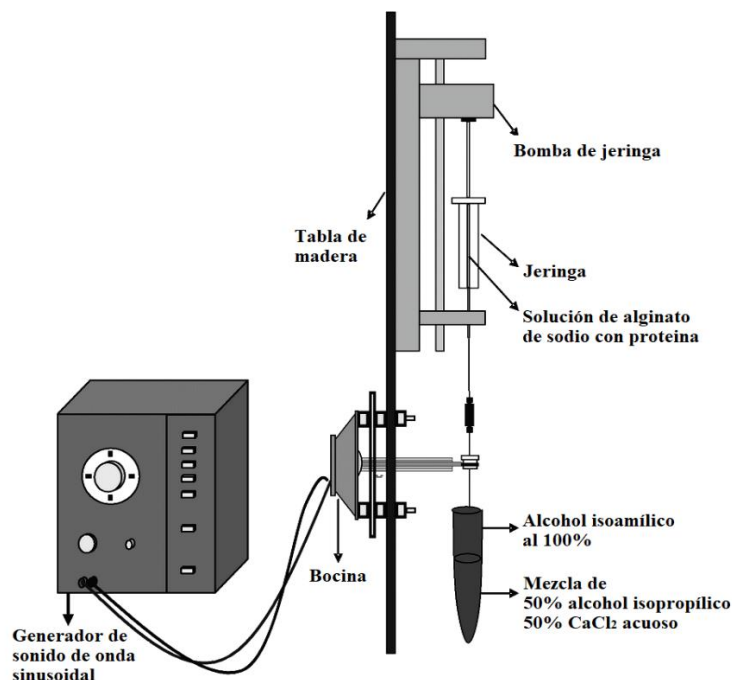


Figura 6. Aparato para producir perlas de alginato de calcio por el método de vibración, (Zhou *et al.*, 2009).

En este equipo se utilizó un capilar de 75 μm de diámetro variando el flujo de alimentación de alginato de sodio de 0.4 a 2 $\mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ para obtener esferas con un diámetro aproximado de 14 μm . Por otra parte, usando un capilar con diámetro de 30 μm y un flujo de alimentación de 0.2 $\mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ se produjeron esferas de alginato de calcio con un diámetro promedio de 8.72 μm .

En la Figura 7 se muestra otro dispositivo desarrollado para esferificar alginato con bohemia, en este dispositivo se utilizó un capilar con 1.65 mm de diámetro y una velocidad de alimentación de 0.5 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ (Islam, *et al.*, 2013). En el equipo descrito se produjeron esferas de alginato de calcio de 2 mm de diámetro.

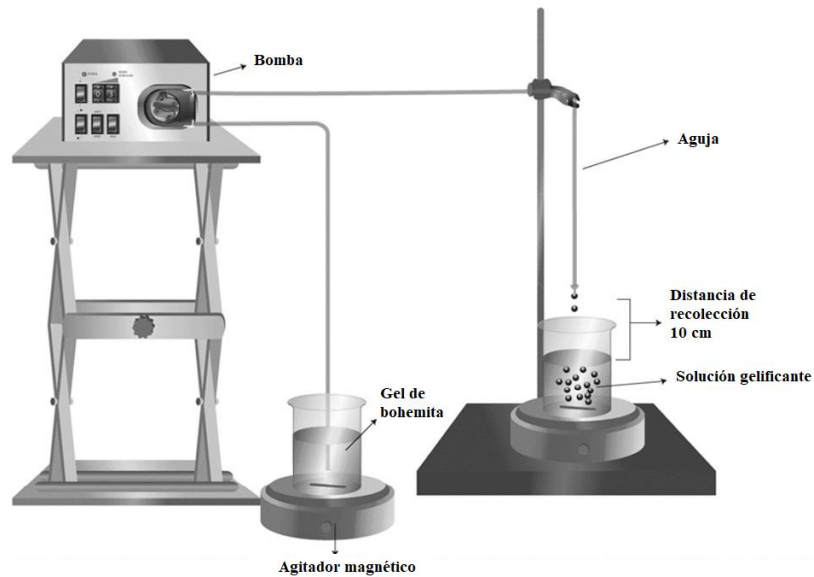


Figura 7. Aparato experimental para la producción de perlas de alginato de calcio, (Islam, *et al.*, Chan, 2013).

Otro de los equipos desarrollados para la producción de esferas de alginato de calcio es el mostrado en la Figura 8, donde: (1) recipiente enchaquetado con agua, (2) compresor de aire, (3) cámara de extrusión por goteo, (4) calentador, (5) columna de interfase, PC controlador de presión, TI indicador de temperatura, VC controlador de voltaje y A amperímetro.

En este dispositivo la solución de alginato de sodio se mantiene en el recipiente (1) a 60°C, a continuación, se extruye a través de una boquilla de 0.4 mm de diámetro y una velocidad de flujo de $6 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$ ($100 \text{ }\mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$).

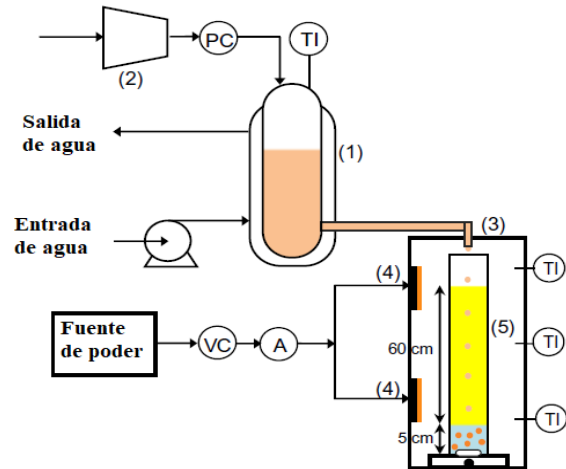


Figura 8. Esquema del dispositivo experimental propio para fabricar perlas de alginato, (Voo, *et al.*, 2016).

1.6 Síntesis de antecedentes.

La Tabla 1 muestra la síntesis de antecedentes que es el resultado de la revisión bibliográfica de los trabajos más importantes considerados para el desarrollo del proyecto.

Tabla 1. Síntesis de antecedentes.

Autor y año	Investigación	Método	Resultados y conclusiones
(Chan, <i>et al.</i> , 2009).	Desarrollar modelos de predicción para forma y tamaño de macroperlas de alginato de calcio.	A una temperatura controlada, se produjeron esferas con diferentes concentraciones de alginato variando el diámetro de la boquilla y distancia de recolección.	Se determinaron concentraciones mínima y máxima de alginato, así como una distancia mínima y máxima para obtener esferas de alginato de calcio.
(Lezehari, <i>et al.</i> , 2010)	Se encapsuló arcillas en alginato para eliminación de pentaclorofenol y safranina de soluciones acuosas.	Se prepararon cápsulas de alginato con arcillas de aluminio y arcillas surfactantes para obtener isotermas de adsorción de los contaminantes.	La introducción de arcillas a los biopolímeros dio como resultado la mejora en la capacidad de adsorción.
(Fu, <i>et al.</i> , 2011)	Relevancia de las propiedades reológicas del alginato de sodio en solución para las propiedades del gel de alginato de calcio.	Medición de la fuerza mecánica del gel de alginato de calcio preparado con diferentes porcentajes de monómeros G y M.	La fuerza mecánica del alginato de calcio está significativamente correlacionada con el porcentaje del monómero G en el alginato de sodio.
(He, <i>et al.</i> , 2015)	Encapsulación y caracterización de fertilizante microbiano de lenta liberación a partir de los compuestos de bentonita y alginato.	Se encapsuló <i>Rautella planticola</i> con bentonita y alginato de sodio.	El uso de bentonita disminuyó la cantidad requerida de alginato de sodio. La velocidad de liberación bacteriana dependió de la concentración de bentonita y alginato de sodio.
(Leong, <i>et al.</i> , 2016)	Avances en la fabricación de hidrogeles esféricos de alginato con diseños controlados de partículas mediante gelificación ionotrópica como sistemas de encapsulamiento.	Descripción de los procesos de dispersión y gelificación del alginato de calcio.	Los métodos descritos proporcionan las herramientas del proceso para que puedan integrarse o combinarse para desarrollar diseños de partículas nuevos o más complejos.

OBJETIVOS.

Objetivo general.

Desarrollar un equipo automatizado capaz de producir esferas de alginato de calcio con un tamaño uniforme y de encapsular arcillas para su posterior aplicación en la liberación controlada de agroquímicos y remediación ambiental.

Objetivos específicos.

1. Establecer las condiciones de diseño del equipo para esferificación de alginato de calcio a partir de las necesidades específicas del campo de investigación que lo requiere.
2. Conceptualizar los procedimientos y lógica de operación del equipo.
3. Generar el diagrama de flujo de proceso (DFP) y el diagrama de tubería e instrumentación (DTI), así como isométrico del equipo y sus servicios auxiliares.
4. Definir la instrumentación, automatización y programación del sistema lógico-electrónico del equipo (diagrama bifilar).
5. Desarrollar el prototipo y realizar pruebas de funcionamiento en fase sólido-líquido.
6. Estandarizar la operación del prototipo y elaborar un manual de operación.

METODOLOGÍA

La metodología para el desarrollo de este proyecto de tesis se llevó a cabo en tres etapas, Figura 9, estas etapas fueron realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias FIQ-8 (LOU) de la Facultad de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. En la primera etapa se diseñó un equipo automático para producir 20,000 esferas de alginato de calcio y un agente de liberación controlada con un diámetro de 4 mm (EEAC), mediante los siguientes 3 pasos 1) se establecieron las condiciones de diseño para obtener los requisitos del producto, las propiedades de la materia prima y las condiciones operacionales del EEAC, 2) se aplicó la ingeniería conceptual para definir los equipos requeridos en el proceso de esferificación y se definió la instrumentación necesaria para la automatización del proceso, y 3) se trazó un diagrama de flujo de proceso (DFP) y un diagrama de tubería e instrumentación (DTI) como representación de esta etapa de diseño. En la segunda etapa se desarrolló mecánica y eléctricamente el EEAC, respecto a la parte mecánica, se inició con la selección y dimensionamiento de los equipos del EEAC mediante la aplicación de heurísticas de agitación, transporte de fluidos, reacción de gelificación y separación sólido líquido, posteriormente, se seleccionó el material para construcción de los equipos realizando una evaluación de los materiales comúnmente utilizados para este fin. En la parte eléctrica, se calculó la energía eléctrica requerida por el EEAC, se seleccionó el diámetro del cable para suministro de la energía eléctrica y se fabricó el arnés eléctrico para el EEAC. En la tercera etapa se adquirieron los materiales necesarios para la construcción de los equipos, se fabricaron los recipientes requeridos para el almacenamiento de los reactivos y donde se llevó a cabo la reacción de gelificación, se inspeccionó visualmente cada uno de los equipos para detectar posibles defectos de fabricación o distorsión en las dimensiones, se probó hidrostáticamente a los recipientes para detectar posibles fugas y al final se probó el funcionamiento del equipo.

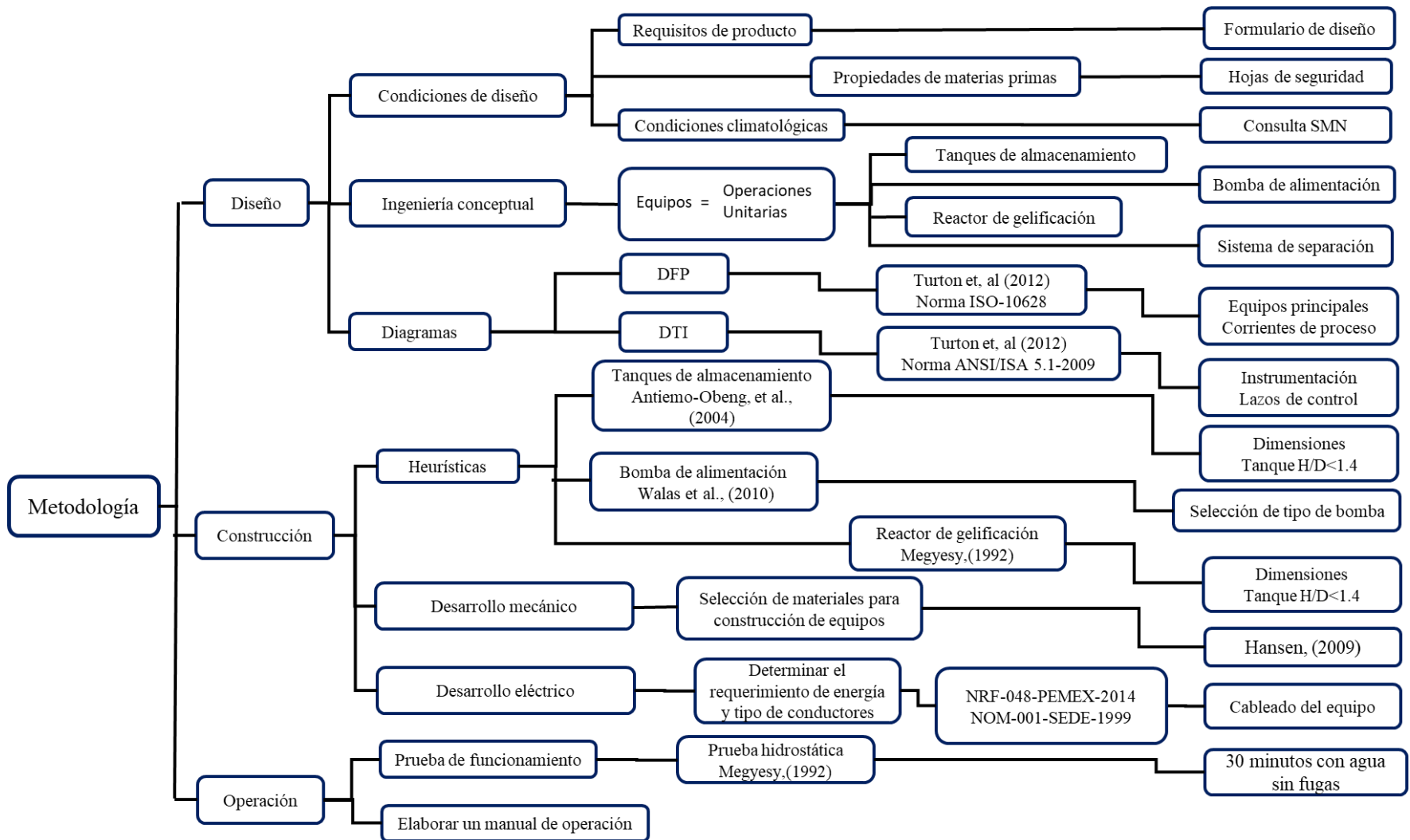


Figura 9. Ruta metodológica propuesta para el desarrollo del EEAC.

2.1 Establecer las condiciones de diseño.

Las condiciones de diseño del EEAC se establecieron a partir de la metodología propuesta por Towler y Sinnott, (2013), como se muestra en la Figura 10.

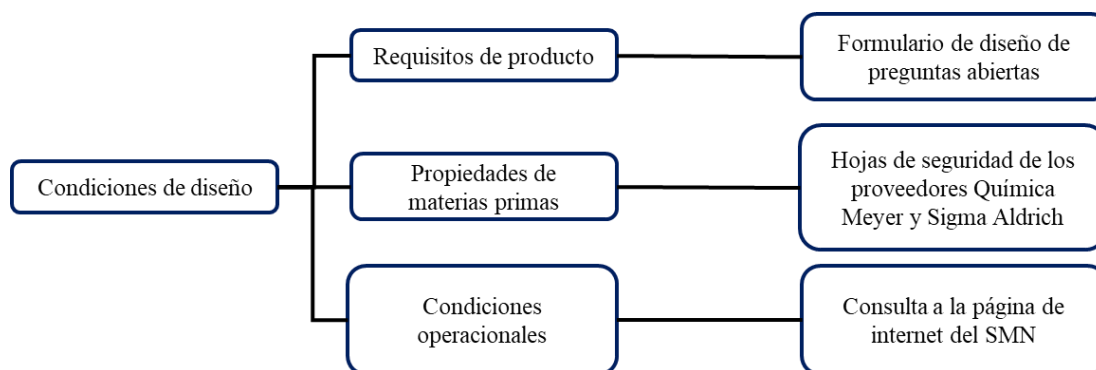


Figura 10. Metodología para establecer las condiciones de diseño.

El procedimiento se divide en 3 pasos, 1) determinar la cantidad de producción y características de las esferas de alginato de calcio, para ello, se utilizó un formulario de preguntas específicas destinadas a obtener esta información (Anexo 1), que fue aplicado a los integrantes del grupo de investigación Ingeniería de los Procesos Químicos y Remediación Ambiental. 2) recopilar, analizar y sintetizar los datos sobre las propiedades de la bentonita, alginato de sodio y cloruro de calcio presentados en las hojas de seguridad de los proveedores de Química Meyer y de Sigma Aldrich para obtener los valores de densidad, solubilidad en agua y pH necesarios para el diseño del EEAC. Por último, 3) establecer las condiciones operacionales del EEAC considerando que la producción de esferas de alginato de calcio se lleva a cabo en un entorno protegido a temperatura ambiente y a presión atmosférica, se consulta la página de internet del servicio meteorológico nacional (SMN) para obtener los valores máximo y mínimo de la temperatura ambiental y de la humedad relativa en el estado de Puebla.

2.2 Conceptualización de los procedimientos y equipos de proceso.

Siguiendo el procedimiento propuesto por Turton, *et al.*, (2012) para el diseño conceptual del EEAC (Figura 11), se define la operación individual para cada uno de los equipos ubicados a lo largo del proceso de producción de esferas de alginato de calcio, en cuatro diferentes áreas detalladas en la lista abajo descrita.

