

Diseño y Simulación de un Sistema de Extrusión por Chorro de Aire para la Fabricación de
Micropartículas de Alginato de Calcio

Adriana Carolina Rojas Hernandez y Andrés Felipe Useda Suárez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Viviana Raquel Güiza Argüello

PhD en Ingeniería Química

Codirector

Carlos Jovany Ulloa Suárez

Maestría en Ingeniería Química (Integración de Procesos)

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Programa Académico

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mis padres, Edilma Hernández y Freddy Rojas, y a mi nona, Sofía Sánchez, por acompañarme en cada decisión con su apoyo incondicional y por enseñarme, con su ejemplo, los valores que han guiado mi camino.

A mi pareja, Nicolás Correa, por ser mi apoyo emocional constante e inspirarme a superarme académicamente.

A la profesora Viviana, por su orientación emocional y por confiar en mis capacidades. De igual forma a cada profesor de la escuela, en especial a la profesora Ana María, y a los profesores Mauricio Rincón y Pedro Delvasto, por su dedicación y enseñanzas.

A los amigos y compañeros de carrera (Alejandro, Natalia, Julián, Mafe y Useda), quienes hicieron de cada día en la universidad una experiencia feliz. En especial, a mi compañero de proyecto, Andrés Useda.

Adriana Carolina Rojas Hernandez

Dedicatoria

A mis padres, Carmen Ruth Suárez y Samuel Useda, por su apoyo incondicional durante todo mi proceso formativo. A mi hermano Cristian Useda, por sus palabras de aliento en los momentos más complejos de las simulaciones.

A mis amigos, Isnardo y Luis, quienes, con sus palabras de aliento en los momentos de frustración, su capacidad para distraerme cuando lo necesitaba y su genuino interés en este trabajo, incluso cuando no entendían los detalles técnicos, fueron un regalo invaluable durante este recorrido.

A mis amigos y compañeros de carrera, cuyo apoyo académico y humano fue fundamental. En especial, Adriana Rojas, por hacer del aprendizaje una experiencia colectiva.

Andrés Felipe Useda Suárez

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por ofrecer los recursos necesarios para realizar este proyecto.

Agradecemos enormemente el apoyo y la confianza que nos brindó la profesora y directora de tesis Viviana Raquel Guiza Arguello y a nuestro codirector Carlos Jovany Ulloa Suárez por su orientación y disposición a enseñarnos más allá de lo necesario para el proyecto.

Gracias al técnico Carlos Eduardo Camargo Bedoya por contribuir al proyecto al facilitar el uso de los equipos de cómputo de la universidad y por ayudarnos a mejorar el rendimiento de nuestros portátiles personales.

Finalmente queremos agradecer a cada profesor de nuestra amada Escuela de ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales por el cariño y las enseñanzas que nos convirtieron en los profesionales y personas que somos hoy en día.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Estado del arte y Marco teórico	17
2.1 Hidrogeles	17
2.2 Microfluídica.....	18
2.3 Extrusión por aire.....	19
2.4 Parámetros principales y su influencia	20
2.5 Patrones de flujo	21
2.6 Simulación de dispositivos microfluídicos	22
2.7 Ecuaciones gobernantes	23
2.8 Modelo VOF	24
2.8.1 Fundamento matemático.....	24
3. Metodología	26
3.1 Revisión del estado del arte	26
3.1.1 Recopilación de la literatura y determinación de variables principales.....	26
3.1.2 Selección de modelos.....	26
3.2 Replicación de modelos seleccionados.....	26
3.2.1 Diseño en ANSYS Student de las boquillas de los modelos seleccionados	27
3.2.2 Mallado	27

3.2.3 Configuración de ANSYS Fluent	28
3.2.4 Selección de modelos por comparación con la bibliografía	28
3.2.5 Corroboración de funcionamiento con aire como fase continua	28
3.3 Determinación del efecto de las variables principales	29
3.3.1 Propuesta de diseño de una boquilla	29
3.3.2 Determinación de valores para la evaluación de las variables principales	29
3.3.3 Cálculo de la variación de los tamaños de gotas extruidas	29
4. Resultados	30
4.1 Viabilidad de las simulaciones.....	30
4.2 Características y consideraciones sobre el diseño de las boquillas de extrusión	31
4.3 Efecto de las principales variables de control microfluídico en el tamaño de las partículas..	32
4.3.1 Efecto de la viscosidad en la extrusión de gotas de alginato	32
4.3.2 Efecto de la velocidad de la fase continua en la extrusión de gotas de alginato.....	33
4.3.3 Efecto de la velocidad de la fase dispersa en la extrusión de gotas de alginato	34
5. Conclusiones	37
6. Recomendaciones	38
Referencias Bibliográficas	39

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Resultados de las simulaciones y comparativa con los resultados experimentales</i>	30
Tabla 2. <i>Rangos de formación de gotas</i>	36

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Configuraciones: a) T-junction, b) flow-focusing, c) co-flow</i>	19
Figura 2. <i>Patrones de flujo: a) chorro, b) goteo, c) formación de hilos, d) entubado, e) desplazamiento viscoso</i>	21
Figura 3. <i>Representación de: a) dominio, b) malla</i>	23
Figura 4. <i>Representación valores de fracción de volumen (VOF)</i>	25
Figura 5. <i>Representación del dominio de los: a) Modelo A, b) Modelo B, c) Modelo C, d) Modelo D</i>	27
Figura 6. <i>Propuesta de diseño 3D de una boquilla de extrusión por chorro de aire de micropartículas de alginato en Fusion 360</i>	31
Figura 7. <i>Tamaños de gotas obtenidos al simular diferentes viscosidades de fase dispersa para las boquillas de los modelos A+ y B</i>	32
Figura 8. <i>Tamaños de gota obtenidos a diferentes velocidades de la fase continua para las viscosidades en el modelo A+</i>	33
Figura 9. <i>Tamaños de gota obtenidos a diferentes velocidades de la fase dispersa para las viscosidades 0.022 y 0.089 kg/m s con el modelo A +</i>	34

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Matriz comparativa de los artículos seleccionados en la revisión bibliográfica

Apéndice B. Modelos seleccionados para replicar en ANSYS

Apéndice C. Propiedades de los fluidos y condiciones de frontera

Apéndice D. Condiciones de frontera y propiedades de los fluidos para evaluar el efecto de la viscosidad de la fase dispersa

Apéndice E. Condiciones de frontera y propiedades de los fluidos para evaluar el efecto de la velocidad de la fase continua

Apéndice F. Condiciones de frontera y propiedades de los fluidos para evaluar el efecto de la velocidad de la fase dispersa

Apéndice G. Resultados de las simulaciones con las condiciones reportadas en los artículos

Apéndice H. Planos del diseño 3D en Fusion 360

Apéndice I. Recopilación de los videos obtenidos a partir de las simulaciones

Glosario

Condiciones de frontera o contorno: parámetros definidos en los límites del dominio computacional que determinan el comportamiento del flujo

Dinámica de fluidos Computacional (CFD): método numérico para resolver ecuaciones de flujo (Navier-Stokes) que permite simular interacciones gas-líquido sin experimentación física

Diseño co-flow: configuración en la que las fases dispersa y continua fluyen en la misma dirección en microcanales coaxiales y paralelos

Diseño flow-focusing: configuración donde una fase central (dispersa) es comprimida lateralmente por dos fases continuas

Diseño T-junction: configuración microfluídica donde dos fases (continua y dispersa) convergen en ángulo recto (90°)

Dominio axis-simétrico: modelo 2D que representa la zona donde ocurre el fenómeno de interés 3D con simetría rotacional en un eje, reduciendo costos computacionales

Fase continua: flujo de gas o aire a presión que pasa por el canal externo de la boquilla y acelera la rotura de la gota por cizallamiento viscoelástico

Fase dispersa: flujo de solución de alginato que pasa por el canal interno de la boquilla

Flujo laminar: movimiento ordenado y uniforme de un fluido en capas paralelas, donde las partículas se mueven a lo largo de trayectorias predecibles y sin turbulencias

Microfluídica: utiliza canales integrados con dimensiones que oscilan entre decenas y centenares de micrómetros para controlar, manipular o procesar sistemáticamente pequeñas cantidades (10^{-9} - 10^{-18} L) de líquidos

Modelo VOF: técnica multifásica de seguimiento de superficies aplicada a una malla de cálculo euleriana fija, en la que interesan dos o más interfaces de fluidos inmiscibles

Monodispersidad: uniformidad en el tamaño de gotas o partículas (baja desviación estándar)

Tensión superficial: fuerza por unidad de longitud en la interfaz líquido-gas que resiste la deformación del chorro de aire

Viscosidad: la propiedad de los fluidos que describe su resistencia al flujo o a la deformación

Resumen

Título: Diseño y Simulación de un Sistema de Extrusión por Chorro de Aire para la Fabricación de Micropartículas de Alginato de Calcio*

Autor: Adriana Carolina Rojas Hernandez y Andrés Felipe Useda Suárez**

Palabras Clave: Alginato, Boquilla, Microfluídica, Micropartículas, Simulación

Descripción: Las microesferas de alginato de calcio monodispersas tienen múltiples aplicaciones en áreas como la medicina, la farmacología y el tratamiento de aguas, gracias a su capacidad para encapsular y/o liberar compuestos de forma controlada. En este contexto, la microfluídica se ha consolidado como una técnica eficiente para su fabricación. Sin embargo, los dispositivos comerciales suelen ser costosos y difíciles de adaptar. Por ello, este proyecto plantea el diseño y simulación de un sistema microfluídico de extrusión por chorro de aire en configuración coaxial, con el fin de obtener micropartículas monodispersas de alginato de calcio. Se inició con una revisión bibliográfica para identificar los parámetros principales y replicar cuatro modelos para determinar la viabilidad del uso del software de simulación ANSYS y se propuso un nuevo diseño (modelo A+) pensando en la facilidad de fabricación. Mediante simulaciones en ANSYS Fluent se analizaron los efectos de la viscosidad y las velocidades de las fases continua y dispersa sobre el tamaño de las gotas. Los resultados mostraron que el modelo propuesto permite generar partículas $<500 \mu\text{m}$ con coeficiente de variación menor al 5 %.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Viviana Raquel Güiza Argüelo. PhD en Ingeniería Química. Codirector: Carlos Jovany Ulloa Suárez. Maestría en Ingeniería Química (Integración de Procesos).

Abstract

Title: Design and Simulation of an Air-Jet Extrusion System for the Production of Calcium Alginate Microparticles*

Author(s): Adriana Carolina Rojas Hernandez and Andrés Felipe Useda Suárez**

Key Words: Alginate, Microfluidics, Microparticles, Nozzle, Simulation

Description: Monodisperse calcium alginate microspheres have multiple applications in fields such as medicine, pharmacology, and water treatment, due to their ability to encapsulate and/or release compounds in a controlled manner. In this context, microfluidics has become an efficient technique for their production. However, commercial devices are often expensive and difficult to adapt. Therefore, this project proposes the design and simulation of a coaxial air-jet microfluidic extrusion system to obtain monodisperse calcium alginate microparticles. The work began with a literature review to identify relevant parameters, followed by the replication of reported models and the proposal of a new design (model A+) optimized for ease of fabrication. Using ANSYS Fluent, simulations were performed to analyze the effects of viscosity and the velocities of the continuous and dispersed phases on droplet size. The results showed that the proposed model can generate particles $<500\ \mu\text{m}$ with a coefficient of variation below 5%.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Metallurgical Engineering Program. Director: Viviana Raquel Güiza Agüero. PhD in Chemical Engineering. Co-director: Carlos Jovany Ulloa Suárez. Master's in Chemical Engineering (Process Integration).

Introducción

Las micropartículas de alginato de calcio son esferas de hidrogel formadas por gelificación iónica del alginato (polisacárido de algas pardas) con iones Ca^{2+} , mediante el modelo "egg-box" (Grant et al., 1973; Lee & Mooney, 2012). Estas partículas destacan en aplicaciones biomédicas por su biocompatibilidad, baja toxicidad (baja probabilidad de generar reacciones alérgicas) y capacidad para encapsular y liberar controladamente bioactivos como fármacos y células (Oh et al., 2008; Lee & Mooney, 2012). También tienen usos en alimentos, cosméticos y biotecnología (Liu & García, 2016).

Entre los diversos métodos para producir micropartículas, la técnica microfluídica de extrusión por chorro de aire se destaca debido a su simplicidad operativa, capacidad de ajuste de parámetros (como caudal de aire y concentración de alginato) y potencial para generar partículas monodispersas (Ye et al., 2017; Ahmadi et al., 2024; Gan et al., 2024). Esta técnica emplea configuraciones como T-junction, flow-focusing y co-flow. La configuración co-flow destaca por su diseño coaxial, que permite un control del cizallamiento entre las fases continua-dispersa, minimizando la dispersión en los tamaños obtenidos (Moreira et al., 2021; Lian et al., 2019).

Las boquillas tradicionalmente se fabrican con materiales como vidrio o PDMS, pero, gracias al desarrollo tecnológico es posible, previamente, diseñar y simular mediante dinámica de fluidos computacional, por siglas en inglés CFD, para finalmente su fabricación mediante impresión 3D con alta precisión (Nguyen & Seo, 2022; Zhang et al., 2021; Zhao et al., 2018; Jammula & Sontti, 2024).