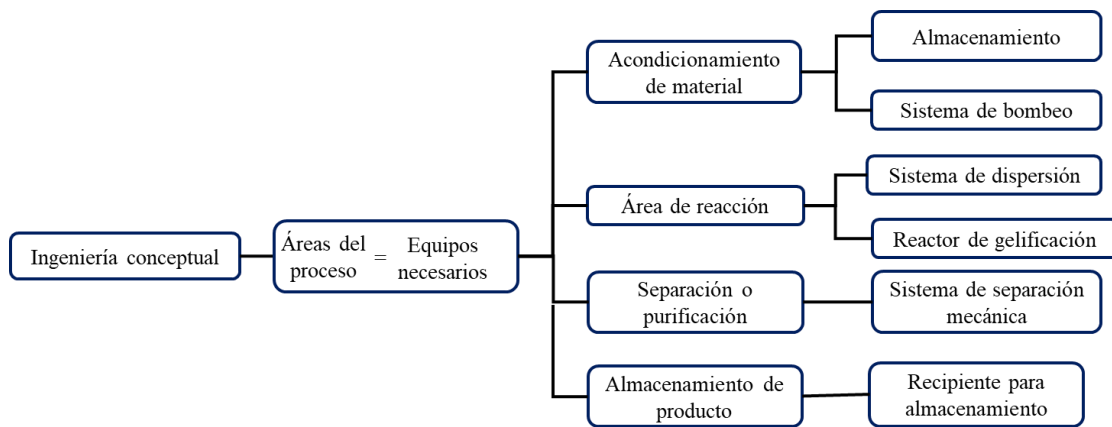


Figura 11. Desarrollo metodológico para la ingeniería conceptual.

1. Acondicionamiento de material. Esta área se divide en dos partes, la primera está compuesta por dos recipientes para almacenar las cantidades necesarias de bentonita y Alg-Na en suspensión y una solución de CaCl_2 para la operación del EEAC. En la segunda parte se encuentran las bombas que transportan a la solución de CaCl_2 al reactor de gelificación y a la bentonita y Alg-Na en suspensión al sistema de dispersión.
2. Área de reacción. Está compuesta por dos operaciones, en la primera se forman gotas de bentonita y Alg-Na en suspensión mediante un sistema de dispersión. En la segunda operación se lleva a cabo la reacción de gelificación por intercambio iónico en un reactor semicontinuo que contiene una solución de CaCl_2 y en el que se alimenta la bentonita y Alg-Na en suspensión por la parte superior del reactor.

3. Separación o purificación. En esta parte del proceso se efectúa la separación mecánica de las esferas de Alg-Ca formadas en fase sólida de la solución de CaCl₂ en fase líquida.
4. Almacenamiento de producto. En esta área se encuentra un recipiente para almacenar a las esferas de Alg-Ca producidas.

La Tabla 2 presenta la propuesta de asignación de un número para cada área de proceso con el fin de establecer una etiqueta de identificación para los equipos a lo largo del proceso de producción de esferas de Alg-Ca del EEAC.

Tabla 2. Asignación de áreas de proceso.

Número de área	Descripción
100	Almacén de bentonita, Alg-Na y CaCl ₂ (no está dentro del alcance de este proyecto).
200	Área de almacenamiento de bentonita y Alg-Na en suspensión y de la solución de CaCl ₂ .
300	Área de reacción de gelificación por intercambio iónico.
400	Área de separación mecánica de las esferas de Alg-Ca de la solución de CaCl ₂ .
500	Almacén de esferas de Alg-Ca.

La identificación de los equipos se estableció de la siguiente forma XX-YZZ, donde los códigos XX corresponden a las letras para identificar cada uno de los equipos considerando la primera letra de su nombre de acuerdo con la Tabla 3. El carácter Y corresponde al número de área definido en la Tabla 2, y los símbolos ZZ indican un número consecutivo para cada equipo de proceso.

Tabla 3. Códigos de identificación para los equipos.

Código de identificación	Equipo
BP	Bomba peristáltica.
RG	Reactor de gelificación.
TA	Tanque de almacenamiento.
SE	Sistema de extracción de esferas de alginato de calcio.

2.3 Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) y Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI).

El trazado del diagrama de flujo de proceso (DFP) se realizó considerando los criterios establecidos en Turton, *et al.*, (2012), Couper, *et al.*, (2010) y por la norma ISO 10628, “*Diagrams for the chemical and petrochemical industry*”. La Figura 12 muestra un esquema para la metodología de este apartado.

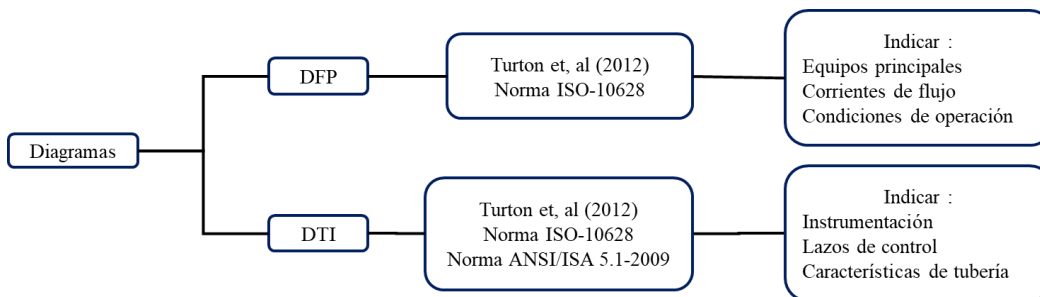


Figura 12. Metodología para el trazado del DFP y DTI.

Los cuatro pasos siguientes describen el procedimiento para el trazado del DFP, 1) se identificaron los siguientes equipos principales del EEAC: un tanque de almacenamiento de bentonita y Alg-Na en suspensión y uno para la solución de CaCl₂, dos bombas peristálticas impulsadas por motor eléctrico, un sistema de reacción compuesto por un equipo para dispersión de la suspensión bentonita-Alg-Na en agua, un recipiente en el que se lleva a cabo

la reacción de gelificación por intercambio iónico y un sistema de extracción de esferas de Alg-Ca operado por servomotores y una plataforma perforada, 2) los equipos principales se representan de manera que se refleje la escala entre ellos tanto en sus dimensiones como en elevación utilizando los gráficos mostrados en la norma ISO 10628, 3) las corrientes de flujo de proceso se clasifican en principales y secundarias, en el proceso de esferificación hay dos corrientes principales, la primera es la que transporta a la bentonita-Alg-Na en suspensión del tanque de almacenamiento TA-201 hacia el sistema de dispersión ubicado en el reactor de gelificación RG-301, la segunda es la que indica el transporte de las esferas de Alg-Ca del reactor hacia el área de almacenamiento de producto, estas corrientes se representan con una línea de 1 mm de grosor, las corrientes secundarias se representan con una línea con un grosor de 0.5 mm. En el proceso se identifican dos líneas secundarias, la primera de ellas es la de suministro de la solución de CaCl_2 del tanque de almacenamiento TA-202 al reactor de gelificación RG-301, la segunda es la corriente de drenado de la solución agotada de CaCl_2 del reactor RG-301. La dirección de cada corriente se indica con una flecha. 4) Las condiciones de operación detalladas de cada corriente de proceso se muestran en una tabla incluida en el DFP.

Los tres pasos siguientes describen el procedimiento para el trazado del diagrama de tubería e instrumentación (DTI), 1) se identifica el tipo de equipo, la función que desempeña, incluyendo los motores que conforman el EEAC, indicando su nombre y características, 2) sobre las líneas que representan a las corrientes de flujo se indica el diámetro nominal, la presión nominal, el material o el tipo de tubería. 3) se representan a los instrumentos de medición y control con su número de identificación considerando la norma ANSI/ISA 5.1-2009 “*Instrumentation Symbols and Identification*” así como también los lazos de control.

Los dibujos se realizaron con el software *sketchup Pro LayOut 2018*.

Se utilizó *sketchup Pro 2018* para la representación en 3D del EEAC.

2.4 Definir la instrumentación, automatización y programación del sistema lógico-electrónico del equipo (diagrama bifilar).

Para definir la instrumentación en un proceso Towler y Sinnott, (2013) plantean que primero se especifica el objetivo del control y las variables que serán medidas para cumplir con dicho objetivo, para el proceso de esferificación de Alg-Ca el objetivo del control es el funcionamiento automático del EEAC, por lo tanto, siguiendo con el procedimiento, 1) se toma como base el DFP del EEAC para determinar las variables que necesitan ser medidas y se localizó el equipo o corriente de proceso donde se colocaron los instrumentos de medición 2) se definieron los auxiliares a estos instrumentos para monitoreo de las variables transmisión o almacenaje de datos, 3) se definieron las variables que requieren ser controladas 4) se define la estrategia de control para el proceso de esferificación considerando que es un proceso por lotes.

Se propuso un algoritmo para el funcionamiento de los sistemas de control del EEAC.

El diagrama bifilar del sistema electrónico del EEAC se realizó con software KICAD.

La programación del sistema lógico-electrónico del equipo se realizó en lenguaje Arduino.

2.5 Procedimiento mecánico para desarrollar el prototipo.

La metodología para el desarrollo mecánico del EEAC se divide en tres etapas, ver Figura 13, en la primera parte se seleccionaron y dimensionaron los equipos que integran cada área de proceso del EEAC aplicando las heurísticas para el diseño de recipientes y transporte de fluido, en la segunda etapa se seleccionó el material de construcción para los equipos del EEAC aplicando la metodología propuesta por Hansen, (2009), en la tercera y última etapa, se seleccionó el procedimiento adecuado para el ensamble de los equipos del EEAC.

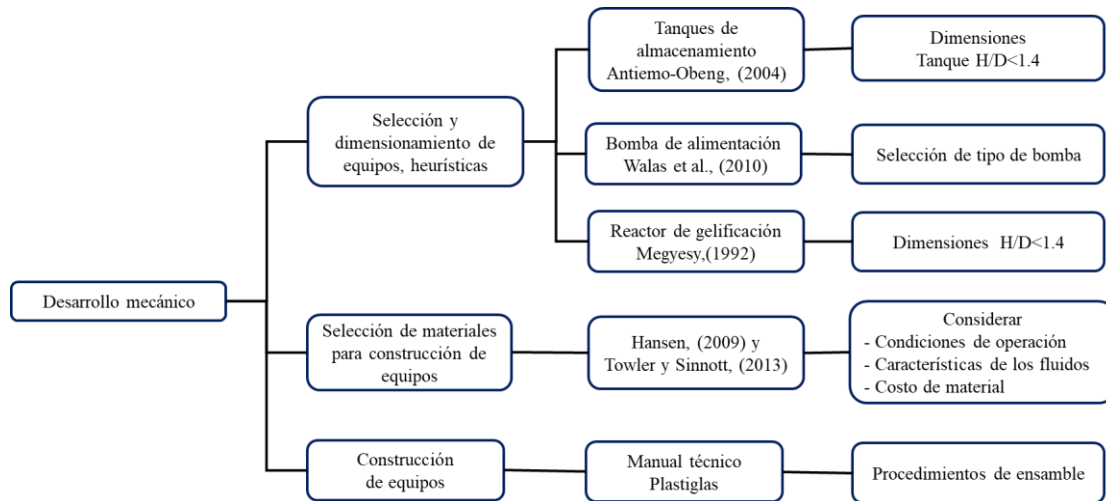


Figura 13. Metodología para el desarrollo mecánico

2.5.1 Selección y dimensionamiento de equipos usando heurísticas.

La selección de la geometría y dimensiones de los tanques de almacenamiento TA-201 y 202 para la bentonita y Alg-Na en suspensión y para la solución de CaCl_2 , respectivamente, se realizó siguiendo las recomendaciones hechas por Antiemo-Obeng, *et al.*, (2004), las dimensiones de los tanques están calculadas para que posteriormente se pueda instalar un sistema de agitación, por lo tanto, se consideran las siguientes relaciones para determinar las dimensiones de los recipientes.

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \quad (2)$$

$$\frac{H}{D} = 1 \quad (3)$$

$$\frac{L}{H} = 0.7 \quad (4)$$

Donde V es el volumen del líquido en cm^3 , D es el diámetro interior del tanque en cm, H es la altura del líquido en el tanque en cm y L es la longitud total del tanque.

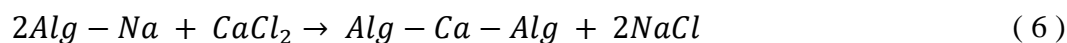
De acuerdo con Couper, *et al.*, (2010) y Perry y Green, (2008), para seleccionar una bomba, es necesario conocer temperatura y presión de operación, densidad y viscosidad del líquido a manejar, así como si hay presencia de sólidos en suspensión y el grado de corrosividad del líquido, la carga estática de succión y de descarga para poder elegir el tipo de bomba adecuada para el servicio requerido. El dato de la temperatura y presión de operación, el grado de corrosividad del líquido se obtienen de las condiciones de diseño previamente establecidas, la densidad y viscosidad de la bentonita y Alg-Na en suspensión se calcularon con un picnómetro de 25 mL de marca kimax y un viscosímetro de marca BROOKFIELD modelo DV1 respectivamente. La carga estática de succión y de descarga de la bomba se calcularon a partir de la Ecuación (5).

$$\Delta z \frac{g}{g_c} + \frac{\Delta v^2}{2 \cdot g_c} + \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{-P_T - \sum PF}{\dot{m}} \quad (5)$$

Donde z es la elevación respecto al centro de succión de la bomba en m, g es la constante de gravitación universal $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, v es la velocidad del líquido en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, P presión absoluta en Pa, ρ densidad del líquido en $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y g_c es la constante de conversión de unidades $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{N}^{-1}$.

El cálculo del requerimiento de las bombas de alimentación de bentonita y alginato de sodio en suspensión BP-201 y de la solución de cloruro de calcio BP-202 se realizó considerando las condiciones siguientes presión atmosférica 80,000 Kpa, temperatura ambiente 20°C. Las perdidas por fricción se evaluaron considerando el régimen de flujo y los accesorios utilizados en el recorrido de cada fluido. Los cálculos y resultados se encuentran en las hojas de especificación de cada bomba.

Para el diseño del reactor RG-301 se consideró que la reacción de gelificación por intercambio iónico indicada en la ecuación (6), se lleva a cabo cuando las gotas de solución de alginato de sodio entran en contacto con la superficie de una solución de cloruro de calcio.



La reacción es prácticamente instantánea y comienza en la interfase donde la gota toca la superficie de la solución de CaCl_2 . A medida que la gota de alginato de sodio continúa su caída para llegar al fondo, la reacción de reticulación continúa simultáneamente (Haldar y Chakraborty, 2018).

Para definir la geometría del reactor de gelificación RG-301 se evaluaron dos propuestas, la primera fue utilizar un recipiente de base rectangular con un arreglo de una plataforma perforada y manivela para la extracción de las esferas de Alg-Ca, las dimensiones del recipiente se determinaron siguiendo la metodología descrita por Megyesy, (1992) para tanques de base rectangular, las ecuaciones 5 a 7 muestran la relación entre las dimensiones del recipiente de fondo rectangular en función del volumen contenido.

$$a = \sqrt[3]{V} \quad (7)$$

$$h = 0.667 \cdot a \quad (8)$$

$$l = 1.5 \cdot a \quad (9)$$

Donde V es el volumen del líquido a almacenar en cm^3 , las dimensiones del recipiente están en centímetros a es el ancho, h es la altura y l es la longitud.

Las dimensiones del recipiente cilíndrico de la segunda propuesta se definieron tomando en cuenta que el reactor RG-301 opera en régimen semicontinuo en el que se deposita una solución de cloruro de calcio y se alimenta la bentonita-Alg-Na en suspensión por la parte superior del reactor por medio de un sistema de goteo, además, se consideró que en el reactor se instala un sistema para la extracción de las esferas de Alg-Ca. Tomando en cuenta lo descrito anteriormente, se define que el reactor de gelificación está compuesto por dos recipientes cilíndricos concéntricos, el envolvente exterior funciona como un contenedor para la solución de CaCl_2 , mientras que el recipiente interior tiene la función de recolectar las esferas de alginato de calcio producidas para su posterior separación de la solución de CaCl_2 agotada. Las dimensiones del recipiente exterior se calcularon de acuerdo con las ecuaciones 2 a 4.

Las dimensiones del recipiente interior se calcularon considerando que la separación entre los recipientes exterior e interior debe ser mínima y que la altura del recipiente interior debe de ser la misma del recipiente exterior. También se consideró que se instala un medio mecánico para la separación de las esferas de Alg-Ca dentro del recipiente interior.

2.5.2 Selección de materiales para construcción de los equipos del EEAC.

La selección del material para la construcción de los equipos se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por Hansen, (2009), en ella se indica que se deben de evaluar las siguientes categorías para seleccionar un material adecuado para construir los recipientes, considerando las condiciones de operación de temperatura y presión del EEAC, 1) la compatibilidad química entre el material para construcción con las sustancias que contienen los recipientes, 2) la maleabilidad, 3) la durabilidad, 4) la disponibilidad y 5) el costo del material. En este orden de ideas, se realizó una evaluación entre diferentes materiales para construcción disponibles mediante una tabla comparativa (Anexo 2).

Las propiedades de los materiales para construcción que se evaluaron se consultaron en (Perry y Green, 2008) para los metales y en (Baur, *et al.*, 2019) para los plásticos.

Respecto a la construcción de los recipientes, se cortaron los componentes tomando en cuenta que las piezas que se unen tengan la máxima área de contacto.

El corte y acondicionamiento de las partes de acrílico que forman el EEAC se realizaron en el LOU utilizando las siguientes herramientas: sierra caladora DREMEL motor saw, taladro black & decker de ½", mototool truper, cortador de acrílico OLFA, regla y compás.

Se seleccionó el método de pegado considerando las características de los recipientes y los materiales que están contenidos en ellos tomando en cuenta la disponibilidad del adhesivo, el tiempo de curado y el costo tanto del adhesivo como del procedimiento de pegado. De acuerdo con el manual técnico de pegado de Plastiglas de México, S.A. de C.V. los adhesivos comúnmente usados para pegar acrílico se pueden clasificar en tres grupos, Tabla 4. Existen

tres métodos de pegado de acrílico, por capilaridad, por inmersión o remojo y con adhesivos polimerizables.

Tabla 4. Tipos de adhesivos para unir acrílico.

Tipo	Ejemplo	Características
Solventes	Acetonas, Cloruro de metileno Cloroformo Tolueno	Baja viscosidad Pegan rápido Reblandecen el acrílico Evaporación rápida
Cementos solventes	Los mismos solventes más viruta de acrílico	Viscosidad deseada Pegan relativamente rápido Rellenan huecos
Adhesivos polimerizables	AD-CRYL III PG-PLUS	Más estables a la intemperie Unión muy resistente

La unión por capilaridad es el método más común y produce una unión fuerte y transparente. Esta técnica funciona debido a la capacidad del solvente de fluir por acción capilar a través del área a unir, para asegurar la efectividad de la técnica las piezas deben de asentarse adecuadamente, el adhesivo se aplica con cuidado a lo largo de la junta y por ambos lados usando una jeringa hipodérmica.

En la técnica por inmersión la lámina de acrílico debe ser reposada en el solvente de uno a cinco minutos, dependiendo de su espesor, para que el lado de la lámina se hinche, tan pronto esto ocurra se retira, se escurre para eliminar el exceso de solvente y se coloca sobre la otra pieza que se va a unir, se mantienen las partes unidas para permitir que el solvente actúe.

El adhesivo polimerizable se usa en juntas que no pueden ser pegadas por los métodos de capilaridad o inmersión, debido a que las partes no asientan correctamente, el área a pegar es difícil de alcanzar o cuando la pieza va a estar expuesta a la intemperie o requiere una máxima resistencia a esfuerzos.

Las partes de los tanques y reactor del EEAC se unieron mediante la técnica de pegado por capilaridad, para ello se usó un pegamento para acrílico.

Las juntas o empaques que se utilizaron en las uniones entre el tanque y las tapas de fondo se elaboraron a partir de silicón frío, Se colocó el suficiente silicón entre dos papeles comunes con la forma de las bridas de las tapas del fondo de los tanques, se usaron 5 espaciadores para obtener un espesor de 2 mm de la junta y se aplicó presión en la parte superior para que el silicón tomara la forma de la brida.

Se realizaron las siguientes pruebas a los recipientes del EEAC, inspección visual para descartar posibles defectos de fabricación y una prueba de hermeticidad con agua a presión atmosférica.

2.6 Procedimiento electrónico y eléctrico para el desarrollo del prototipo.

De acuerdo con la norma NRF-048-PEMEX-2014 “Diseño de instalaciones eléctricas”, el diseño de la distribución eléctrica consiste en la selección de las trayectorias y equipos necesarios que entregan la energía eléctrica requerida. Por lo tanto, para el EEAC se determinó la demanda de energía eléctrica y se seleccionó el calibre de los conductores. La Figura 14 muestra la ruta de esta metodología.

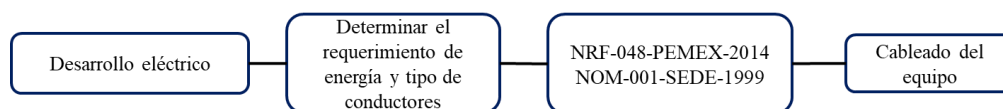


Figura 14. Metodología para el desarrollo eléctrico.

Se calculó la carga demandada siguiendo el procedimiento de la norma antes citada, por lo que se consideró, para los motores de las bombas peristálticas, el 100% de la potencia real demandada y los requerimientos de energía de los instrumentos para el control automático.

Para determinar el calibre de los cables del EEAC, a norma NOM-001-SEDE-1999 “Instalaciones eléctricas (utilización)”, sección 430-24 establece que los conductores que

suministren energía eléctrica a varios motores o a motores y otras cargas, deben de tener una capacidad de conducción de corriente cuando menos de la suma de las corrientes a plena carga nominales de todos los motores, más un 25% de la corriente nominal del motor mayor del grupo más la corriente nominal de las otras cargas.

Todos los cables en el EEAC se identificaron con una etiqueta, de acuerdo con la norma NOM-001-SEDE-1999. Por otra parte, en la excepción al apartado 501-4, se permite el cableado en circuitos no inflamables usando cualquiera de los métodos de instalación para áreas normales.

2.7 Estandarizar la operación y realizar un manual de operación del EEAC.

Se realizaron pruebas de funcionamiento para todo el proceso hasta alcanzar una operación estable, se determinó la velocidad apropiada para la alimentación del alginato de sodio y bentonita en suspensión mediante la variación del voltaje de alimentación al motor de la bomba BP-201 para modificar el flujo volumétrico de la bentonita y alginato de sodio en suspensión suministrado al reactor de gelificación RG-301. Se probó el funcionamiento del sistema de control propuesto.

Se redactaron las instrucciones necesarias para la operación del EEAC conteniendo las sugerencias para un funcionamiento adecuado de los componentes del EEAC.

RESULTADOS

3.1 Establecer las condiciones de diseño del EEAC.

En el anexo 1 se encuentra el formulario para recopilación de datos de diseño contestado por el área de investigación de Ingeniería de los Procesos Químicos y Remediación Ambiental, las especificaciones de las esferas de alginato de calcio y un agente de liberación controlada fueron definidas con base en estudios anteriores realizados por el grupo de investigación referentes a la liberación controlada de macronutrientes y herbicidas en cultivos, por lo tanto, se establece que se requiere un equipo automático para producir 20,000 esferas de alginato de calcio de 4 mm de diámetro, que contengan bentonita, partiendo de la preparación de una suspensión de 10 g de bentonita, 10 g de alginato de sodio en 1,000 mL de agua desionizada. El proceso de producción de esferas de Alg-Ca se lleva a cabo en un espacio confinado como lo es un laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla a temperatura ambiental y presión atmosférica.

La Tabla 5 muestra las propiedades físicas y químicas de interés de las materias primas utilizadas en el proceso de fabricación de esferas de alginato de calcio y bentonita, para el desarrollo del diseño del EEAC.

Tabla 5. Propiedades físicas y químicas de las materias primas.

Descripción	Alginato de sodio	Bentonita	Cloruro de calcio
Fórmula química	$(C_6H_8O_6)_n$	$SiO_2 - Al_2O_3$	$CaCl_2$
Peso molecular $g \cdot mol^{-1}$	32,000 – 400,000	180.1	110.98
Estado de agregación	Polvo blanco	Gránulos grises	Gránulos blancos
Solubilidad en agua	$10 g \cdot L^{-1}$	insoluble	$740 g \cdot L^{-1}$
pH	6-8 (1% en agua)	6 – 9	8 – 9 (acuoso)
Inflamabilidad	No inflamable	No inflamable	No inflamable
Riesgo a la salud (NFPA)	0	0	1
CAS No.	9005-38-3	1302-78-9	10043-52-4

3.2 Conceptualizar los procedimientos para el diseño del EEAC.

Partiendo de la división en áreas del proceso de esferificación de alginato de calcio, se propone la siguiente secuencia de operaciones para el desarrollo del diseño conceptual del EEAC.

Se pesan 10 g de bentonita y 10 g de Alg-Na para prepararlos en suspensión en 1,000 mL de agua desionizada, esta suspensión se almacena en el tanque TA-201, posteriormente se transporta por medio de una bomba de desplazamiento positivo de tipo peristáltica BP-201 en la que se controla el flujo para alimentar al sistema de dispersión por goteo.

Por otra parte, se pesan 20 g de $CaCl_2$ para preparar una solución en 2,000 mL de agua desionizada que se almacena en el tanque TA-202, mediante una bomba de desplazamiento positivo del tipo peristáltica BP-202, se transportan lotes de 500 mL de la solución de $CaCl_2$ al reactor RG-301.

El área de reacción está integrada por los siguientes componentes:

- 1 Un sistema de goteo compuesto por una boquilla de 2 mm de diámetro para llevar a cabo la dispersión de la suspensión de alginato de sodio y bentonita.
- 2 Un reactor a régimen semicontinuo constituido por un recipiente externo con capacidad para almacenar 500 mL de una solución de CaCl_2 . El reactor se complementa con un recipiente concéntrico en el que se encuentra un arreglo mecánico integrado por placa perforada inclinada y una palanca, este arreglo permite la separación de las esferas de Alg-Ca.

El área de separación se complementa con un arreglo de palanca accionado por un servomotor MG-995 de $15 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^2$ que eleva al recipiente interior para recuperar las esferas de Alg-Ca.

El área de almacenamiento de producto está compuesta por un recipiente cilíndrico en el que se almacenan las esferas de Alg-Ca producidas para su uso posterior.

3.3 Diagrama de flujo de proceso (DFP) y diagrama de tubería e instrumentación (DTI).

En la página siguiente se encuentra el diagrama de flujo de proceso (DFP) propuesto de acuerdo con la descripción realizada en la ingeniería conceptual del proceso de esferificación de alginato de calcio y un agente de liberación controlada.



Diagrama de Flujo de Proceso



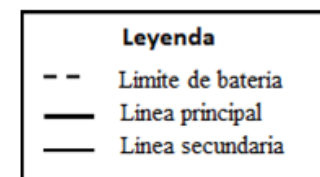
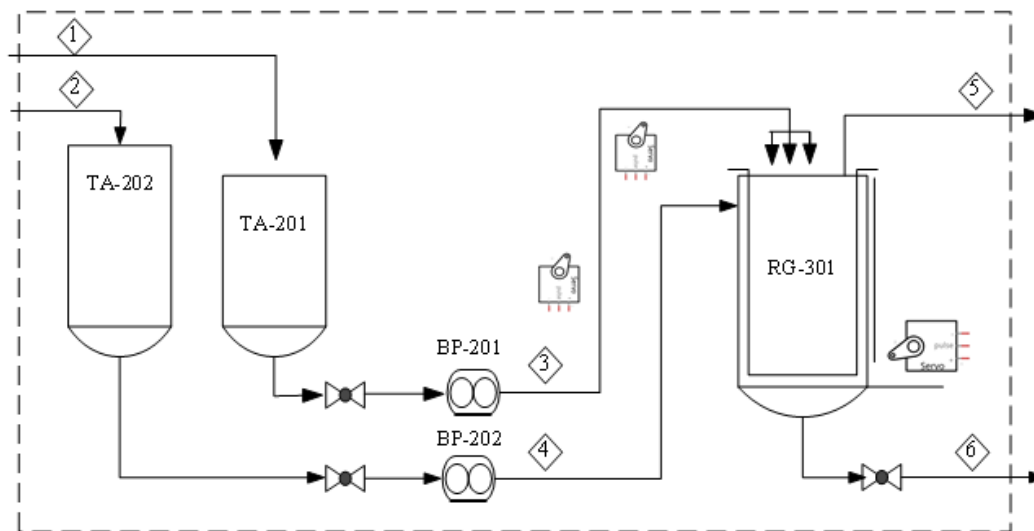
TA-201
Tanque de almacenamiento
Alginato en suspensión
D=101.6 mm
L= 200 mm

TA-202
Tanque de almacenamiento
Solución CaCl₂
D=127 mm
L=250 mm

BP-201
Bomba Peristáltica
alginato en suspensión

BP-202
Bomba peristáltica
Solución CaCl₂

RG-301
Reactor de Gelificación
D=101.6 mm
L=150 mm



Corrientes	1	2	3	4	5	6
Presión kPa	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3
Temperatura °C	25	25	25	25	25	25
Flujo másico gr/lote	1,000	2,000	1,000	2,000		
Fracción másica						
Agua	0.9804	0.9900	0.9804	0.9900		
Bentonita	0.0098	0.0000	0.0098	0.0000		
Alginato	0.0098	0.0000	0.0098	0.0000		
Cloruro de calcio	0.0000	0.0100	0.0000	0.0100		

Diagrama de Flujo de Proceso	
Proyecto: Equipo automático para esferificación de alginato de calcio y un agente de liberación controlada	
Dibujó: MTVL Fecha: Dic. 02,2019	
Rev.	Notas
0	Propuesta

De acuerdo con el DFP desarrollado y con las dimensiones calculadas para los recipientes en el proceso, se propone la distribución de los equipos mostrado en la Figura 15.

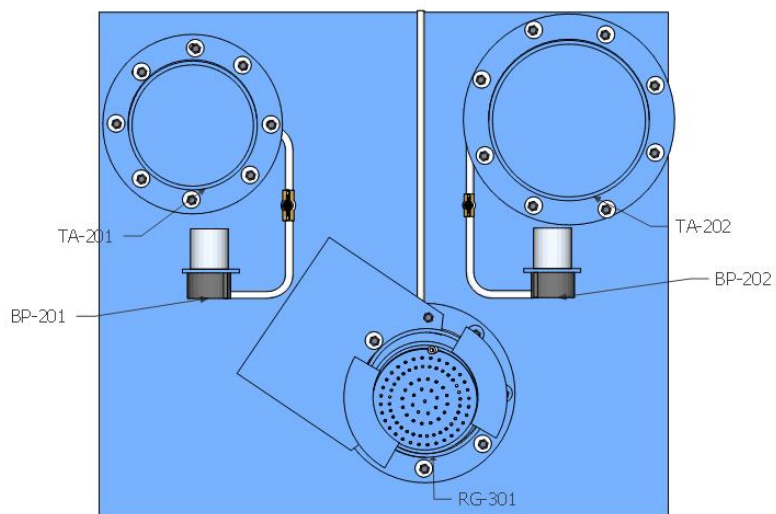
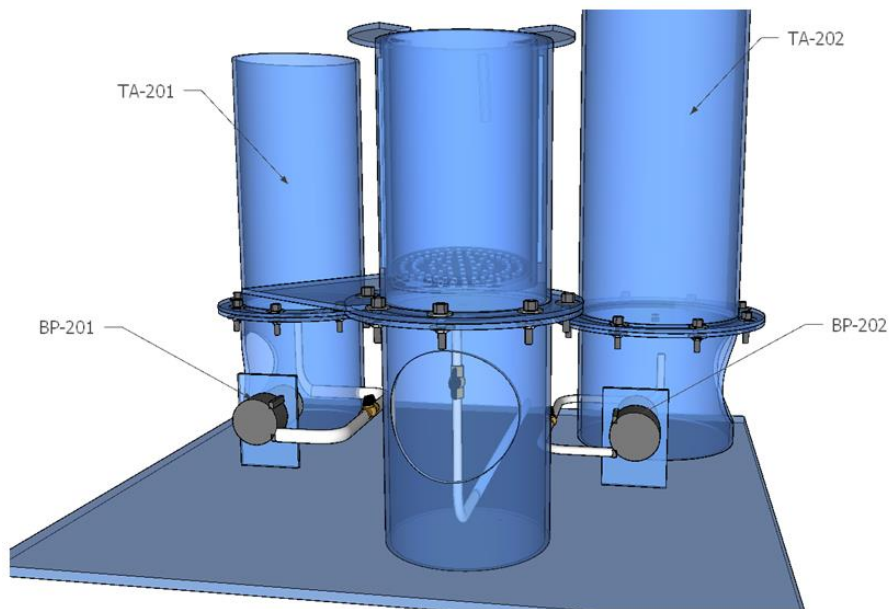


Figura 15. Vista en perspectiva y superior del arreglo propuesto para el EEAC.

3.4 Definir la instrumentación necesaria para la operación automática del equipo.

Para la programación del sistema lógico-electrónico del EEAC se definieron cinco estados posibles en los que se puede encontrar el equipo a lo largo del proceso, a continuación, se describen los estados propuestos.

APAGADO. En este estado, el EEAC está en espera de inicio de operación, los servomotores y los motores de las bombas de alimentación de la solución de CaCl_2 y de Alg-Na se encuentran apagados. Para pasar al siguiente estado se debe de presionar el botón que inicia el funcionamiento de la bomba peristáltica BP-202 para alimentar la solución de CaCl_2 .

ALIMENTACIÓN DE SOLUCIÓN DE CaCl_2 . En esta parte de la operación se acciona el motor de la bomba peristáltica BP-202 para alimentar 500 mL de la solución de CaCl_2 del tanque de almacenamiento TA-202 hacia el reactor de gelificación por intercambio iónico RG-301. La bomba de alimentación de alginato BP-201 y los servomotores que componen el sistema de extracción de las esferas de alginato de calcio se encuentran apagados. Después de bombear la cantidad especificada de la solución de CaCl_2 se apaga la bomba BP-202 y el EEAC pasa a un estado de espera I.

ESPERA I, En este estado de transición los motores de las bombas BP-201 y BP-202 se encuentran apagados, los servomotores se encuentran en posición de producción. Para pasar al siguiente estado se presiona el botón de alimentación de Alg-Na.

ALIMENTACION DE ALGINATO. En este estado, se acciona el motor de la bomba BP-201 para suministrar 25 mL de la suspensión de alginato y bentonita del tanque de almacenamiento TA-201 al goteador situado en la parte superior del reactor RG-301, con un flujo de $0.5 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$. Los servomotores que accionan el sistema de extracción de las esferas de alginato de calcio se encuentran apagados. Cuando se ha completado la cantidad de bentonita y alginato de sodio en suspensión, la bomba BP-201 se apaga y el equipo pasa al estado de espera II.

ESPERA II. Los motores de las bombas BP-201 y BP-202 se encuentran apagados y los servomotores se encuentran en posición de producción. Para pasar al siguiente estado de extracción de esferas de alginato de calcio se presiona el botón de extracción.

EXTRACCIÓN DE ESFERAS DE ALG-Ca. Se comienza con el proceso de extracción de las esferas de Alg-Ca producidas, para ello, se acciona el servomotor que controla al gotero para elevarlo 30° respecto al eje horizontal. En seguida, el servomotor que controla la base del gotero se mueve de una posición de 100° a una nueva posición de 150°, por último, el servomotor que controla la palanca que realiza la elevación del recipiente que contiene las esferas de Alg-Ca se mueve de una posición de 0° a una nueva posición de 30°.