Este proyecto busca contribuir al desarrollo de sistemas microfluídicos para la producción de micropartículas de alginato de calcio mediante el diseño y simulación de un sistema de extrusión

por chorro de aire, utilizando ANSYS Student con el método CFD para evaluar el comportamiento del fluido bajo distintas configuraciones geométricas y condiciones operativas, con el objetivo de identificar los rangos de funcionamiento de los parámetros principales mediante simulación para una boquilla fabricable por impresión 3D, enfocándose en diámetros $<500 \mu\text{m}$. Este tamaño evita acumulación tóxica en mucosas (Sant et al., 2012) y es versátil para aplicaciones como liberación oral de fármacos (Wang et al., 2022) y adsorción de metales pesados en aguas (Doyo et al., 2023).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Aplicar herramientas de diseño asistido por computadora para modelar y evaluar los parámetros de una boquilla de chorro de aire para la fabricación de micropartículas de alginato de calcio.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar una revisión del estado del arte para identificar las principales condiciones de fabricación de micropartículas por el método de extrusión por chorro de aire.

Utilizar herramientas de diseño asistido por computadora para modelar una boquilla de chorro de aire para la fabricación de micropartículas de alginato de calcio.

Aplicar la herramienta de simulación Ansys Fluent para evaluar el efecto de las principales variables de diseño de la boquilla, en la morfología de las micropartículas de alginato de calcio resultantes.

2. Estado del arte y Marco teórico

2.1 Hidrogeles

Los hidrogeles son materiales poliméricos con capacidad de absorber grandes cantidades de agua o soluciones acuosas sin perder su forma. Algunos son biocompatibles y ofrecen liberación controlada de su contenido que los hacen deseables en aplicaciones como en la ingeniería de tejidos, implantes biomédicos, los sistemas de administración de fármacos (DDS) basados en polímeros, bionanotecnología (Oh et al., 2008) y en trasplante de células K. Y. Lee & Mooney (2012). Así mismo, se exploran otras aplicaciones como la tendencia creciente en el desarrollo de hidrogeles para integrarlos en organoides (modelos 3D de órganos o tejidos que imitan la estructura y función de órganos) y órganos en un chip (OOC) con el fin de construir tejidos tridimensionales como expone H. Liu et al. (2019).

Dentro de los hidrogeles, se destaca los de alginato de sodio, que es un polímero aniónico natural que suele obtenerse de algas pardas, el cual ha sido ampliamente investigado y utilizado por tener características como coste relativamente bajo, baja toxicidad y biocompatibilidad (K. Y. Lee & Mooney, 2012). El uso de alginato para el tratamiento de aguas residuales industriales se ha logrado al cambiar su estructura molecular añadiéndole urea y buiret formando un compuesto polimérico, lo cual mejoró la eficacia de adsorción de Cd(II), Cu(II) y Pb(II) en soluciones moderadamente ácidas entre un 53 y un 83% (Doyo et al., 2023) aunque manteniendo la mayor afinidad del alginato base por el Pb(II) que los otros dos cationes divalentes (Benettayeb et al., 2017).

Los hidrogeles pasan por procesos de gelificación con el fin de adquirir y mantener una forma definida. Según K. Y. Lee & Mooney (2012) existen diversos métodos de gelificación para

los hidrogeles de alginato, entre ellos la gelificación iónica, covalente y térmica. La gelificación iónica es el método más común, debido a que permite una gelificación suave, es decir, bajo condiciones fisiológicas y sin necesidad de calor o reactivos agresivos. Este proceso ocurre cuando la solución acuosa de alginato entra en contacto con agentes reticulantes iónicos (iones de carga opuesta), como cationes trivalentes (Al^{3+}) o divalentes (Ca^{2+}), que se intercambian con los iones de sodio del alginato. Este intercambio permite la formación de puentes entre los bloques de guluronato de cadenas poliméricas adyacentes, generando una red tridimensional conocida como modelo de “caja de huevos” (egg-box), que da lugar a la estructura de gel (Grant et al., 1973).

2.2 Microfluídica

Para el uso de estos materiales como vehículos para la administración de materiales bioactivos (fármacos, proteínas o células) se requiere la microencapsulación que, según A. L. Liu & García, 2016, se puede obtener por varios métodos como procesos litográficos, polimerización microfluídica, por precipitación o por emulsión. Entre estos destaca la microfluídica, que es una ciencia y tecnología que maneja a escala micrométrica fluidos mediante canales, permitiendo un control preciso sobre el modelo de flujo multifásico y la producción continua de alto rendimiento de micropartículas (Ebrahimiverkiani et al., 2025).

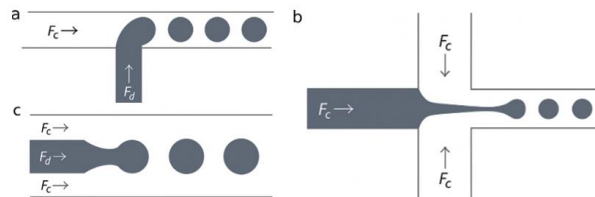
Según Moreira et al. (2021), las técnicas de microfluídica para la generación de gotas incluyen dielectroforesis (DEP), electrowetting sobre dieléctrico (EWOD), manipulación electrohidrodinámica, manipulación termocapilar, actuación magnética, actuación acústica y manipulación hidrodinámica. Esta última es la más utilizada, debido a la simplicidad del proceso y a su capacidad para aprovechar las fuerzas de cizallamiento e interfaciales.

La generación de gotas por hidrodinámica puede implementarse en distintas configuraciones, como T-junction, co-flow y flow-focusing, las cuales se ilustran en la Figura 1.

No obstante, las configuraciones T-junction y flow-focusing generan un mayor cizallamiento, lo que da lugar a gotas menos monodispersas en comparación con la configuración co-flow. En los dispositivos microfluídicos de tipo co-flow, la fase dispersa (F_d), que corresponde a la solución destinada a formar la gota, se bombea a través de un capilar interno, mientras que la fase continua (F_c), típicamente compuesta por aire, nitrógeno o aceites, ejerce el efecto de cizallamiento necesario para la formación de gotas.

Figura 1

Configuraciones: a) T-junction, b) flow-focusing, c) co-flow



Nota: tomado y adaptado de Moreira, A., Carneiro, J., Campos, J. B. L. M., & Miranda, J. M. (2021). Production of hydrogel microparticles in microfluidic devices: a review. *Microfluidics and Nanofluidics*, 25, 1-24.

2.3 Extrusión por aire

Según Qin et al. (2024), se produjeron microgeles cargados de células con técnicas microfluídicas de gotas basadas en sistemas multifásicos de agua en aceite (W/O). Sin embargo, el sistema microfluídico de agua en aceite utilizado habitualmente para producir microesferas de alginato presenta varios inconvenientes debido a que requiere de procedimientos adicionales complejos para eliminar el aceite y los tensioactivos. Adicionalmente, es necesario modificar los métodos de reticulación de hidrogeles de alginato para evitar la obstrucción del dispositivo, con lo cual se limitan los índices de producción y sus aplicaciones con materiales biológicos y sustancias

sensibles, por lo cual, el uso de sistemas de agua en aire (W/A) presenta una alternativa convincente debido a que supera las dos limitaciones importantes del sistema W/O, garantizando la producción más sencilla de microesferas más limpias (Ahmadi et al., 2024).