RETORNO. En este estado los servomotores que integran el sistema de extracción de esferas de Alg-Ca regresan a su posición original en el siguiente orden, primero el servomotor que eleva el recipiente se mueve de una posición de 30° a su posición de 0°, a continuación, el servomotor que mueve la base del gotero regresa de su última posición 150° a su posición original a 100°, por último, el servomotor que eleva el gotero, regresa a su posición original de 30° a 0°. Durante este ciclo los motores de las bombas BP-201 y BP-202 permanecen apagados. Al final del ciclo, cuando los servomotores han regresado a su posición inicial, se tienen dos alternativas posibles descritas a continuación:

- a). Presionar el botón de Alginato si es que no se ha cumplido el total de alimentación de Alg-Na para regresar al estado de ALIMENTACIÓN DE ALGINATO.
- b). Si se han completado 10 ciclos de alimentación de alginato, significa que la solución de CaCl_2 se ha agotado, por lo tanto, es necesario desecharla abriendo la válvula VF-301. A continuación, se presiona el botón de inicio para pasar al estado de ALIMENTACIÓN DE CaCl_2 y continuar con el proceso de producción.

El diagrama de flujo para el control del equipo se muestra en la Figura 16, los cuadros indican cada uno de los estados en los que se encuentra el EEAC durante su operación y el texto en cada uno de los conectores indica la acción que realiza el operador o que se efectúa de manera automática para pasar de un estado de operación a otro.

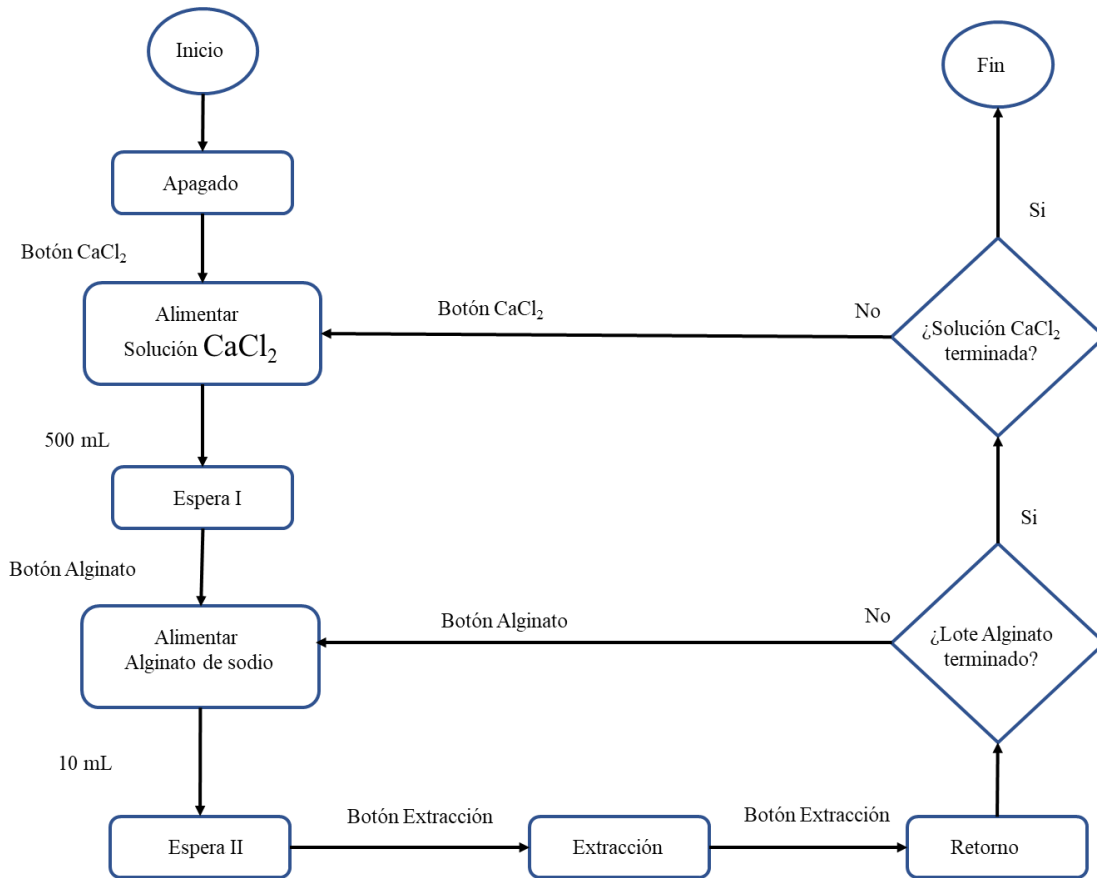


Figura 16. Diagrama de flujo de estados de operación del EEAC.

Los instrumentos requeridos para que el EEAC opere de manera automática, de acuerdo con la descripción anterior, se muestra en la Tabla 6. Se propone el uso de una placa de ARDUINO UNO para el sistema de control del equipo.

Tabla 6. Lista de instrumentos del EEAC.

Identificación	Nombre	Función
SM-301	Servomotor para el gotero	Elevar el gotero para permitir la extracción del contenedor de esferas de Alg-Ca
SM-302	Servomotor para la base	Mover la base para permitir la extracción del contenedor de esferas de Alg-Ca
SM-303	Servomotor para la palanca	Mover la palanca para elevar el contenedor de esferas de Alg-Ca
THM-301	Sensor de temperatura y humedad modelo DHT-11	Medir la temperatura y la humedad ambiental durante el proceso de producción de esferas de Alg-Ca

Las válvulas necesarias para la operación del EEAC se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Válvulas de control de flujo del EEAC.

Identificación	Nombre	Función
VF-301	Válvula manual de control de flujo de la solución de cloruro de calcio agotada	Permite o bloquea el flujo de la solución de cloruro de calcio agotada del reactor RG-301 hacia el desagüe
VF-201	Válvula manual de control de flujo de alginato de sodio	Permitir o bloquear el flujo de la bentonita y alginato de sodio en suspensión del tanque de almacenamiento TA-201 hacia el reactor RG-301
VF-202	Válvula manual de control de flujo de cloruro de calcio	Permitir o bloquear el paso de la solución de cloruro de calcio del tanque de almacenamiento TA-202 al reactor RG-301

En las páginas siguientes se muestra el diagrama de tubería e instrumentación y el diagrama bifilar desarrollados para el equipo automático de esferificación de alginato de calcio y un agente de liberación controlada.



Diagrama de Tubería e Instrumentación



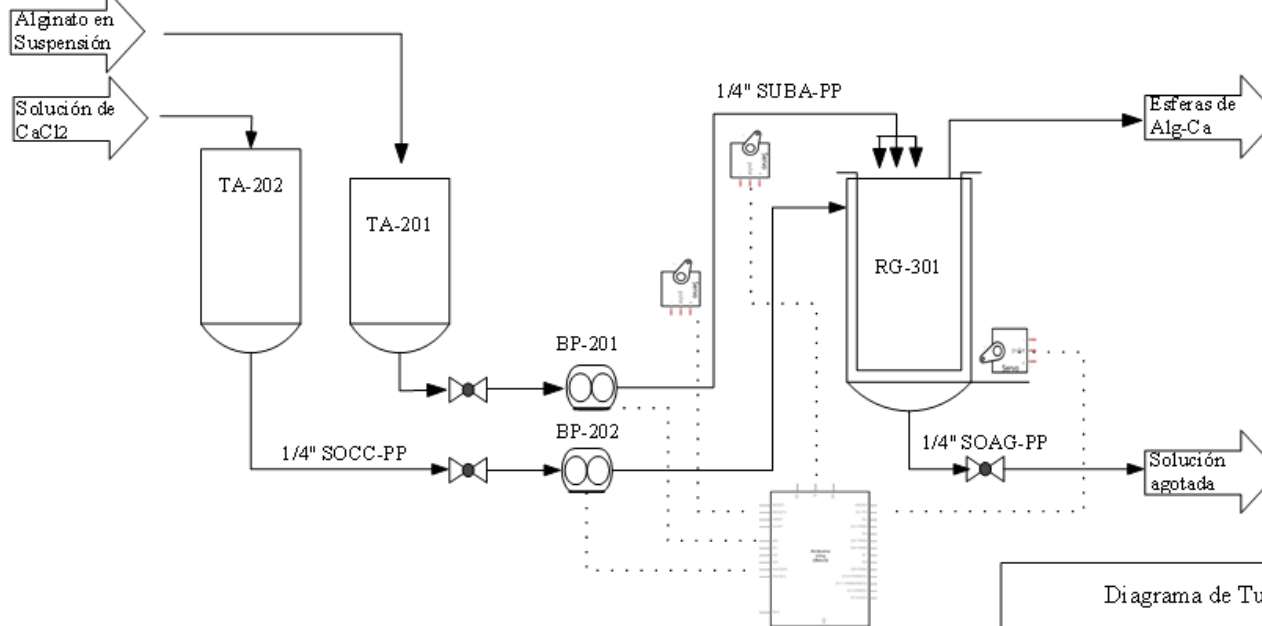
TA-201
Tanque de almacenamiento
Alginato en suspensión
D=101.6 mm
L= 200 mm

TA-202
Tanque de almacenamiento
Solución CaCl₂
D=127 mm
L=250 mm

BP-201
Bomba Peristáltica
alginato en suspensión

BP-202
Bomba peristáltica
Solución CaCl₂

RG-301
Reactor de Gelificación
D=101.6 mm
L=150 mm



Simbología

	Arduino UNO
	Servomotor
	Válvula de bola

Leyenda de tuberías

1/4"SUBA-PP Manguera de polipropileno de 1/4" Alginato y bentonita en suspensión
1/4"SOCC-PP Manguera de polipropileno de 1/4" Solución de cloruro de calcio
1/4" SACC-PP Manguera de polipropileno de 1/4" Solución agotada de cloruro de calcio

Diagrama de Tubería e instrumentación

Proyecto:
Equipo automático para esferificación de alginato de calcio y un agente de liberación controlada

Dibujó: MTFVL	Fecha: Dic. 02,2019
Rev.	Notas
0	Propuesta



Diagrama bifilar

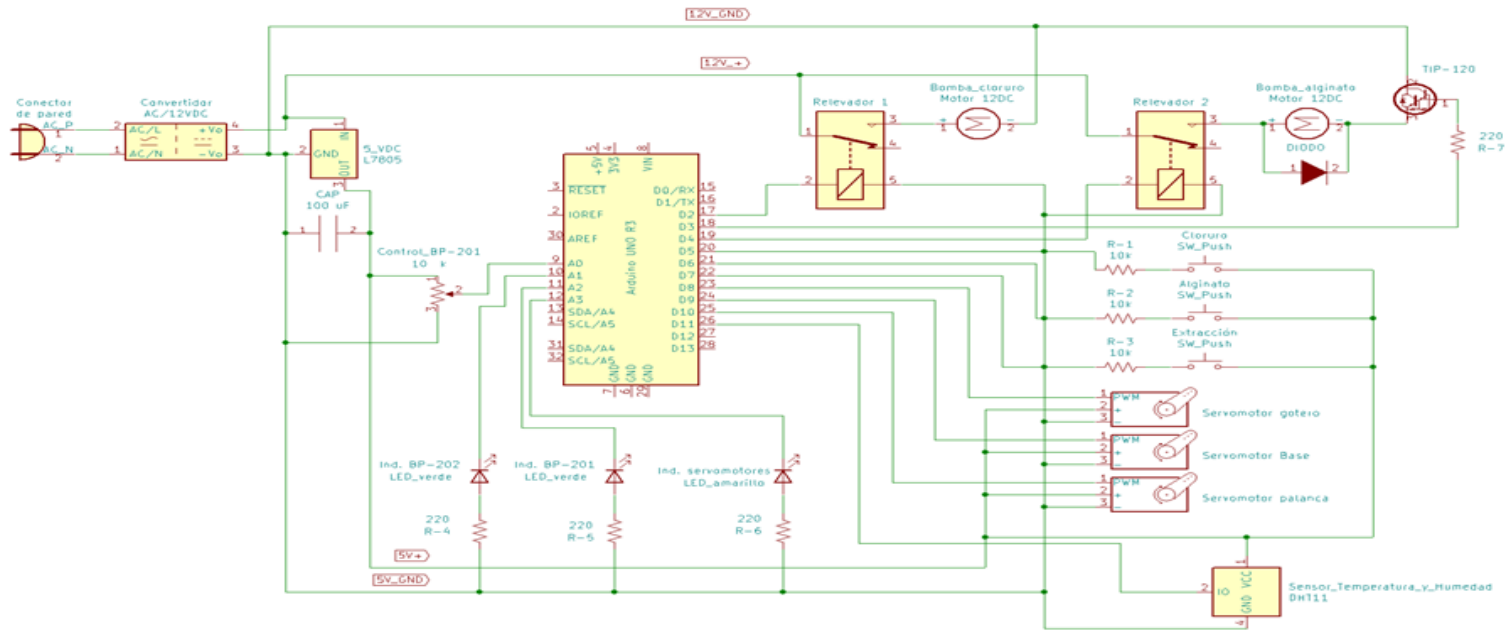


Diagrama bifilar

Proyecto:

Equipo automático para esferificación de alginato de calcio y un agente de liberación controlada

Dibujó: MTVL

Fecha: Dic. 02,2019

Rev. Notas

0 Propuesta

La alimentación eléctrica del equipo automático de esferificación de alginato de calcio se realiza a partir de un tomacorriente de 110 V CA, en el que se conecta un adaptador para obtener una corriente de 12 V CD a 2 Amperes para alimentar a los dos motores de las bombas peristálticas BP-201 y BP-202. Se utilizó un regulador de voltaje positivo LM7805 para obtener una corriente de 5 V CD para suministrar energía a los servomotores, los botones pulsadores, leds, sensor de temperatura y humedad y el potenciómetro para control de la velocidad del motor de la bomba peristáltica BP-201.

La caja de conexiones eléctricas y de control está dividida en dos partes, la parte inferior se muestra en la Figura 17, en ella se encuentra la alimentación a 12 VCD, el regulador de corriente LM7805 montado en un disipador de calor y con conexiones hembra para 5 V + y 5 V GND, también se encuentra un módulo de 2 relevadores de 5V optoacoplados para controlar el encendido y apagado de los motores de las bombas,

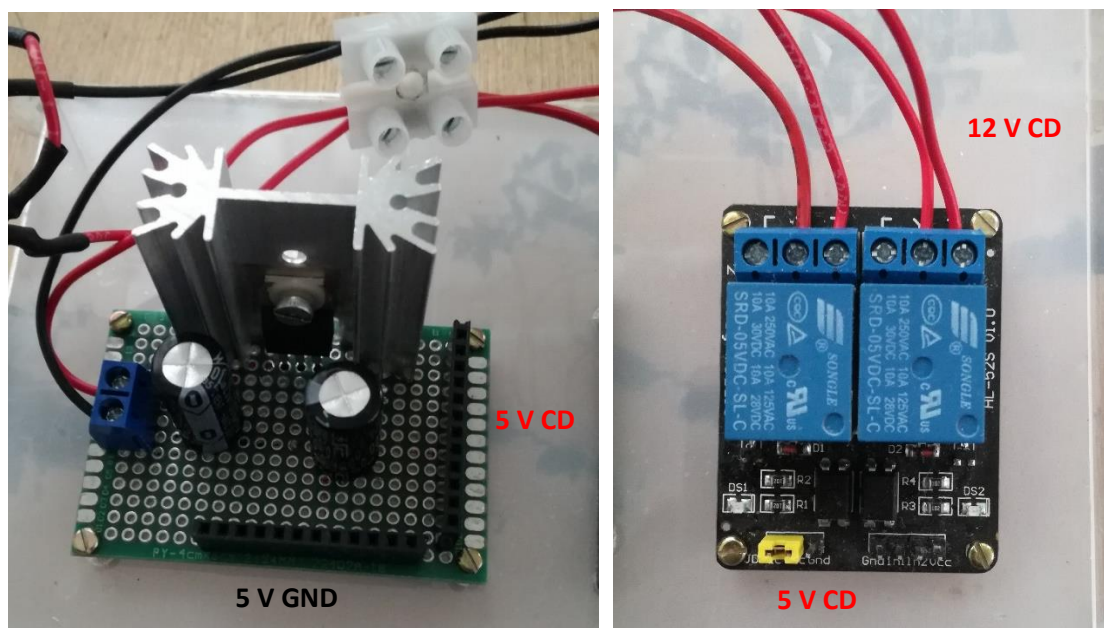


Figura 17. Regulador de voltaje LM7805 de 12 V CD a 5 V CD (lado izquierdo) y módulo de dos relevadores optoacoplados a 5 V CD (lado derecho).

La Figura 18 muestra los componentes que se encuentran en el compartimiento superior de la caja de conexiones y el panel de control, en esta parte se colocó la tarjeta de Arduino UNO R3 y el circuito integrado TIP 120 para el control del flujo de la corriente para la bomba BP-201 que alimenta el alginato y bentonita en suspensión. Finalmente, en la tapa superior de la caja de control se encuentran los pulsadores para el control de arranque de las bombas BP-202, BP-201 y el accionamiento de los servomotores para la extracción de las esferas de alginato de calcio, también se encuentran unos leds que indican el funcionamiento de cada uno de los equipos, a la derecha se observa un potenciómetro de 10 k Ω para regular la velocidad de alimentación de alginato, como se puede observar en la Figura 19.

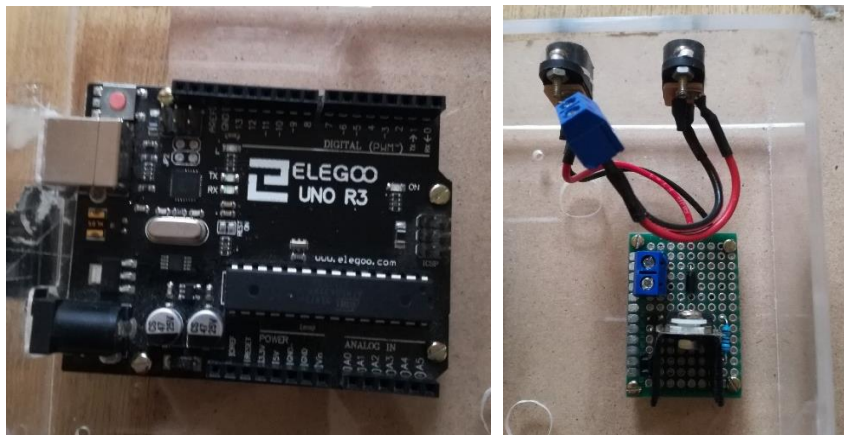


Figura 18. Placa Arduino UNO R3 y circuito integrado TIP120.

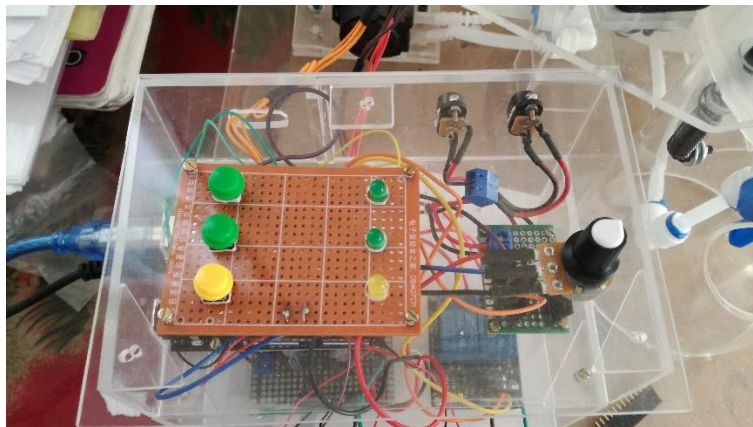


Figura 19. Botonera y potenciómetro del panel de control del EEAC.

Las Figuras 20 y 21 muestran los arreglos propuestos de los compartimientos inferior y superior de la caja de conexiones y panel de control del EEAC arriba descritos.

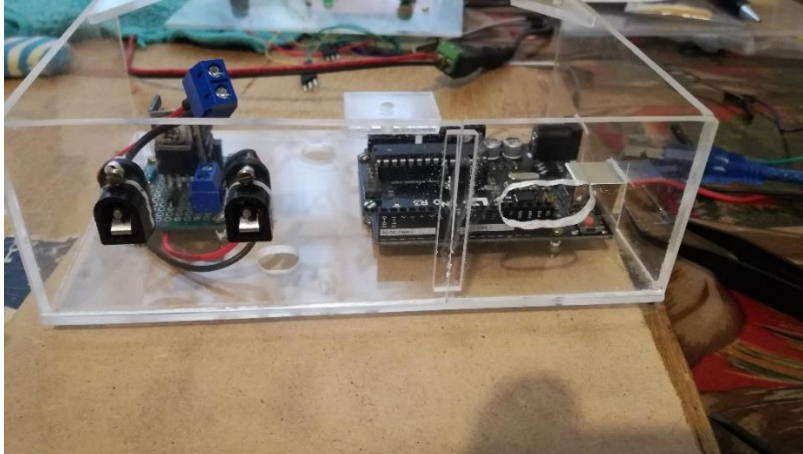


Figura 20. Compartimiento superior de la caja de conexiones y panel de control.

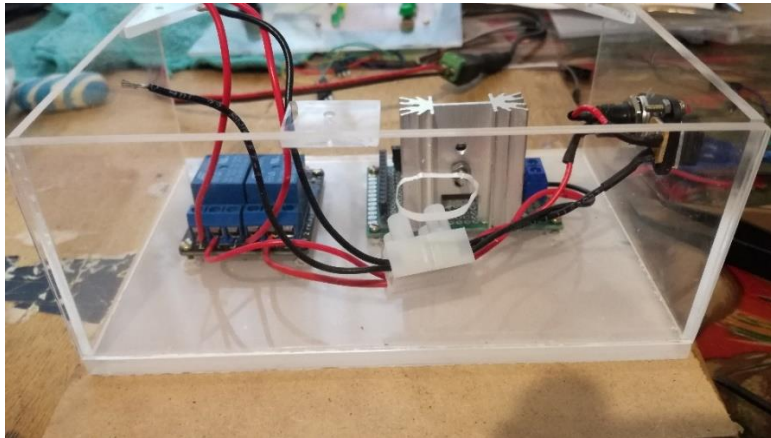


Figura 21. Compartimiento inferior de la caja de conexiones y panel de control.

El sensor de temperatura y humedad DTH11 es un componente que se conecta a un microcontrolador como Arduino UNO y que, de acuerdo con su hoja de datos, tiene un rango de medición de temperatura 0 a 50°C, con una precisión $\pm 2^\circ\text{C}$, mientras que para la humedad su rango de medición es de 20 a 90% con una precisión de $\pm 5\%$. Este componente se instaló en el EEAC para registro de estos datos durante la operación del equipo, como se muestra en la Figura 22.

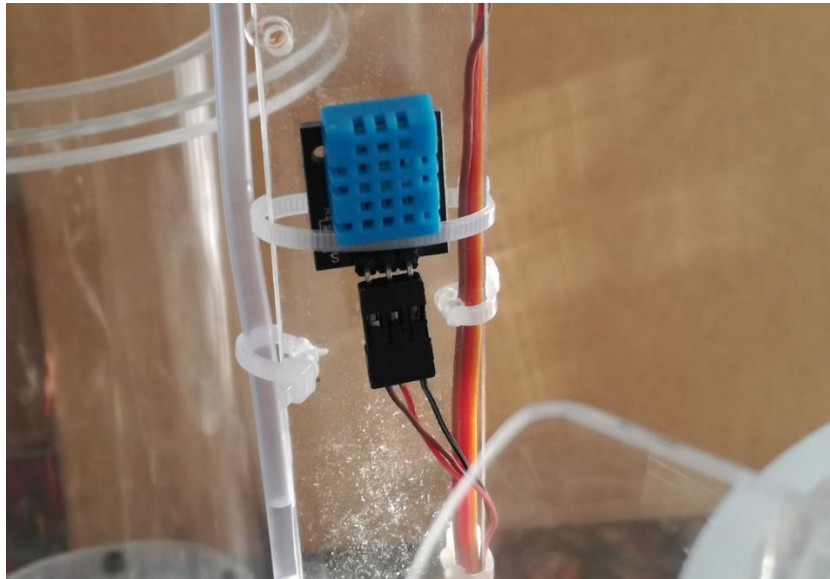


Figura 22. Sensor de temperatura y humedad DHT11.

Se desarrolló la programación de la tarjeta de Arduino UNO considerando que se muestren los datos de temperatura en °C, el porcentaje de humedad, los ciclos de alimentación de la solución de CaCl_2 , los ciclos de alimentación de alginato de sodio y el valor establecido del potenciómetro en el monitor serial de una computadora. En el anexo 3 se encuentra el código en el lenguaje Arduino para el control del EEAC.

3.5 Desarrollo mecánico del EEAC.

3.5.1 Dimensionamiento de los tanques de almacenamiento TA-201 y TA-202.

La Figura 23 muestra la hoja de especificación para el tanque TA-201 desarrollada a partir de las heurísticas descritas en la metodología, este tanque tiene la función de almacenar 1,000 mL de alginato de sodio y bentonita en suspensión a presión atmosférica y temperatura ambiente.


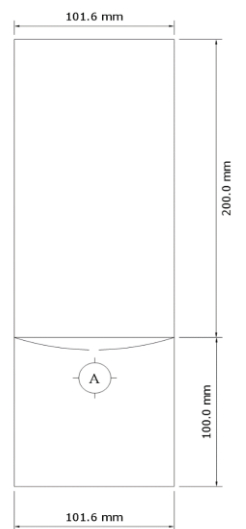
	Proyecto Equipo de esferificación de alginato de calcio y un agente de liberación controlada					
	Hoja de especificación		Tanque de almacenamiento	Tag No. TA-201		
	Servicio		Almacenamiento de bentonita y alginato de sodio en suspensión	Cantidad 1 pza		
DATOS DE PROCESO			DIMENSIONES			
	Mínima	Máxima	Capacidad de diseño	1,478 cm^3		
Temperatura de operación °C	18	25	Capacidad de operación	1000 cm^3		
Presión de operación Kpa	101.3	101.3	Posición	Vertical		
Sólidos en suspensión	Si		Tipo	cilíndrico		
Sustancias corrosivas	No		Díámetro exterior	101.6 mm		
Densidad $gr \cdot cm^{-3}$	1.036		Altura	200 mm		
viscosidad cp	430		espesor	3 mm		
CONSTRUCCIÓN			ACCESORIOS			
Fondo	Cónico		Refrigeración	No		
Tapa superior	plana		Válvula de seguridad	No		
Aislamiento	No		Venteo	No		
Pintura	No		Deflectores	No		
Material de construcción	Acrílico		Soporte	Faldón		
Heurísticas	Dimensiones mm		Lista de boquillas			
$\frac{H}{D} = 1$	Díámetro D	108	Boquilla	Díámetro	Tipo	Servicio
	Altura del líquido H	108	A	6.3 mm	NPT	Salida de suspensión
$L = \frac{H}{0.7}$	Altura del recipiente L	154.3				
Notas						
Para la construcción del cuerpo del tanque se utilizó tubo de acrílico con un diámetro exterior nominal de 101.6 mm y un espesor de pared de 3 mm						
Fecha	Revisión	Por	Observaciones			
02-dic	MTVL	MTVL	Propuesta de diseño			

Figura 23. Hoja de especificación para el tanque de almacenamiento TA-201.

En la Figura 24 se muestra el tanque TA-201 fabricado a partir de un tubo de acrílico de 4” de diámetro externo y 3 mm de espesor. El faldón también se fabricó a partir de un tubo del mismo diámetro.



Figura 24. Tanque de almacenamiento TA-201 fabricado en acrílico.

La Figura 25 muestra la hoja de especificación para el tanque TA-202 para almacenar 2,000 mL de solución de cloruro de calcio a presión atmosférica y temperatura ambiente.


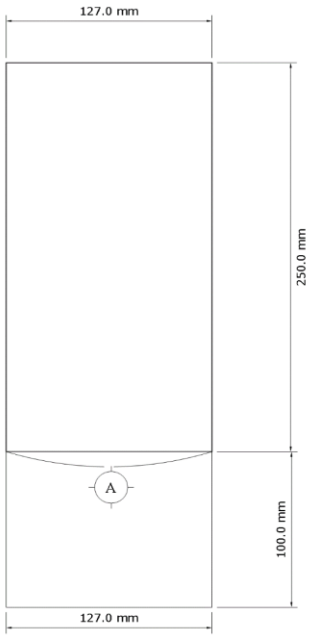
	Proyecto Equipo de esferificación de alginato de calcio y un agente de liberación controlada					
	Hoja de especificación	Tanque de almacenamiento	Tag No. TA-202			
	Servicio	Almacenamiento de solución de cloruro de calcio	Cantidad 1 pza			
DATOS DE PROCESO			DIMENSIONES			
	Mínima	Máxima	Capacidad de diseño	2,874	cm ³	
Temperatura de operación °C	18	25	Capacidad de operación	2,000	cm ³	
Presión de operación Kpa	101.3	101.3	Posición	Vertical		
Sólidos en suspensión	No		Tipo	cilíndrico		
Sustancias corrosivas	No		Diámetro exterior	127 mm		
Densidad gr · cm ⁻³	0.954		Altura	250 mm		
viscosidad cp	1.054		espesor	3 mm		
CONSTRUCCIÓN			ACCESORIOS			
Fondo	Cónico		Refrigeración	No		
Tapa superior	plana		Válvula de seguridad	No		
Aislamiento	No		Venteo	No		
Pintura	No		Deflectores	No		
Material de construcción	Acrílico		Soporte	Faldon		
Heurísticas	Dimensiones mm		Lista de boquillas			
$\frac{H}{D} = 1$	Diámetro D	136.5	Boquilla	Diámetro	Tipo	Servicio
	Altura del líquido H	136.5	A	6.3 mm	NPT	Salida de suspensión
$L = \frac{H}{0.7}$	Altura del recipiente L	195				
Notas						
Para la construcción del cuerpo del tanque se utilizó tubo de acrílico con un diámetro exterior nominal de 127 mm y un espesor de pared de 3 mm						
Fecha	Revisión	Por	Observaciones			
01-ago	MTVL	MTVL	Propuesta de diseño			

Figura 25. Hoja de especificación para el tanque de almacenamiento TA-202.

La Figura 26 muestra al tanque TA-202 fabricado a partir de tubo de acrílico de 5" de diámetro externo con un espesor de pared de 3 mm. También se muestra el faldón fabricado a partir de un tubo de 5" de diámetro.

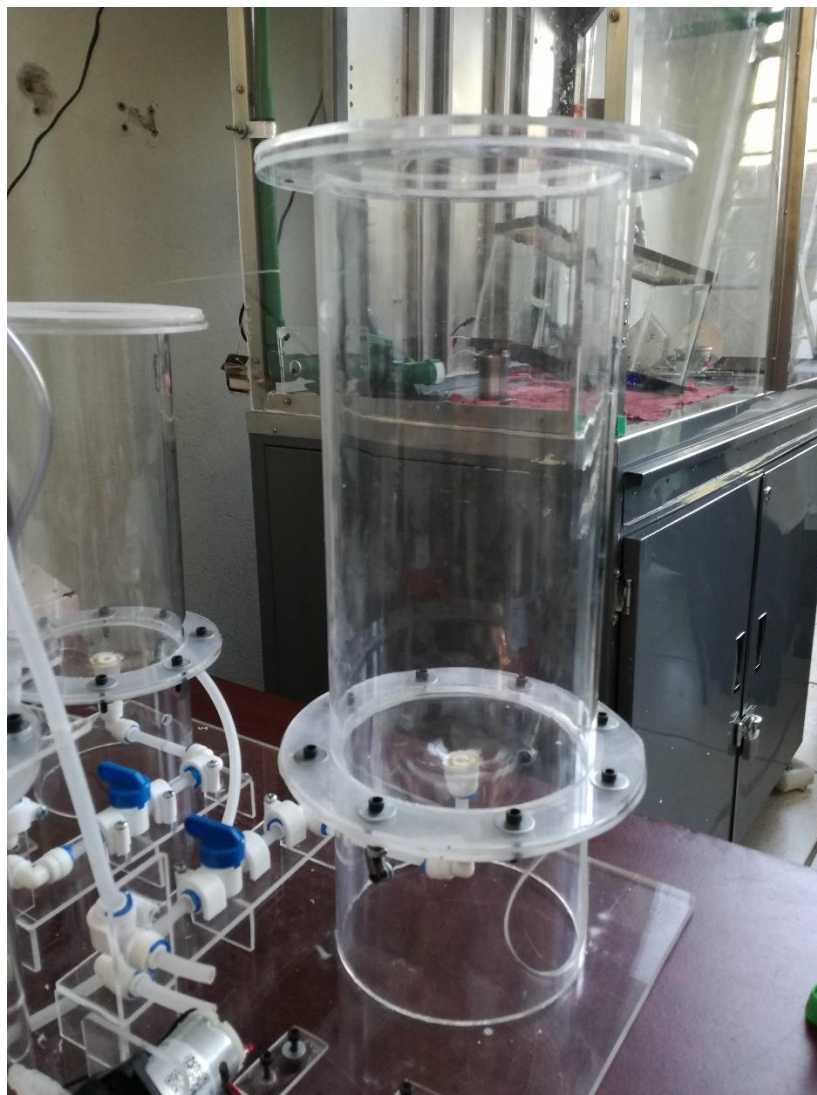


Figura 26. Tanque de almacenamiento TA-202 fabricado en acrílico.


Para sujetar cada uno de los tanques al faldón se utilizaron dos resortes.

3.5.2 Selección y dimensionamiento de la bomba de alimentación.

De acuerdo con las características del fluido, densidad de $1,036 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y una viscosidad de 430 cp y con sólidos suspendidos, se recomienda el uso de una bomba de desplazamiento positivo, específicamente del tipo peristáltica porque en este tipo de bombas, el líquido bombeado no entra en contacto con las partes en movimiento de la bomba, además, se puede controlar el flujo para alimentación al sistema de goteo.

Se utilizaron dos bombas peristálticas, la primera BP-201 para la alimentar lotes de 10 mL de bentonita y Alg-Na en suspensión del tanque de almacenamiento TA-201 al reactor RG-301, la Figura 27 muestra la hoja de datos para esta bomba. La segunda bomba, identificada como BP-202, se usa para alimentar lotes de 500 mL solución de CaCl_2 del tanque de almacenamiento TA-202 al reactor RG-301. La Figura 28 se muestra la hoja de especificación para esta bomba.

La Figura 29 muestra a las bombas peristálticas montadas en una base construida en acrílico que se sujeta a la base por medio de unos tornillos de cabeza allen, la entrada y salida de las bombas es por medio de una conexión rápida a una manguera de diámetro de $\frac{1}{4}$ ".

	Proyecto:	Equipo de esferificación de alginato de calcio y un agente de liberación controlada			
		Hoja de especificación: Bomba de alimentación de bentonita y Alg-Na en suspensión			Tag No. BP-201
		Servicio: Alimentación de bentonita y Alg-Na en suspensión al reactor RG-301			Cantidad 1 pza

DATOS DE PROCESO				
	Mínima	Máxima	Sólidos en suspensión	
Temperatura de operación °C	10	25	No	
Presión de operación Kpa	101.3	101.3	Sustancias corrosivas	
			No	
			Densidad ρ	1036 Kg·m ⁻³
			viscosidad μ	0.43 Pa·s
			Flujo Q	1.00E-06 m ³ ·s ⁻¹

<i>Re</i>	Número de Reynolds	0.7669
<i>f</i>	Factor de fricción	83.4525

SUCCIÓN			
Nota	Descripción	Valor	Unidades
<i>d</i>	Diámetro interno	0.0040	m
<i>V₁</i>	Velocidad	0.0796	m·s ⁻¹
<i>Z₁</i>	Carga estática	0.0300	m
<i>P₁</i>	Presión de succión	80.000	kPa

DESCARGA			
Nota	Descripción	Valor	Unidades
<i>d</i>	Diámetro interno	0.0040	m
<i>V₂</i>	Velocidad	0.0796	m·s ⁻¹
<i>Z₂</i>	Carga estática	0.3500	m
<i>P₂</i>	Presión de descarga	80.000	kPa
<i>L_T</i>	Longitud de línea	0.6000	m
<i>h_L</i>	Perdida por fricción línea	4.0444	m
<i>L_{eq}</i>	5 Codos	150.00	m
<i>L_{eq}</i>	1 válvula	340.00	m
<i>h_A</i>	perdida por fricción acc	13.2117	m
<i>h_f</i>	Perdida por fricción total	17.2561	m


$\Delta H = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + (Z_2 - Z_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + h_f$					
$f = \frac{64}{Re} \quad h_L = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad h_A = f \frac{L_{eq} V^2}{D 2g}$					
Potencia = ρ · g · ΔH · Q					

	$\frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g}$	$(Z_2 - Z_1)$	$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$	h_f	
	0.000	0.3200	0.0000	17.2561	
	ΔH				Unidades
	17.5761				m
	Potencia bruta requerida				0.1784 Watt
	Eficiencia				50%
	Potencia neta de la bomba				0.3569 Watt

DATOS DE LA BOMBA					
Fabricante	Grothen	Modelo	G328	Flujo	1.00 mL·s ⁻¹
MOTOR				Tubing	Silicon
Voltaje	12 V	Potencia	7.5 W		

Fecha	Revisión	Por	Observaciones

Figura 27. Hoja de especificación para la bomba peristáltica BP-201.