2.4 Parámetros principales y su influencia

Según Ye et al. (2017) los principales parámetros que afectan el sistema microfluídico de cizallamiento por gas son: la distancia entre la boquilla del sistema y el baño colector, la velocidad de flujo o presión de la fase continua, la velocidad de flujo de la fase dispersa (fase que formará las micropartículas), el diámetro de salida de la boquilla y la composición de la solución de alginato. Autores como Y. Liu et al., 2024 y A. L. Liu y García, 2016., han llegado a conclusiones similares.

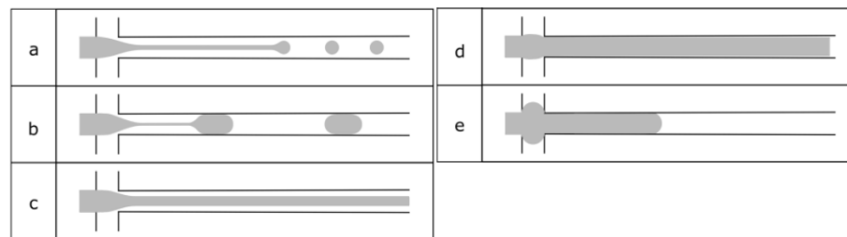
Qin et al. (2024) evaluaron el efecto de la distancia (S) entre la salida de las gotas y el baño colector y determinaron que, debido a la tendencia a mantener la energía superficial más baja, la gota recupera rápidamente una forma esférica en el aire. Sin embargo, si el valor de S es demasiado pequeño, la gota puede reticularse antes de formar una esfera. Gan et al. (2024) evaluaron el efecto de la velocidad de la fase continua y la fase dispersa. En el caso de la fase continua, determinaron que el tamaño de la micropartícula de alginato disminuye con el aumento del caudal de nitrógeno. Por el contrario, el tamaño no varía significativamente al aumentar la velocidad de flujo de la fase dispersa. Finalmente, Ye et al. (2017) evaluaron el efecto de la concentración de alginato y encontraron que una mayor concentración de solución de alginato de sodio puede producir partículas de hidrogel más resistentes y elásticas, sin embargo, al aumentar la concentración, aumenta la viscosidad y tensión superficial, produciendo diámetros más grandes de gota.

2.5 Patrones de flujo

Los comportamientos previamente expuestos se dan en rangos específicos para cada parámetro, debido a que, en la formación de gota se pueden presentar cambios en el patrón o régimen de flujo que están condicionados por los números capilares, de Reynolds para cada fase, relación de viscosidad y ángulo de contacto. Los patrones comúnmente observados, según Moreira et al. (2021) son: chorro, goteo, formación de hilos, entubado y desplazamiento viscoso como se ilustran en la Figura 2.

Figura 2

Patrones de flujo: a) chorro, b) goteo, c) formación de hilos, d) entubado, e) desplazamiento viscoso



Nota: tomado de Moreira, A., Carneiro, J., Campos, J. B. L. M., & Miranda, J. M. (2021). Production of hydrogel microparticles in microfluidic devices: a review. *Microfluidics and Nanofluidics*, 25, 1-24.

Ahmadi et al. (2024), determinaron la tendencia de los patrones de flujo en relación con los diámetros de las boquillas y los caudales de la fase dispersa, encontraron que los diámetros de boquilla más pequeños y los caudales de líquido más bajos faciliten el modo de goteo y se debe al predominio de las fuerzas de tensión superficial sobre las fuerzas inerciales y gravitatorias. Por el contrario, con diámetros de boquilla mayores y caudales de líquido más elevados, la influencia de la tensión superficial disminuye en relación con las fuerzas inerciales, lo que conduce a un cambio

hacia los modos de chorro o multisatélite, en los que las gotas producidas no se consideran monodispersas.

2.6 Simulación de dispositivos microfluídicos

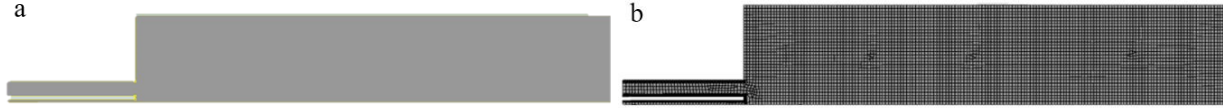
Debido a los avances tecnológicos como la impresión 3D, es posible la fabricación de sistemas microfluídicos de bajo costo, en comparación con los comerciales, como realizaron Ye et al. (2017), Nguyen & Seo (2022), Lee et al. (2021), Zheng et al. (2025), Zhang et al. (2021) y Zhao et al. (2018). Sin embargo, como primer paso se utilizan software de simulación como lo es ANSYS, utilizando el método CFD. La dinámica de fluidos computacional (CFD) es la ciencia que utiliza ordenadores para analizar, comprender y predecir el comportamiento de fluidos (líquidos y gases) basándose en las ecuaciones de conservación de la masa, el momento y la energía (ANSYS, 2024).

Según ANSYS (2024) hay enfoques diferentes para resolver el flujo de fluidos en un ordenador, sin embargo, de manera general, en primer lugar, se identifica el dominio del flujo de los fluidos (zona del modelo físico que se simula), que suele representarse mediante un modelo CAD. Posteriormente se aplica una malla que es la división del dominio en pequeñas celdas o volúmenes finitos.

Según Castillo-León y Svendsen (2014), con el objetivo de reducir los cálculos y tiempos computacionales, con un tamaño de malla adecuado que mejore la precisión de las simulaciones, se recomienda simplificar la geometría 3D a 2D aprovechando la simetría o invariabilidad en un eje. Adicionalmente, dado que solo una pequeña parte del sistema microfluídico es la parte “activa”, es posible limitar el dominio a la región cercana de la boquilla de salida como se observa en la Figura 3. Como paso final, el software resuelve la versión discretizada de las ecuaciones de fluido dentro de cada celda (simulación por elementos finitos (FEA)).

Figura 3

Representación de: a) dominio, b) malla



Nota: autoría propia

Recientemente, Jammula & Sontti (2024), utilizaron un método computacional de conjunto de niveles y volumen de fluido acoplados (CLSVOF) para estudiar la generación de microgotas en un dispositivo microfluídico de co-flow circular bidimensional en el cuál desarrollan mapas de régimen de flujo y relaciones de escalado en una serie de condiciones de funcionamiento a partir de los datos de simulación. Aunque no utilizan las mismas técnicas de producción de microgotas, Hosseini et al., 2020 legitiman el uso de las simulaciones como estudio preliminar al usar CFD a través del software comercial Ansys Fluent de la deformación de una gota que cae utilizando el método volumen del fluido, por sus siglas en inglés VOF.