	Proyecto:	Equipo de esferificación de alginato de calcio y un agente de liberación controlada	
		Hoja de especificación: Bomba de alimentación de solución de cloruro de calcio	Tag No. BP-202
		Servicio: Alimentación de solución de cloruro de calcio al reactor RG-301	Cantidad 1 pza

DATOS DE PROCESO				
	Mínima	Máxima	Sólidos en suspensión	No
Temperatura de operación °C	10	25	Sustancias corrosivas	No
Presión de operación Kpa	101.3	101.3	Densidad ρ	1014.8 Kg·m ⁻³
			viscosidad μ	0.001 Pa·s
			Flujo Q	1.67E-06 m ³ ·s ⁻¹

<i>Re</i>	Número de Reynolds	538.4745
<i>f</i>	Factor de fricción	0.1189

SUCCIÓN			
Nota	Descripción	Valor	Unidades
<i>d</i>	Diámetro interno	0.0040	m
<i>V₁</i>	Velocidad	0.1327	m·s ⁻¹
<i>Z₁</i>	Carga estática	0.0300	m
<i>P₁</i>	Presión de succión	80.000	kPa

$$\Delta H = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + (Z_2 - Z_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + h_f$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad h_A = f \frac{L_{eq}}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$\text{Potencia} = \rho \cdot g \cdot \Delta H \cdot Q$$

DESCARGA			
Nota	Descripción	Valor	Unidades
<i>d</i>	Diámetro interno	0.0040	m
<i>V₂</i>	Velocidad	0.1327	m·s ⁻¹
<i>Z₂</i>	Carga estática	0.3000	m
<i>P₂</i>	Presión de descarga	80.000	kPa
<i>L_T</i>	Longitud de línea	0.6000	m
<i>h_L</i>	Perdida por fricción línea	0.0160	m
<i>L_{eq}</i>	5 Codos	150.0000	m
<i>L_{eq}</i>	1 válvula	340.0000	m
<i>h_A</i>	perdida por fricción acc	0.0523	m
<i>h_f</i>	Perdida por fricción total	0.0683	m

$\frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g}$	$(Z_2 - Z_1)$	$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$	h_f	ΔH	Unidades
0.000	0.2700	0.0000	0.0683	0.3383	m
Potencia bruta requerida				0.0056	Watt
Eficiencia				50%	
Potencia neta de la bomba				0.0112	Watt

DATOS DE LA BOMBA			
Fabricante	Grothen	Modelo	G328
MOTOR			
Voltaje	12 V	Potencia	7.5 W

Flujo	1.67 mL·s ⁻¹
Tubing	Silicon

Fecha	Revisión	Por	Observaciones

Figura 28. Hoja de especificación para la bomba peristáltica BP-202.

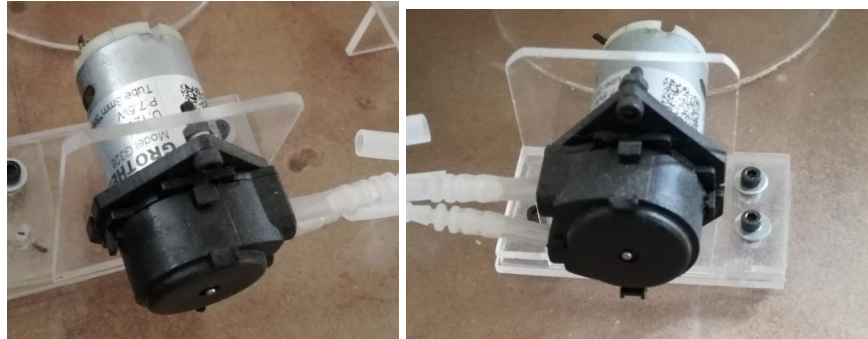


Figura 29. Bombas peristálticas BP-201 y BP-202.

3.5.3 Selección y dimensionamiento de la tubería.

La alimentación y salida de las bombas peristálticas tienen un diámetro interior de 3 mm y un diámetro exterior de 5 mm, por lo que se seleccionó utilizar manguera de polipropileno antibacterial de ¼” de diámetro nominal y un diámetro interno de 4 mm para la conducción de la solución de CaCl_2 del tanque de almacenamiento TA-202 a la bomba BP202 y de la bomba al reactor RG-301. Así como para la conducción del alginato de sodio y bentonita en suspensión del tanque de almacenamiento TA-201 a la bomba peristáltica BP-201 y de la bomba hacia el reactor RG-301.

3.5.4 Sistema de goteo.

El sistema de goteo está compuesto de una boquilla de 2 mm de diámetro con la capacidad dispersar en forma de gotas el alginato de sodio y bentonita en suspensión, en la Figura 30 se muestra el arreglo propuesto para realizar esta función, el soporte de la boquilla se fabricó en material de acrílico.



Figura 30. Boquilla para goteo de alginato de sodio y bentonita en suspensión.

3.5.5 Reactor de gelificación.

La reacción de gelificación por intercambio iónico entre el alginato de sodio y el CaCl_2 se lleva a cabo en un reactor que opera a régimen semicontinuo en el que se deposita 500 mL de la solución de CaCl_2 y se alimenta el alginato de sodio y bentonita en suspensión por medio de un sistema de goteo ubicado en la parte superior del reactor. Para realizar esta función se propone usar dos recipientes cilíndricos concéntricos, el recipiente externo tiene un diámetro de 4" (101.4 mm) y 150 cm de altura, para almacenar 500 mL de solución de CaCl_2 , la hoja de especificaciones se muestra en la Figura 31, y el recipiente fabricado en acrílico se observa en la Figura 32.


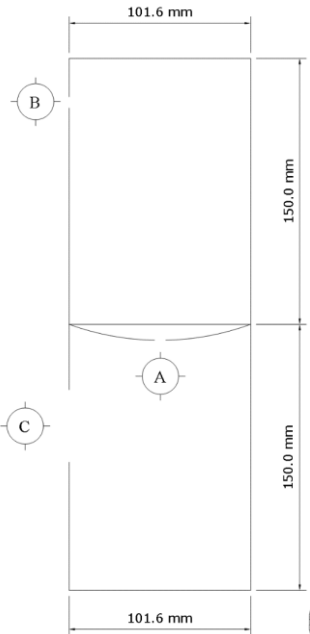
	Proyecto Equipo de esferificación de alginato de calcio y un agente de liberación controlada				
	Hoja de especificación	Reactor de gelificación		Tag No. RG-301	
	Servicio	Reacción de gelificación por intercambio iónico		Cantidad 1 pza	
DATOS DE PROCESO				DIMENSIONES	
	Mínima	Máxima	Capacidad de diseño	1,281	cm ³
Temperatura de operación °C	18	25	Capacidad de operación	500	cm ³
Presión de operación Kpa	101.3	101.3	Posición	Vertical	
Sólidos en suspensión	Sí		Tipo	cilíndrico	
Sustancias corrosivas	No		Diámetro exterior	101.6 mm	
Densidad gr · cm ⁻³	0.954		Altura	160 mm	
viscosidad cp	1.054		espesor	3 mm	
CONSTRUCCIÓN			ACCESORIOS		
Fondo	Cónico		Refrigeración	No	
Tapa superior	No		Válvula de seguridad	No	
Aislamiento	No		Venteo	No	
Pintura	No		Guías	Si	
Material de construcción	Acrílico		Soporte	Faldon	
Lista de boquillas					
Boquilla	Diámetro	Tipo	Servicio		
A	6.3 mm	NPT	Salida de solución		
B	6.3 mm	NPT	Entrada de solución		
Notas					
Para la construcción del cuerpo del tanque se utilizó tubo de acrílico con un diámetro exterior nominal de 101.6 mm y un espesor de pared de 3 mm					
					
Fecha	Revisión	Por	Observaciones		
01-ago	MTVL	MTVL	Propuesta de diseño		

Figura 31. Hoja de especificaciones para el recipiente exterior del reactor RG-301.

La Figura 32 muestra al recipiente exterior del reactor RG-301 fabricado en acrílico, se puede observar el arreglo para la colocación de la palanca que permite la extracción del recipiente interior con las esferas de Alg-Ca.

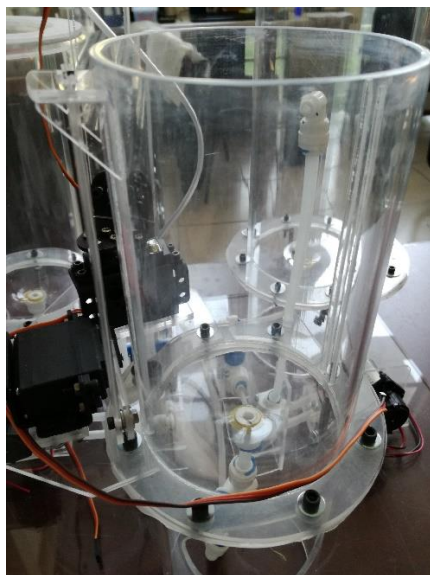


Figura 32. Recipiente externo del reactor de gelificación RG-301.

El recipiente interior tiene un diámetro de 3 ½" (88.9 mm) y 150 mm de altura, compuesto con una plataforma elíptica con un diámetro menor de 83 mm y un diámetro mayor de 84 mm para que forme un ángulo de 10° con la horizontal del fondo del recipiente y perforaciones de 2 mm de diámetro distribuidas en forma radial, la Figura 33 muestra la hoja de especificaciones para este recipiente. El recipiente fabricado se muestra en la Figura 34 , en ella se puede observar la plataforma elíptica que funciona como soporte para las esferas de Alg-Ca y el arreglo para permitir la liberación de las esferas.

	Proyecto Equipo de esferificación de alginato de calcio y un agente de liberación controlada			
	Hoja de especificación		Reactor de gelificación	Tag No. RG-301
	Servicio		Reacción de gelificación por intercambio iónico	Cantidad 1 pza
DATOS DE PROCESO			DIMENSIONES	
	Mínima	Máxima	Capacidad de diseño	809 cm^3
Temperatura de operación °C	18	25	Capacidad de operación	500 cm^3
Presión de operación Kpa	101.3	101.3	Posición	Vertical
Sólidos en suspensión	Sí		Tipo	cilíndrico
Sustancias corrosivas	No		Diámetro exterior	88.9 mm
Densidad $gr \cdot cm^{-3}$	0.954		Altura	150 mm
viscosidad cp	1.054		espesor	3 mm
CONSTRUCCIÓN			ACCESORIOS	
Fondo	no		Orejas de extracción	Si
Tapa superior	No		Guías	Si
Aislamiento	No		Plataforma de perforada	Si
Pintura	No			
Material de construcción	Acrílico		Soporte	Faldon
Lista de boquillas				
Boquilla	Diámetro	Tipo	Servicio	
-	-	-	-	
-	-	-	-	
<p>Notas</p> <p>Para la construcción del cuerpo del tanque se utilizó tubo de acrílico con un diámetro exterior nominal de 101.6 mm y un espesor de pared de 3 mm</p>				
Fecha	Revisión	Por	Observaciones	
01-ago	MTVL	MTVL	Propuesta de diseño	

Figura 33. Hoja de especificaciones para el recipiente interior del reactor de gelificación RG-301.



Figura 34. Recipiente interior del reactor de gelificación RG-301.

Los tanques de almacenamiento TA-201 y TA-202; las bombas peristálticas BP-201 y BP-202; el reactor RG-301 y el panel de control del EEAC se montaron en una plataforma rectangular de acrílico de 40 x 45 cm y 6 mm espesor para facilitar su transporte y manejo.

Para la prueba de funcionamiento del EEAC, se preparó 3 gr alginato de sodio y 3 gr bentonita en suspensión en 300 mL de agua desionizada y se colocó en el tanque de almacenamiento TA-201 como se observa en la Figura 35. También se preparó una solución 5 gr de CaCl_2 en 500 mL de agua desionizada y se colocó en el tanque de almacenamiento TA-202, Figura 36.



Figura 35. Tanque de almacenamiento TA-201 con 300 mL de bentonita y alginato de sodio en suspensión.



Figura 36. Tanque de almacenamiento TA-202 con 500 mL de solución de cloruro de calcio.

Se abrieron las válvulas de paso para permitir el flujo de los tanques de almacenamiento hacia las bombas peristálticas y mediante el accionamiento de la botonera en el panel de control se efectuó la corrida de producción, primero se bombearon los 500 mL de la solución de CaCl_2 hacia el reactor RG-301, la bomba BP-201 trabajó durante 5 minutos para alimentar la cantidad requerida, terminando este tiempo, la bomba se detuvo automáticamente. Al presionar el botón que acciona el motor de la bomba BP-201 se comenzó a alimentar el alginato de sodio y bentonita en suspensión para la formación de gotas, Figura 37.



Figura 37. Goteo de alginato de sodio y bentonita en suspensión en el reactor RG-301.

Se probaron tres ciclos de producción, el primero con 30 segundos de trabajo de la bomba BP-201, el segundo con trabajo de 60 segundos de la bomba y el tercero con un tiempo de trabajo de la bomba de 120 segundos.

También se probaron diferentes velocidades del motor de la bomba BP-201 variando el voltaje de alimentación al motor.

Para la extracción de las esferas de Alg-Ca se presiona el botón que controla los servomotores para extraer el recipiente interno del reactor RG-301 que contiene las esferas de Alg-Ca, cuando el contenedor de las perlas se encuentra disponible se retira y se sumerge en un contenedor de producto terminado que contiene agua de lavado, posteriormente se acciona el botón que mueve la plataforma perforada que se encuentra en el fondo del recipiente para liberar a las esferas de Alg-Ca, como se muestra en la Figura 38.



Figura 38. Extracción de esferas de Alg-Ca del reactor RG-301, expulsión del recipiente contenedor de las esferas (lado izquierdo) y liberación de las esferas en el recipiente contenedor de producto terminado (lado derecho).

La Figura 39 muestra el producto obtenido después de 8 corridas de producción de esferas de Alg-Ca de 30 segundos cada una, en el lado izquierdo de la figura se observan las esferas de Alg-Ca en el recipiente contenedor de producto terminado y en el lado derecho las esferas las esferas de Alg-Ca están fuera del recipiente.

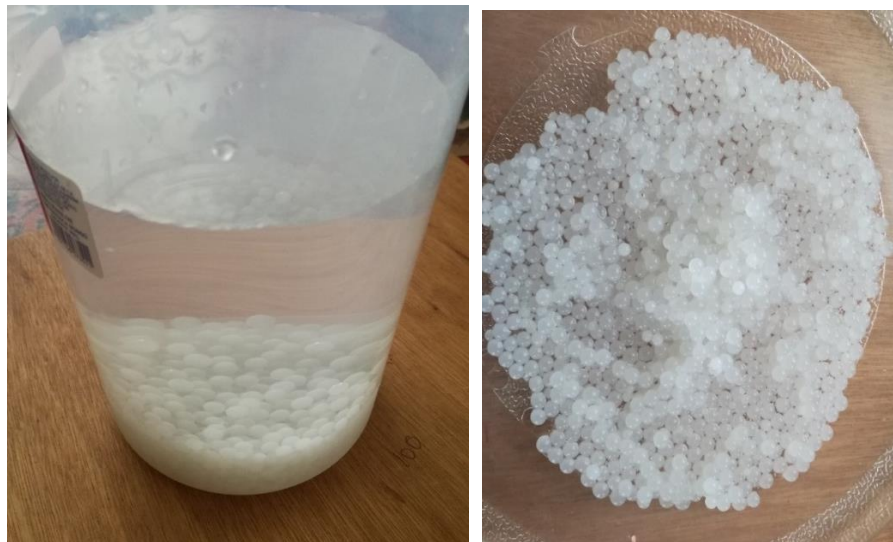


Figura 39. Producto terminado.

3.5.6 Manual de operación para el EEAC.

Para la operación del equipo se requiere de una computadora con el software Arduino, un cable USB para Arduino tipo A-B y un adaptador de corriente de 110 V AC a 12 V CD.

Antes de iniciar la operación del equipo, se debe de revisar que las válvulas VF-201, VF-202 y VF-301 se encuentren cerradas.

Para iniciar la operación de EEAC se colocan 2,000 mL de solución de cloruro de calcio en el tanque de almacenamiento TA-202 y 1,000 mL de bentonita y alginato de sodio en suspensión en el tanque de almacenamiento de alginato de sodio TA-201.

Abrir el software Arduino, cargar el programa “control total” a la tarjeta de Arduino UNO y abrir la pantalla del monitor serial para observar los valores de temperatura y humedad recolectados por el sensor DHT-11.

El adaptador de corriente a 12 VC se conecta a la conexión hembra tipo Jack y se oprime el botón de encendido/apagado mostrados en la Figura 40.



Figura 40. Botón de encendido del EEAC en el costado de la caja de conexiones.

Se abre la válvula VF-202 para permitir el paso de la solución de CaCl_2 del tanque de almacenamiento TA-202 hacia la bomba BP-202, también se abre la válvula VF-201 para permitir el paso del alginato de sodio en suspensión del tanque de almacenamiento TA-201 a la bomba peristáltica BP-201, Figura 41.

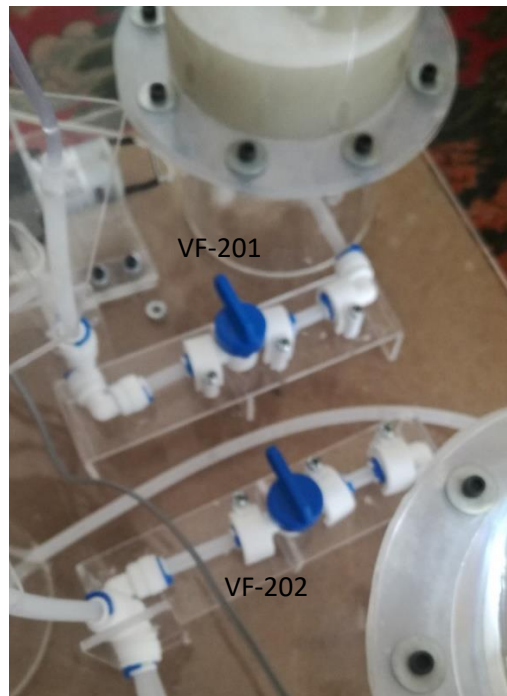


Figura 41. Válvulas para el control de flujo de solución de cloruro de calcio y suspensión de alginato de sodio.

Se oprime el botón de alimentación de solución de cloruro de calcio que acciona la bomba peristáltica BP-202 para bombear 500 mL del tanque de almacenamiento TA-202 al reactor RG-301. El led se encenderá para indicar que la bomba está funcionando, Figura 42.

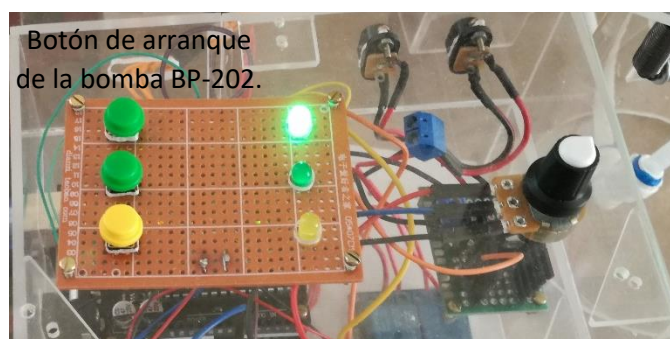


Figura 42. Botón de arranque de la bomba BP-202 y led indicador de funcionamiento.

El motor de la bomba se apagará automáticamente cuando se haya completado el tiempo establecido en el programa de Arduino, el led indicador se apagará cuando se termine de bombear la solución de CaCl_2 .

Presionar el botón de alimentación de alginato de sodio que acciona la bomba peristáltica BP-201 para bombear de bentonita y alginato de sodio en suspensión del tanque de almacenamiento TA-201 hacia el gotero en el reactor RG-301 el led indicador de arranque de la bomba encenderá, Figura 43.

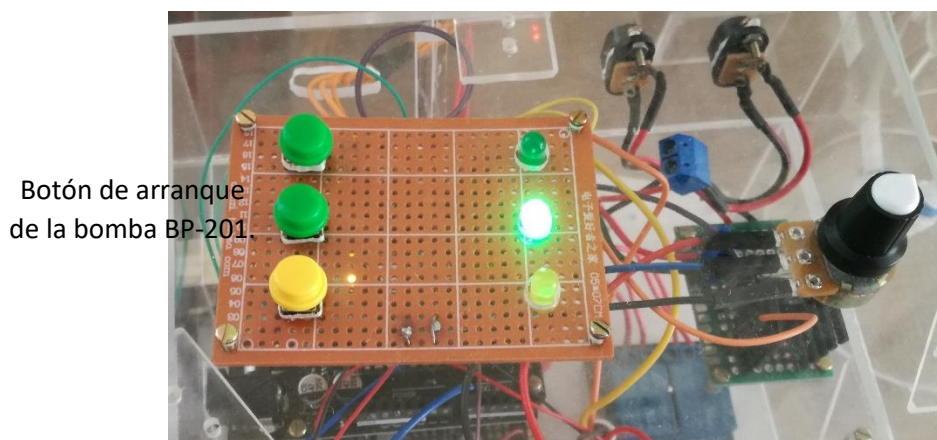


Figura 43. Botón de arranque de la bomba BP-201, led indicador de funcionamiento y potenciómetro para regular la velocidad de alimentación de alginato.

El flujo requerido puede ser regulado con el potenciómetro mostrado en el panel de control, se recomienda establecer un valor de potenciómetro entre 80 a 90, lo que permite un paso de corriente de 10 V CD al motor de la bomba. El motor de la bomba BP-201 se apagará automáticamente cuando se haya completado la cantidad requerida, el led indicador de funcionamiento se apagará. El tiempo de funcionamiento de la bomba se puede variar en el programa de Arduino UNO, se recomienda establecer un tiempo de 30 a 60 segundos para evitar la aglomeración de las esferas de alginato de calcio en el recipiente contenedor del reactor RG-301. Es importante mencionar que en el programa de Arduino el tiempo se especifica en milisegundos, es decir, se debe de multiplicar el tiempo establecido en segundos

por 1000, Figura 44. La línea de instrucción 15 “TCaCl=300000” establece el tiempo de bombeo de la bomba BP-202 para el bombeo de la solución de CaCl₂ igual a 5 minutos, mientras que la línea de instrucción 18 “TAlg=60000” establece un tiempo de trabajo de la bomba BP-201 de 1 minuto para el bombeo del alginato de sodio y bentonita en suspensión.

```

Prueba_May11 Arduino 1.8.12
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Prueba_May11 $
1
2 /* propuesta para el control de la producción de esferas de alginato
3  * de calcio y un agente de liberación controlada */
4
5 // *****
6 /*** CONTROL TOTAL **
7 //*****
8
9 #include <Servo.h>
10 #include <DHT.h>
11
12 //control de tiempo
13 unsigned long Tiempo=0; // variable para controlar el tiempo
14 unsigned long TCaClini=0; // tiempo inicial de alimentación de CaCl2
15 unsigned long TCaCl=300000; // tiempo de alimentación de CaCl2
16 unsigned long DTCaCl; // diferencia de tiempo para control de bomba CaCl2
17 unsigned long TAlgini=0; // tiempo inicial de alimentación de Alginato
18 unsigned long TAlg=60000; // tiempo de alimentación de Alginato
19 unsigned long DTAIg; // diferencia de tiempo para control de bomba Alginato
20 unsigned long TReporte=0; // variable para control de reporte
21 unsigned long TRepini=0; // tiempo de reporte inicial
22 const int ret=20; // retardo en el movimiento de servos
23

```

Figura 44. Parte del programa en el que es posible cambiar los tiempos de alimentación de las bombas BP-201 y BP-202.

Oprimir el botón extracción para accionar los servomotores que mueven el gotero, la base del gotero y la palanca que levanta al recipiente contenedor de las esferas de Alg-Ca, el led indicador de funcionamiento de los servos se encenderá, Figura 45.

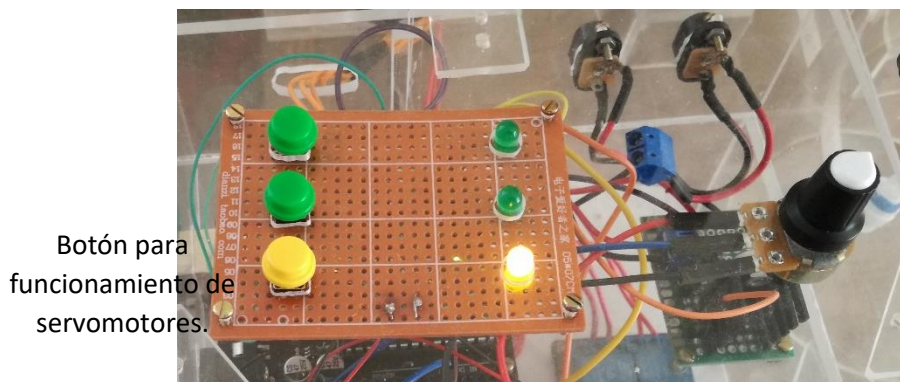


Figura 45. Botón para accionar los servomotores y led indicador de funcionamiento de servomotores.

Al finalizar la operación de los servomotores el recipiente contenedor de las esferas de Alg-Ca estará disponible para separarlo del reactor RG-301 y transportar las esferas de Alg-Ca al recipiente contenedor de producto terminado, Figura 46.



Figura 46. Extracción del recipiente contenedor de las esferas de Alg-Ca.

Una vez que se han liberado las esferas de Alg-Ca, el recipiente contenedor vacío se coloca en su lugar en el reactor RG-301, después, se oprime nuevamente el botón extracción para accionar nuevamente los servomotores que regresarán al recipiente contenedor de esferas de Alg-Ca al fondo del reactor RG-301. La base del gotero y el gotero regresarán a su posición para producción de esferas de Alg-Ca, cuando finaliza esta operación el led indicador de servos se apagará.

En este punto del proceso, el operador del equipo debe de evaluar si es necesario alimentar un lote nuevo de solución de CaCl_2 al reactor RG-301 o continuar con un nuevo lote de alginato de sodio y bentonita en suspensión, por lo tanto, se elige una de las siguientes opciones:



Figura 48. Válvula de VF-301 para eliminar la solución de cloruro de calcio agotado del reactor RG-301.

Limpieza del EEAC.

Al terminar la producción de esferas de Alg-Ca se colocan 500 mL de agua en el tanque de almacenamiento TA-202 y 300 mL de agua en el tanque de almacenamiento TA-201, se realizan algunas corridas de producción para limpiar las mangueras que conectan los tanques de almacenamiento a las bombas y al reactor RG-301, al finalizar se abre la válvula VF-301 para eliminar el agua contenida en el reactor RG-301.

Como segundo paso de limpieza, se colocan nuevamente 300 mL de agua en cada uno de los tanques TA-201 y TA-202 y se ejecuta el programa de Arduino llamado “limpieza” que se encuentra en el anexo 4, el cual pone en funcionamiento al mismo tiempo a las bombas BP-201 y BP-202, para limpieza de los tanques de almacenamiento y las manguetas de conexión del EEAC.

En el tercer paso de limpieza, se desconecta el cable micro USB tipo A-B del EEAC y de la computadora, se corta el suministro eléctrico al EEAC presionando el botón de encendido / apagado mostrado en la Figura 40 y se desconecta el adaptador del tomacorriente.

Por último, se utiliza un paño para secar los componentes del equipo y se colocan las tapas de los tanques TA-201 y TA-202.


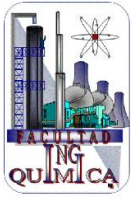
CONCLUSIONES.

- 1 La conformación del equipo automático de esferificación de alginato de calcio y un agente de liberación controlada en cuatro secciones es adecuada para el desarrollo del proceso y la operación automática del EEAC. La primera sección está compuesta por el tanque TA-201 para almacenar 1,000 mL de bentonita y alginato de sodio en suspensión y el tanque TA-202 que almacena 2,000 mL de solución de CaCl_2 ; la bomba peristáltica BP-201 se utiliza para proporcionar un flujo controlado de $1.0 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ de la suspensión de alginato y bentonita, la bomba BP-202 se utiliza para suministrar lotes de 500 mL de la solución de CaCl_2 al reactor RG-301. En la segunda sección se encuentra el reactor RG-301 en el que se lleva a cabo la esferificación por intercambio iónico entre el alginato de sodio y el cloruro de calcio. La tercera sección se compone de un sistema de separación mecánica para extraer las esferas de alginato de calcio en fase gel de la solución de CaCl_2 . La cuarta sección está integrada por tres servomotores, dos de ellos accionan el sistema de dosificación de alginato de sodio y el tercero manipula un sistema de palancas para la extracción de las esferas de alginato de calcio, incluye también el sistema electrónico para controlar el flujo de bombas peristálticas y el movimiento de los servomotores.
- 2 El proceso de producción de esferas de alginato de calcio con un agente de liberación controlada en el reactor semicontinuo RG-301 está basado en el mecanismo de gelificación externa por goteo, el diseño del reactor permite controlar variables que influyen en la forma y el tamaño de las esferas de Alg-Ca, como la altura de caída de la gota de alginato de sodio y bentonita en suspensión, la profundidad de la solución de CaCl_2 , la velocidad de alimentación de la bentonita y alginato de sodio en suspensión mediante el control del voltaje suministrado al motor de la bomba BP-201.

- 3 Debido a que la operación del reactor requiere de un suministro constante de los reactivos, se diseñó un sistema de bombeo, tuberías y accesorios, así como los tanques de almacenamiento para gelificar 1,000 mL de Alg-Na y bentonita en suspensión en lotes de 10 mL usando 2,000 mL de una solución de CaCl_2 como agente gelificante.
- 4 El soporte teórico de todos los equipos que componen a la unidad de proceso se reporta en los diagramas DFP, DTI, bifilar, así como las hojas de especificación de cada uno de los equipos.
- 5 Finalmente, el EEAC tiene la capacidad para producir hasta 180 esferas de alginato de calcio y un agente de liberación controlada por minuto, por lo tanto, para procesar un lote de 1,000 mL de bentonita y alginato de sodio en suspensión se requiere de 2 horas de trabajo continuo del equipo. Es posible modificar la velocidad de producción de esferas de alginato de calcio ajustando el voltaje alimentado al motor de la bomba BP-201 para modificar el flujo de alimentación de alginato de sodio y bentonita en suspensión. Se puede modificar el tamaño de las esferas de alginato de calcio y un agente de liberación controlada incrementando o disminuyendo el diámetro de la boquilla de goteo en el reactor de gelificación RG-301.

Anexo 2.

Formato para evaluación de materiales de construcción para los recipientes del EEAC

	<p>FORMATO PARA EVALUACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN</p>				
PROYECTO <u>Equipo automático para esferificación de alginato de calcio.</u>					
NOMBRE DEL EQUIPO <u>Recipientes de almacenamiento y reactor de gelificación</u>					
No. DE EQUIPO <u>TA-201, TA-202, RG-301</u>		FECHA <u>01/08/2019</u>			
Material a evaluar	Compatibilidad química	Maleabilidad	Disponibilidad	Costo	Durabilidad
Acero al carbono	Regular	Buena	Ok	Alto	Buena
Acero Inoxidable	Cumple	Buena	ok	Alto	Buena
PVC	Cumple	Buena	ok	Bajo	Buena
Acrílico	Cumple	Buena	ok	Bajo	Buena
Material seleccionado					
Acrílico					
Justificación					
Los materiales propuestos cumplen adecuadamente con la función que se requiere para la fabricación de los equipos, sin embargo, el costo del acero inoxidable y del acero al carbono hacen inviable utilizarlos. Por otra parte el acrílico es un material que se utiliza comnmente para el prototipado ya que es de bajo costo, transparente y de buena durabilidad.					

Anexo 3.

Código en Arduino.

```
/* propuesta para el control de la producción de esferas de alginato
```

```
* de calcio y un agente de liberación controlada */
```

```
// *****
```

```
/** CONTROL TOTAL **
```

```
//*****
```

```
#include <Servo.h>
```

```
#include <DHT.h>
```

```
//control de tiempo
```

```
unsigned long Tiempo=0; // variable para controlar el tiempo
```

```
unsigned long TCaClini=0; // tiempo inicial de alimentación de CaCl2
```

```
unsigned long TCaCl=300000; // tiempo de alimentación de CaCl2
```

```
unsigned long DTCaCl; // diferencia de tiempo para control de bomba CaCl2
```

```
unsigned long TAlgini=0; // tiempo inicial de alimentación de Alginato
```

```
unsigned long TAlg=60000; // tiempo de alimentación de Alginato
```

```
unsigned long DTAIg; // diferencia de tiempo para control de bomba Alginato
```

```
unsigned long TReporte=0; // variable para control de reporte
```

```
unsigned long TRepini=0; // tiempo de reporte inicial
```

```
const int ret=20; // retardo en el movimiento de servos
```

```
// variable para el control de botones
```

```
const int releCaCl=2; // bomba para alimentación de solución CaCl2
```

```
const int SalPot=3; // pin de salida para potenciómetro
```

```
const int releAlg=4; // bomba para alimentación de Alginato de sodio
```

```
const int botonIni=5; // pin botón de inicio
```

```
const int botonAlg=6; // pin botón para bomba de alginato
```

```
const int botonExt=7; // pin botón para bomba de cloruro de calcio
```

```
const int sensor=12; //sensor DTH-11
```

```

int EntPot=A0;           // para entrada de los datos del potenciómetro
const int ledBombaCa=A1; // indicador de bomba CaCl2 ON
const int ledBombaAlg=A2; // indicador de bomba Alg ON
const int ledServos=A3;  // indicador de servos ON

bool botonIniahora=LOW; // estado actual de botón de inicio
bool botonIniantes=LOW; // estado anterior del botón de inicio

bool botonAlgahora=LOW; // estado actual de botón para bomba de alginato
bool botonAlgantes=LOW; // estado anterior del botón para la bomba de alginato

bool botonExtahora=LOW; // estado actual del botón de extracción
bool botonExtantes=LOW; // estado anterior del botón de extracción

// control de servomotores asignación de nombre a servomotores
Servo gotero;
Servo base;
Servo palanca;

//variables para control del servo para el gotero
const int iniciogot=150; // posición inicial del gotero
const int fingot=100;   // posición final del gotero
int posgot;             // variable que indica la posición del gotero

// variables para control del servo para la base
const int iniciobase=100; // posición inicial de la base
const int finbase=150;   // posición final de la base
int posbase;             // variable para la posición de la base

// variables para control del servo para la palanca
const int iniciopal=155; // posición inicial de la palanca
const int finpal=120;   // posición final de la palanca