2.7 Ecuaciones gobernantes

Las ecuaciones de Navier-Stokes se consideran las principales ecuaciones gobernantes para modelizar el comportamiento de los fluidos y se describen en las siguientes líneas:

Conservación de la masa: Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad, t es el tiempo, \mathbf{u} el vector velocidad y ∇ el operador gradiente.

Conservación del momento: Segunda ley de Newton

Para un fluido incompresible con viscosidad constante, podemos escribirla como:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\partial p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}_b \quad (2)$$

Donde p es la presión estática, ν es la viscosidad y f_b son las fuerzas del cuerpo.

Conservación de la energía: Primera Ley de la Termodinámica

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\tau}) + S_E \quad (3)$$

Donde \mathbf{h}_{tot} es la entalpía total, λ es la conductividad, T la temperatura y S_E son las fuentes externas de energía. El termino $\nabla \cdot (\mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\tau})$ es el término de trabajo viscoso.

2.8 Modelo VOF

Dado que las ecuaciones de Navier-Stokes no pueden resolverse analíticamente en la mayoría de los casos prácticos, se utilizan métodos numéricos como el de volúmenes finitos para aproximar su solución en un dominio discretizado.

Según la información presente en ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation, el modelo Volume of Fluid (VOF) puede modelizar dos o más fluidos inmiscibles mediante la resolución de un único conjunto de ecuaciones de momento y el seguimiento de la fracción volumétrica de cada uno de los fluidos en todo el dominio, integrando variables (tensión superficial, propiedades reológicas y condiciones de flujo) en un marco computacional robusto. Cuando estos parámetros se definen con precisión (mediante datos experimentales o modelos termodinámicos), las simulaciones pueden replicar la realidad con márgenes de error mínimos (Ye et al., 2017; ANSYS, 2024).

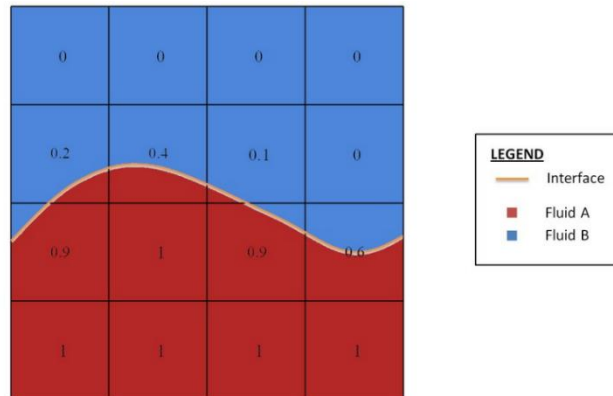
2.8.1 Fundamento matemático

Las variables y propiedades en cualquier celda dada son puramente representativas de una de las fases, o representativas de una mezcla de las fases, dependiendo de los valores de la fracción de volumen como se observa en la Figura 4. En otras palabras, si la fracción de volumen del fluido q (ejemplo: el alginato) en la celda se denota como α_q , entonces son posibles las tres condiciones siguientes: $\alpha_q = 0$, la celda está vacía (del fluido q); $\alpha_q = 1$, La celda está llena (del fluido q) o

$0 < \alpha_q < 1$, la celda contiene la interfase entre el fluido q y otro u otros fluidos. En cada volumen de control, las fracciones de volumen de todas las fases suman la unidad.

Figura 4

Representación valores de fracción de volumen (VOF)



Nota: tomado de Haider, J. (2013). Numerical Modelling of Evaporation and Condensation Phenomena. <https://www.researchgate.net/publication/259898900>

El seguimiento de la(s) interfaz(es) entre las fases se realiza mediante la solución de una ecuación de continuidad para la fracción de volumen de una (o más) de las fases. La ecuación de continuidad para la fase q tiene la siguiente forma:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] \quad (4)$$

Donde \dot{m}_{qp} es la transferencia de masa de la fase q a la fase p y \dot{m}_{pq} es la transferencia de masa de la fase p a la fase q . Por defecto, el término fuente en el lado derecho de la Ecuación (4), S_{α_q} , es cero, pero se puede especificar una fuente de masa constante o definida por el usuario para cada fase. La fracción volumétrica de la fase primaria se calculará solo si se cumple: $\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$.

3. Metodología

Para cumplir con el propósito del presente trabajo se realizó las siguientes actividades.

3.1 Revisión del estado del arte

3.1.1 Recopilación de la literatura y determinación de variables principales

Se llevó a cabo una revisión del estado del arte con el objetivo de identificar, analizar y comparar diseños de sistemas de extrusión para formación de microesferas de alginato. Se estableció como criterio de selección que los artículos proporcionaran información técnica como dimensiones geométricas, caudal, propiedades reológicas de los fluidos y tamaños de partículas obtenidas con el fin de garantizar la reproducibilidad mediante simulación.

A partir de las fuentes consultadas, se determinaron datos relevantes y se desarrolló un matriz de datos en Excel (ver Apéndice A) que permitió la comparación de cada parámetro y se estableció la viscosidad de la fase dispersa, velocidad de la fase continua y velocidad de la fase dispersa como las variables principales debido a que corresponden a los elementos fundamentales que intervienen en la dinámica de extrusión (Bariki & Movahedirad, 2022).

3.1.2 Selección de modelos

La selección de los cuatro modelos (ver Apéndice B), se realizó considerando: configuración co-flow, fase continua gaseosa, sencillez geométrica y las condiciones de operación reportadas.

3.2 Replicación de modelos seleccionados

Para determinar la viabilidad de la simulación de sistemas de extrusión para la formación de microgotas mediante el método de dinámica de fluidos computacional (CFD) se llevó a cabo la

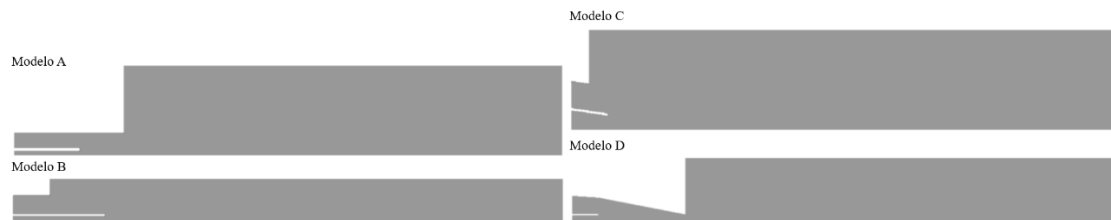
replicación de cuatro modelos previamente seleccionados en ANSYS Student como se expone a continuación.

3.2.1 Diseño en ANSYS Student de las boquillas de los modelos seleccionados

Con el fin de mejorar el rendimiento computacional y teniendo en cuenta las limitaciones de la versión de estudiante, las simulaciones se realizaron a las boquillas de los sistemas de extrusión, implementando modelos, del dominio como se ilustra en la Figura 5, bidimensionales axis-simétricos en ANSYS Student.

Figura 5

Representación del dominio de los: a) Modelo A, b) Modelo B, c) Modelo C, d) Modelo D



Nota: autoría propia

3.2.2 Mallado

Para lograr una representación precisa del proceso de formación de gotas, se definió una malla con tamaños de celda comprendidos entre 25 y 75 μm , ajustados en función de la escala geométrica de cada modelo. Se aplicó un refinamiento de nivel 5 en las superficies de la boquilla, que es una subdivisión local de las celdas para aumentar la resolución numérica en zonas críticas de interacción pared-fluido. Además, se establecieron las fronteras del dominio como entradas, salidas y paredes.

3.2.3 Configuración de ANSYS Fluent

Las simulaciones se realizaron con el modelo VOF, donde se definió estado transitorio, flujo laminar, propiedades de los fluidos y condiciones de frontera (ver Apéndice C). Se descartó comportamiento turbulento porque las fuerzas viscosas dentro de microcanales favorecen el flujo laminar (Castillo-León y Svendsen, 2014). La fase continua para los modelos A y B es el nitrógeno y para los modelos C y D es el aire como se expone en cada documento referenciado.

3.2.4 Selección de modelos por comparación con la bibliografía

Con la finalidad de seleccionar dos modelos para el estudio de los efectos de las variables principales, se realizó la comparación de los tamaños de gotas obtenidas en ANSYS bajo las condiciones originales de cada modelo con los reportados en cada artículo con la siguiente ecuación donde x es el valor de individual, \bar{x} es el promedio de la muestra y n es el tamaño de la muestra.

$$\text{Desviación} = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (5)$$

Para garantizar la producción de gotas monodispersas, considerando $CV < 5\%$ como tamaños monodispersos (He et al., 2024), se calculó el coeficiente de variación (CV) con la siguiente ecuación.

$$CV = \frac{(\text{Desviación} * 100)}{\bar{x}} \quad (6)$$

3.2.5 Corroboración de funcionamiento con aire como fase continua

Para determinar la viabilidad de producir microgotas de alginato extruidas con aire, alineado con el objetivo planteado, se simuló nuevamente las condiciones de los modelos A y B cambiando la fase continua de nitrógeno a aire.

3.3 Determinación del efecto de las variables principales

3.3.1 Propuesta de diseño de una boquilla

A partir de los modelos seleccionados (A y B), se realizó el diseño 3D en Autodesk Fusion y en ANSYS de una propuesta de boquilla (A+) considerando la facilidad de construcción y montaje a futuro.

3.3.2 Determinación de valores para la evaluación de las variables principales

Se delimitó los valores para evaluar el efecto de las variables principales a partir de la bibliografía consultada. El desarrollo del estudio se estructuró en tres barridos secuenciales, las condiciones de simulación de cada barrido fueron definidas a partir de los resultados obtenidos en el barrido anterior conforme a los siguientes criterios: obtención de gotas y que el diámetro no superara los 500 μm .

En el primer barrido se evaluó el efecto de la viscosidad de la fase dispersa, para esto se definieron valores comprendidos entre 0.0075 y 0.2 kg/ms (ver Apéndice D). En el segundo barrido se evaluó el efecto de la velocidad de la fase continua para valores comprendidos entre 10.2 y 28 m/s (ver Apéndice E). En el tercer barrido se evaluó el efecto de la velocidad de la fase dispersa, para esto se definieron valores comprendidos entre 0.00723 y 0.308 m/s (ver Apéndice F).

3.3.3 Cálculo de la variación de los tamaños de gotas extruidas

Se calculó la desviación y el CV de los tamaños de gotas obtenidas en ANSYS FLUENT con las fórmulas previamente expuestas.

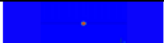
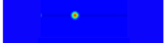
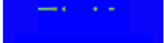
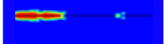
4. Resultados

4.1 Viabilidad de las simulaciones

Los datos obtenidos a partir de la réplica de las condiciones experimentales de los cuatro modelos de boquillas se observan en la Tabla 1, donde T_r es el tamaño promedio de las gotas de alginato obtenidas experimentalmente y T_s es el tamaño promedio de las gotas obtenidas mediante simulación. Para detallar mejor cada una de las simulaciones se muestran en el Apéndice G.

Tabla 1

Resultados de las simulaciones y comparativa con los resultados experimentales

Modelo		Comparativa				
Referencia		T_r [mm]	T_s [mm]	Desviación	CV	
A	(Wang & Hu)		~ 0.137	0.139	0.001	3.07%
B	(Qin et al.)		~ 0.658	0.667	0.006	4.05%
C	(Lee et al.)		0.9 - 2.8	-	-	-
D	(Marra et al.)		~ 0.3	-	-	-

Nota: Las imágenes obtenidas son del presente estudio. La desviación y el CV no se calculó para los modelos C y D porque no se obtuvieron gotas.

La ausencia de formación de gotas en las simulaciones correspondientes a los modelos C y D se atribuyen a la incertidumbre de condiciones como medidas o diagramas esquemáticos representativos que permitan la aproximación de datos no reportados o propiedades reológicas de las soluciones de alginato utilizadas. En adición, aunque los modelos fueron seleccionados por tener geometrías poco complejas, los modelos C y D presentan conicidad (ver Figura 5), una característica geométrica que adiciona dificultad, debido a que es necesario tener conocimiento del

perfil de presión siendo lo más complejo de obtener (Marra et al., 2017). Por lo tanto, estos modelos se consideran no aptos para su estudio.

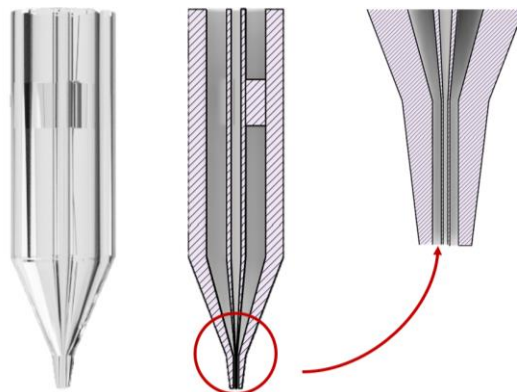
Por el contrario, los modelos A y B demostraron tener concordancia entre los resultados experimentales y de las simulaciones, con desviaciones estándar de 3.07% y 4.05%, respectivamente y cumpliendo con el criterio de obtener partículas monodispersas. En consecuencia, estos dos diseños fueron seleccionados para proponer un diseño de boquilla y evaluar los efectos de las variables principales.

4.2 Características y consideraciones sobre el diseño de las boquillas de extrusión

A partir de ambos modelos (A y B) se propone el modelo A+, que se observa en la Figura 6 (ver más detalles en el Apéndice G), como modificación al modelo A pensando en su facilidad de fabricación colocando a tope el puerto de la fase dispersa con el puerto de la fase continua. Considerando que el modelo B ya cumplía con esta característica, se optó por mantenerlo y realizar el estudio de las variables principales en ambos modelos.