```

```

int pospal;                // variable para la posición de la palanca

//estados de operación
const int Apagado=1;
const int AlimCaCl=2;
const int EsperaCaCl=3;
const int AlimAlg=4;
const int EsperaAlg=5;
const int Extraccion=6;
const int Retorno=7;
int estado;

// contador de ciclos de producción
int contadorCaCl=0;
int contadorAlg=0;

// sensor de temperatura y humedad
int temperatura;
int humedad;
DHT dht(sensor,DHT11);

// variable para el control de flujo de la bomba de Alginato
int velvar;
int poten;

void setup() {
  // pines para control de servomotores
  gotero.attach(8);
  base.attach(9);
  palanca.attach(10);

  // pines para motores
  pinMode(releCaCl,OUTPUT);

```

```

pinMode(releAlg,OUTPUT);

// pines para botones y LEDS
pinMode(botonIni,INPUT);
pinMode(botonAlg,INPUT);
pinMode(botonExt,INPUT);

pinMode(ledBombaCa,OUTPUT);
pinMode(ledBombaAlg,OUTPUT);
pinMode(ledServos,OUTPUT);

//pin para datos para el potenciómetro
pinMode(SalPot,OUTPUT);

estado=Apagado;
apagarM();
inicioServo();

Serial.begin(9600);
dht.begin();
}

void loop() {
  obtenerdatos();
  controlarproceso();
  medirTempyHum();
  reportar();
}

void obtenerdatos(){
  botonIniantes=botonIniahora;
  botonIniahora=digitalRead(botonIni);
  botonAlgantes=botonAlgahora;

```

```
botonAlgahora=digitalRead(botonAlg);  
botonExtantes=botonExtahora;  
botonExtahora=digitalRead(botonExt);
```

```
Tiempo=millis();  
DTCaCl=Tiempo-TCaClini;  
DTAlg=Tiempo-TAlgini;  
TReporte=TRepini+2000;
```

```
poten=analogRead(EntPot);  
velvar=map(poten,0,1023,0,255);  
delay(30);  
}
```

```
void controlarproceso(){  
  switch(estado){  
    case Apagado:  
      controlapagado();  
      break;  
  
    case AlimCaCl:  
      controlAlimCaCl();  
      break;  
  
    case EsperaCaCl:  
      controlEsperaCaCl();  
      break;  
  
    case AlimAlg:  
      controlAlimAlg();  
      break;  
  
    case EsperaAlg:
```

```

controlEsperaAlg();
break;

case Extraccion:
controlExtraccion();
break;

case Retorno:
controlRetorno();
break;
}
}

void medirTempyHum(){
  humedad=dht.readHumidity();
  temperatura=dht.readTemperature();
}

void reportar(){
  if(Tiempo>=TReporte){
    TRepini=Tiempo;
    Serial.print("Temperatura: ");
    Serial.print(temperatura);
    Serial.println(" °C ");
    Serial.println();

    Serial.print("Humedad: ");
    Serial.print(humedad);
    Serial.println(" % ");
    Serial.println();

    Serial.print("Ciclo Cloruro: ");
    Serial.println(contadorCaCl);

```



```

Serial.print("Ciclo Alginato: ");
Serial.println(contadorAlg);
Serial.println();

Serial.println(velvar);
}
}

void controlapagado(){
  if ((botonIniahora==LOW)&&(botonIniantes==HIGH)){
    encenderBCaCl();
    // contadorCaCl++;
  }
}

void controlAlimCaCl(){
  if (DTCaCl>TCaCl){
    apagarMCacl();
  }
}

void controlEsperaCaCl(){
  if ((botonAlgahora==LOW)&&(botonAlgantes==HIGH)){
    encenderBAlg();
    // contadorAlg++;
  }
}

void controlAlimAlg(){
  if (DTAlg>=TAlg){
    apagarMAlg();
  }
}

```

```

void controlEsperaAlg(){
  if((botonExtahora==LOW)&&(botonExtantes==HIGH)){
    goteroarriba();
  }
}

void controlExtraccion(){
  if((botonExtahora==LOW)&&(botonExtantes==HIGH)){
    goteroabajo();
  }
}

void controlRetorno(){
  if ((botonAlghora==LOW)&&(botonAlgantes==HIGH)){
    encenderBAlg();
  }
  else if ((botonIniahora==LOW)&&(botonIniantes==HIGH)){
    encenderBCaCl();
  }
}

void encenderBCaCl(){
  digitalWrite(releCaCl,LOW);
  digitalWrite(ledBombaCa,HIGH);
  TCaClni=Tiempo;
  contadorCaCl++;
  estado=AlimCaCl;
}

void apagarMCacl(){
  digitalWrite(releCaCl,HIGH);
  digitalWrite(ledBombaCa,LOW);

```

```

    estado=EsperaCaCl;
}

void encenderBAlg(){
    digitalWrite(releAlg,LOW);
    digitalWrite(ledBombaAlg,HIGH);
    analogWrite(SalPot,velvar);
    TAlgini=Tiempo;
    contadorAlg++;
    estado=AlimAlg;
}

void apagarMAlg(){
    digitalWrite(releAlg,HIGH);
    digitalWrite(ledBombaAlg,LOW);
    estado=EsperaAlg;
}

void goteroarriba(){
    digitalWrite(ledServos,HIGH);
    for(posgot=iniciogot;posgot>fingot;posgot--)
    {
        gotero.write(posgot);
        delay(ret);
    }
    for(posbase=iniciobase;posbase<finbase;posbase++)
    {
        base.write(posbase);
        delay(ret);
    }
    for(pospal=iniciopal;pospal>finpal;pospal--)
    {
        palanca.write(pospal);

```

```

    delay(ret);
}
finalServo();
estado=Extraccion;
}

void goteroabajo(){
    for(pospal=finpal;pospal<iniciopal;pospal++)
    {
        palanca.write(pospal);
        delay(ret);
    }
    for(posbase=finbase;posbase>iniciobase;posbase--)
    {
        base.write(posbase);
        delay(ret);
    }
    for(posgot=fingot;posgot<iniciogot;posgot++)
    {
        gotero.write(posgot);
        delay(ret);
    }
    inicioServo();
    apagarM();
    estado=Retorno;
}

void apagarM(){
    digitalWrite(releCaCl,HIGH);
    digitalWrite(releAlg,HIGH);
    digitalWrite(ledBombaCa,LOW);
    digitalWrite(ledBombaAlg,LOW);
    digitalWrite(ledServos,LOW);
}

```

```
}  
void inicioServo(){  
  palanca.write(iniciopal);  
  base.write(iniciobase);  
  gotero.write(iniciogot);  
}
```

```
void finalServo(){  
  gotero.write(fingot);  
  base.write(finbase);  
  palanca.write(finpal);  
}
```

Fin del código en Arduino.

Anexo 4.

Programa en Arduino para limpieza del EEAC.

Inicio de programa.

```
// *****  
/** LIMPIEZA **  
//*****
```

//control de tiempo

```
unsigned long Tiempo=0;           // variable para controlar el tiempo  
unsigned long TBombas=0;          // tiempo inicial de alimentación de CaCl2  
unsigned long Tlimpieza=60000;    // tiempo de alimentación de CaCl2  
unsigned long DTlimpieza;
```

```
const int releCaCl=2;             // bomba para alimentación de solución CaCl2  
const int SalPot=3;               // pin de salida para potenciómetro  
const int releAlg=4;              // bomba para alimentación de Alginato de sodio  
const int botonIni=5;             // pin botón de inicio
```

```
int EntPot=A0;                    // para entrada de los datos del potenciómetro  
const int ledBombaCa=A1;          // indicador de bomba CaCl2 ON  
const int ledBombaAlg=A2;         // indicador de bomba Alg ON
```

```
bool botonIniahora=LOW;           // estado actual de botón de inicio  
bool botonIniantes=LOW;           // estado anterior del botón de inicio
```

//estados de operación

```
const int Apagado=1;  
const int Limpiar=2;  
int estado=Apagado;
```

```
// variable para el control de flujo de la bomba de Alginato
```

```

int velvar;
int poten;

void setup() {

    // pines para motores
    pinMode(releCaCl,OUTPUT);
    pinMode(releAlg,OUTPUT);

    // pines para botones y LEDS
    pinMode(botonIni,INPUT);
    pinMode(ledBombaCa,OUTPUT);
    pinMode(ledBombaAlg,OUTPUT);

    //pin para datos para el potenciómetro
    pinMode(SalPot,OUTPUT);
}

void loop() {
    obtenerdatos();
    limpieza();
}

void obtenerdatos(){
    botonIniantes=botonIniahora;
    botonIniahora=digitalRead(botonIni);

    Tiempo=millis();
    DTlimpieza=Tiempo-TBombas;

    velvar=255;

```

```
delay(30);  
}
```

```
void limpieza(){  
  switch(estado){  
    case Apagado:  
      controlApagado();  
      break;  
  
    case Limpiar:  
      controlLimpiar();  
      break;  
  }  
}
```

```
void controlApagado(){  
  if ((botonIniahora==LOW)&&(botonIniantes==HIGH)){  
    Arrancarbombas();  
  }  
}
```

```
void controlLimpiar(){  
  if (DTlimpieza>=Tlimpieza){  
    Pararbombas();  
  }  
}
```

```
void Arrancarbombas(){  
  digitalWrite(releCaCl,LOW);  
  digitalWrite(ledBombaCa,HIGH);  
  digitalWrite(releAlg,LOW);  
  digitalWrite(ledBombaAlg,HIGH);
```



```
analogWrite(SalPot,velvar);
TBombas=Tiempo;
estado=Limpiar;
}

void Pararbombas(){
digitalWrite(releCaCl,HIGH);
digitalWrite(ledBombaCa,LOW);
digitalWrite(releAlg,HIGH);
digitalWrite(ledBombaAlg,LOW);
estado=Apagado;
}
```

Fin de programa Arduino.

BIBLIOGRAFÍA

- Antiemo-Obeng, V. A., Penney, W. R., & Armenante, P. (2004). Solid-Liquid Mixing. In E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, & S. M. Kresta (Eds.), *Handbook of industrial Mixing science and practice* (pp. 543–582). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Baur, E., Osswald, T. A., & Rudolph, N. (2019). Plastic materials. In *Plastics Handbook The resource for Plastic Engineers* (pp. 337–578). Hanser Verlag, Munich: Elsevier Inc.
- Chan, E. S., Lee, B. B., Ravindra, P., & Poncelet, D. (2009). Prediction models for shape and size of ca-alginate macrobeads produced through extrusion-dripping method. *Journal of Colloid and Interface Science*, 338(1), 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.05.027>
- Couper, J. R., Penney, W. R., & Walas, S. M. (2010). *Chemical Process Equipment* (Revised se). Burlington, MA. USA.: Butterworth-Heine.
- Etcheverry, M., Cappa, V., Trelles, J., & Zanini, G. (2017). Montmorillonite-alginate beads: Natural mineral and biopolymers based sorbent of paraquat herbicides. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(6), 5868–5875. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.018>
- Flores Céspedes, F., Pérez García, S., Villafranca Sánchez, M., & Fernández Pérez, M. (2013). Bentonite and anthracite in alginate-based controlled release formulations to reduce leaching of chloridazon and metribuzin in a calcareous soil. *Chemosphere*, 92(8), 918–924. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.001>
- Fu, S., Thacker, A., Sperger, D. M., Boni, R. L., Buckner, I. S., Velankar, S., ... Block, L. H. (2011). Relevance of Rheological Properties of Sodium Alginate in Solution to Calcium Alginate Gel Properties. *AAPS PharmSciTech*, 12(2), 453–460. <https://doi.org/10.1208/s12249-011-9587-0>

- Goh, C. H., Heng, P. W. S., & Chan, L. W. (2012). Alginates as a useful natural polymer for microencapsulation and therapeutic applications. *Carbohydrate Polymers*, 88(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.11.012>
- Haldar, K., & Chakraborty, S. (2018). Role of chemical reaction and drag force during drop impact gelation process. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 559(September), 401–409. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.09.070>
- Hansen, D. A. (2009). Selecting Materials of construction (Steel and Other Metals). In L. Albright (Ed.), *Albright's Chemical Engineering Handbook*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group.
- He, Y., Wu, Z., Tu, L., Han, Y., Zhang, G., & Li, C. (2015). Encapsulation and characterization of slow-release microbial fertilizer from the composites of bentonite and alginate. *Applied Clay Science*, 109–110, 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.001>
- Islam, A., Taufiq-Yap, Y. H., Ravindra, P., Moniruzzaman, M., & Chan, E. S. (2013). Development of a procedure for spherical alginate-boehmite particle preparation. *Advanced Powder Technology*, 24(6), 1119–1125. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2013.03.021>
- Lee, B. B., Ravindra, P., & Chan, E. S. (2013). Size and shape of calcium alginate beads produced by extrusion dripping. *Chemical Engineering and Technology*, 36(10), 1627–1642. <https://doi.org/10.1002/ceat.201300230>
- Leick, S., Kemper, A., & Rehage, H. (2011). Alginate/poly-l-lysine capsules: Mechanical properties and drug release characteristics. *Soft Matter*, 7(14), 6684–6694. <https://doi.org/10.1039/c1sm05676j>
- Leong, J. Y., Lam, W. H., Ho, K. W., Voo, W. P., Lee, M. F. X., Lim, H. P., ... Chan, E. S. (2016). Advances in fabricating spherical alginate hydrogels with controlled particle designs by ionotropic gelation as encapsulation systems. *Particuology*, 24, 44–60. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2015.09.004>

- Lezehari, M., Basly, J. P., Baudu, M., & Bouras, O. (2010). Alginate encapsulated pillared clays: removal of a neutral/anionic biocide (pentachlorophenol) and a cationic dye (safranine) from aqueous solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 366(1–3), 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.05.021>
- Lim, M. P. A., Lee, W. L., Widjaja, E., & Loo, S. C. J. (2013). One-step fabrication of core-shell structured alginate-PLGA/PLLA microparticles as a novel drug delivery system for water soluble drugs. *Biomaterials Science*, 1(5), 486–493. <https://doi.org/10.1039/c3bm00175j>
- Liu, C. H., Wu, J. Y., & Chang, J. S. (2008). Diffusion characteristics and controlled release of bacterial fertilizers from modified calcium alginate capsules. *Bioresource Technology*, 99(6), 1904–1910. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.029>
- Lopes da Silva, T., Moreira Martins Vidart, J., Gurgel Carlos da Silva, M., Luiz Gimenes, M., & Gurgel Adeodato Vieira, M. (2017). Alginate and Sericin: Environmental and Pharmaceutical Applications. In *Biological Activities and Application of Marine Polysaccharides*. In TechOpen. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/65257>
- Lupo, B., Maestro, A., Gutiérrez, J. M., & González, C. (2015). Characterization of alginate beads with encapsulated cocoa extract to prepare functional food: Comparison of two gelation mechanisms. *Food Hydrocolloids*, 49, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.02.023>
- Maestrelli, F., Mura, P., González-Rodríguez, M. L., Cózar-Bernal, M. J., Rabasco, A. M., Di Cesare Mannelli, L., & Ghelardini, C. (2017). Calcium alginate microspheres containing metformin hydrochloride niosomes and chitosomes aimed for oral therapy of type 2 diabetes mellitus. *International Journal of Pharmaceutics*, 530(1–2), 430–439. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.07.083>
- Megyesy, E. F. (1992). *Manual de recipientes a presión* (Primera ed). México: Editorial Limusa, S.A. de C.V.
- Mørch, Ý. A., Donati, I., Strand, B. L., & Skjåk-Bræk, G. (2006). Effect of Ca²⁺, Ba²⁺, and Sr²⁺ on alginate microbeads. *Biomacromolecules*, 7(5), 1471–1480. <https://doi.org/10.1021/bm060010d>

- Musumeci, M., Pappalardo, F., Tonolo, G., Torrisi, F., Gullo, F., & Musumeci, S. (2013). Effect of LDL-apheresis on plasma lipids, chitotriosidase and anti-oxLDL antibodies in heterozygous familial hypercholesterolemia. *Journal of Biomedical Science and Engineering*, 02(07), 499–505. <https://doi.org/10.4236/jbise.2009.27072>
- Ozkan, G., Franco, P., Marco, I. De, Xiao, J., & Capanoglu, E. (2019). A review of microencapsulation methods for food antioxidants: Principles, advantages, drawbacks and applications. *Food Chemistry*, 272(February 2018), 494–506. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.205>
- Perry, R. H., & Green, D. W. (Eds.). (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8th ed.). Mc Graw-Hill.
- Qin, Y., Jiang, J., Zhao, L., Zhang, J., & Wang, F. (2018). Applications of Alginate as a Functional Food Ingredient. In *Biopolymers for Food Design* (pp. 409–429). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811449-0/00013-X>
- Towler, G., & Sinnott, R. (2013). *Chemical Engineering Design* (Second). Waltham, Ma. USA: Elsevier Ltd.
- Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., Shaeiwitz, J., & Bhattacharyya, D. (2012). *Analysis, synthesis and design of chemical processes* (Fourth edi). Ann Arbor MI, USA: Prentice Hall.
- Volić, M., Pajić-Lijaković, I., Djordjević, V., Knežević-Jugović, Z., Pećinar, I., Stevanović-Dajić, Z., ... Bugarski, B. (2018). Alginate/soy protein system for essential oil encapsulation with intestinal delivery. *Carbohydrate Polymers*, 200(January), 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.033>
- Voo, W. P., Ooi, C. W., Islam, A., Tey, B. T., & Chan, E. S. (2016). Calcium alginate hydrogel beads with high stiffness and extended dissolution behaviour. *European Polymer Journal*, 75, 343–353. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.12.029>

Zhou, Y., Kajiyama, S., Masuhara, H., Hosokawa, Y., Takahiro, K., & Fukui, K. (2009). A new size and shape controlling method for producing calcium alginate beads with immobilized proteins. *Journal of Biomedical Science and Engineering*, 02(07), 499–505. <https://doi.org/10.4236/jbise.2009.25043>