Figura 6

Propuesta de diseño 3D de una boquilla de extrusión por chorro de aire de micropartículas de alginato en Fusion 360



Nota: autoría propia















4.3 Efecto de las principales variables de control microfluídico en el tamaño de las partículas

4.3.1 Efecto de la viscosidad en la extrusión de gotas de alginato

Los datos de las simulaciones realizadas con el modelo A+ (fondo morado) y modelo B (fondo azul) para determinar el efecto de la viscosidad se observan en la Figura 7.

Figura 7

Tamaños de gotas obtenidos al simular diferentes viscosidades de fase dispersa para las boquillas de los modelos A+ y B

	Tamaño de partícula [mm]						
Viscosidad (kg/ m s)	0.0075	0.022	0.048	0.0557	0.0893	0.142	0.2
Modelo A+	 0.212	 0.264	 0.378	 0.341	 0.473	 0.393	 0.343
Modelo B	 2.029	 1.843	 1.397	 1.780	 1.849	 1.916	 1.916

Nota: Exceptuando el modelo B con viscosidad 0.0075, en todos los casos la desviación no fue mayor a 0.008 y con un CV < 3%.

Al simular la extrusión de diferentes soluciones de alginato con el modelo B se obtuvieron tamaños de partículas mayores a 1 mm, lo que supera el rango de tamaños establecido como objetivo del proyecto, por lo cual, el análisis de las variables principales en el proceso de extrusión de gotas de alginato por chorro de aire se continuó únicamente con el modelo A+.

Al incrementar la viscosidad de la fase dispersa en el modelo A+, el tamaño de las gotas aumenta progresivamente hasta alcanzar un máximo de 0.473 mm, lo cual es consistente con los hallazgos reportados por Ye et al. (2017) y D. Lee et al. (2021), posteriormente presenta una reducción. Este comportamiento se atribuye al cambio de régimen de formación de gotas.

En condiciones de baja viscosidad, la tensión superficial es dominante favoreciendo la formación de la gota antes del desprendimiento. A medida que la viscosidad aumenta, el fluido

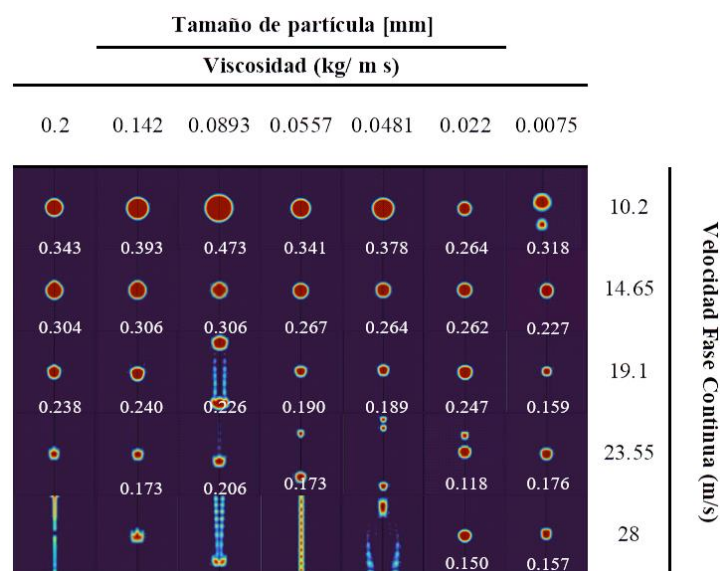
ofrece mayor resistencia a la deformación, lo cual inicialmente posibilita la formación de gotas más grandes. Sin embargo, a viscosidades aún más elevadas, la fuerza de cizallamiento predomina, haciendo que la tensión superficial y el caudal no dispongan del tiempo suficiente para actuar antes de que el flujo de aire provoque el desprendimiento, lo que conduce nuevamente a la formación de gotas más pequeñas. Este fenómeno ha sido identificado en estudios previos como una transición entre regímenes de goteo y de jetting (chorro), inducida por la competencia entre fuerzas viscosas y de tensión interfacial (Bariki & Movahedirad, 2022).

4.3.2 Efecto de la velocidad de la fase continua en la extrusión de gotas de alginato

Los datos de las simulaciones realizadas en el modelo A+ para determinar el efecto de la velocidad de la fase continua se observan en la Figura 8.

Figura 8

Tamaños de gota obtenidos a diferentes velocidades de la fase continua para las viscosidades en el modelo A+



Nota: se excluyó del análisis las velocidades de 19.1 m/s, 23.55 m/s y 28 m/s; también la velocidad de 10.2 m/s y viscosidad 0.0075 kg/m s porque CV > 5%.

Se encontró que, para todas las viscosidades, al aumentar la velocidad de la fase continua, el diámetro de las gotas disminuye este resultado es coherente con la tendencia reportada por Ye et al. (2017) y Ahmadi et al. (2024). Según Qin et al. (2024), esto se debe a que el aumento de la tasa de gas provoca mayores fuerzas de cizallamiento, lo que facilita la generación de gotas más pequeñas al superar antes la tensión superficial. Así mismo, se observó que para concentraciones de alginato superiores al 3% en peso y un rango de velocidad de aire entre 19.1 y 23.55 m/s empieza a manifestarse lo que Wang & Hu (2021) denotan como la atomización de la solución de alginato, la cual puede ser detectada observando las gotas de alginato en forma de spray o chorro.

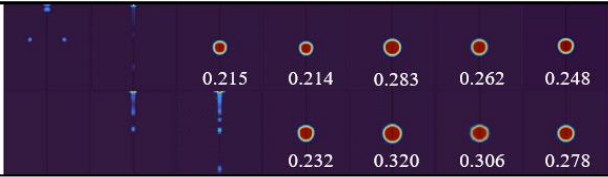
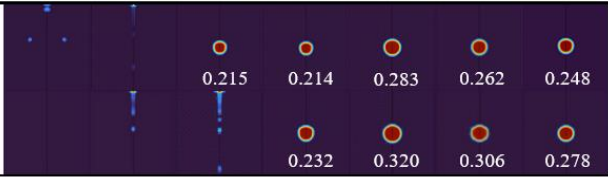
Adicionalmente, se observó que los diámetros de partículas son homogéneos para las diferentes viscosidades extruidas con la velocidad de fase continua de 14.65 m/s. En concordancia con lo anterior, se estableció estudiar el efecto de la velocidad de la fase dispersa con velocidad fija de fase continua de 14.65 m/s para las soluciones con concentraciones de 2% y 4%.

4.3.3 Efecto de la velocidad de la fase dispersa en la extrusión de gotas de alginato

Los datos de las simulaciones realizadas con el modelo A+ para determinar el efecto de la velocidad de la fase dispersa se pueden observar en la Figura 9.

Figura 9

Tamaños de gota obtenidos a diferentes velocidades de la fase dispersa para las viscosidades 0.022 y 0.089 kg/m s con el modelo A +

		Tamaño de partícula [mm]						
Velocidad Fase Dispersa (m/s)		0.0072	0.026	0.083	0.139	0.196	0.252	0.308
0.022 kg/ m s				0.215	0.214	0.283	0.262	0.248
0.089 kg/ m s					0.232	0.320	0.306	0.278

Nota: se excluyó del análisis la viscosidad de 0.022 kg/ m s y velocidades de 0.252 m/s y 0.308 m/s porque $CV > 8\%$.

Como se puede observar en la Figura 9, se encontró que, para las velocidades de 0.0072 m/s y 0.026 m/s la solución de 2% de alginato se extruye en forma de spray o chorro debido a que la tensión superficial no tiene el tiempo para formar la gota antes del desprendimiento; de igual forma ocurre para las velocidades de 0.026 m/s y 0.083 m/s y concentración de 4%. En el caso de la concentración de 4% de alginato y velocidad de 0.0072 m/s no se produce gota debido a que el aire puede generar una presión de retroceso que impide la salida de la solución por la boquilla.

Para el análisis general de los resultados se tiene que el aumento inicial y posterior disminución en el tamaño de las gotas con respecto a la velocidad de la fase dispersa se debe a un cambio en el régimen de formación coherente con lo reportado por Bariki & Movahedirad, 2022. A bajas velocidades, el fluido tiene tiempo para acumularse y formar gotas más grandes. Sin embargo, a mayores velocidades, las fuerzas de cizallamiento e inercia superan la acción de la tensión superficial, provocando un desprendimiento más rápido y gotas más pequeñas como también expone Ye et al. (2017).

Es por esto que, a medida que aumenta la velocidad de la fase dispersa a partir de 0.196 m/s, el diámetro de la gota disminuye de 0.283 mm a 0.248 mm y de 0.320 a 0.278 mm para las concentraciones de alginato de 2% y 4%, respectivamente. Los resultados son coherentes con los hallazgos de Qin et al. (2024), Gan et al. (2024) y Ahmadi et al. (2024), donde se reporta que, aunque el caudal de la fase dispersa también afecta al tamaño de las microesferas, su impacto es relativamente menor en comparación con los otros dos parámetros.

La recopilación de los datos obtenidos y analizados previamente se resume en la Tabla 2. A partir del estudio realizado se determina que los rangos operativos para el modelo A+ son:

viscosidad entre 0.022 y 0.089 kg/ms; velocidad de fase continua entre 10.2 y 14.65 m/s; y velocidad de fase dispersa entre 0.139 y 0.196 m/s, en esta última el rango se puede ampliar hasta 0.308 m/s para una viscosidad de 0.0893 kg/ms.

Tabla 2

Rangos de formación de gotas

Recopilación de rangos que forman gotas monodispersas para el modelo A+		
	Rango	Excepción
Viscosidad (Kg/ m s)	0.022 - 0.2	Ninguna
Velocidad Fase Continua (m/s)	10.2 - 14.65	Viscosidad de 0.0075 kg/m s con 10.2 m/s
Velocidad Fase Dispersa (m/s)	0.139 - 0.308	Viscosidad de 0.022 kg/m s con 0.252 y 0.308 m/s

Para visualizar los videos obtenidos de las simulaciones dirigirse al Apéndice I.

5. Conclusiones

La revisión bibliográfica permitió establecer como variables principales en la extrusión de micropartículas por chorro de aire aquellas que conforman el sistema y permiten que funcione. Las cuales son el caudal de las fases (continua y dispersa) y la concentración de alginato en la fase dispersa.

Aunque la geometría no se consideró una variable, se evidenció que las boquillas cónicas (modelo C y D) presentan mayores retos para la correcta simulación al requerir perfiles de presión, mientras que los modelos cilíndricos (A y B) resultaron viables para su estudio al obtener diámetros de micropartículas de alginato con una desviación $<\pm 0.01$ mm de los reportados en las publicaciones y un coeficiente de variación $<5\%$.

Haciendo uso de ANSYS DesignModeler y Fusion360 se realizó una propuesta de diseño (modelo A+), el cual se estudió con ANSYS Fluent, demostrando que es posible obtener micropartículas monodispersas en los rangos de viscosidad entre 0.022 y 0.089 kg/ms; velocidad de fase continua entre 10.2 y 14.65 m/s; y velocidad de fase dispersa entre 0.139 y 0.196 m/s.

Si bien el proyecto estableció obtener micropartículas de 300-500 μm , los resultados mostraron la capacidad de obtener tamaños menores (~ 210 -320 μm) que pueden aprovecharse en aplicaciones como: sistemas de liberación pulmonar de fármacos (aglomerados de 100-300 μm) o vehículos para nutrientes sensibles en alimentos que requieren rápida disolución (Sant et al., 2012).

El proyecto contribuye al avance en investigación de aplicaciones de micropartículas de alginato de calcio al desarrollar un diseño de boquilla accesible, porque puede fabricarse mediante impresión 3D en contextos académicos o laboratorios; que junto con los rangos operacionales permite obtener micropartículas de alginato monodispersas. A largo plazo, impacta positivamente

a diversas áreas, como la farmacéutica, alimentaria o de tratamiento de aguas, donde estas partículas desempeñan un papel clave en procesos de encapsulación y/o liberación controlada de fármacos o contaminantes.

6. Recomendaciones

Como línea de trabajo futuro, se recomienda complementar el diseño propuesto de la boquilla integrando adecuadamente las conexiones a los dispositivos necesarios, como la bomba de jeringa y el sistema de alimentación de aire; y simular el sistema completo con los rangos operativos proporcionados en el presente trabajo.

Considerando que los sistemas microfluídicos son sensibles a pequeñas variaciones y que los resultados obtenidos por simulación pueden diferir de los reales al no replicar de forma rigurosa las condiciones reportadas, se recomienda emplear los datos obtenidos en este trabajo como base para el ajuste experimental.

En caso de optar por su fabricación mediante impresión 3D, se sugiere utilizar la técnica de estereolitografía (SLA), debido a que ofrece alta resolución y es adecuada para reproducir las dimensiones planteadas.

Aunque se culminó el estudio únicamente con el modelo A+, en caso de necesitar gotas de tamaño mayor a 500 μm se sugiere el uso del modelo B.

Referencias Bibliográficas

- Ahmadi, N., Kim, D. Y., Shin, S. S., Daradmare, S., Kim, J. M., & Park, B. J. (2024). Gas-Shearing Microfluidic Fabrication of Polydiacetylene–Alginate Colorimetric Sensor Beads. *Small Structures*. <https://doi.org/10.1002/ssstr.202400340>
- Ansys, Inc. (2024). ANSYS FLUENT Documentation (12.0/12.1) [Sistema de ayuda]. En Ansys Workbench (2025 R1) [Software]. Recuperado de [<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/index.htm>].
- Ansys, Inc. (2024). Ansys Fluent (2025 R1) [Software]. Disponible en el sitio web de Ansys.
- Autodesk. (2024). Fusion 360 [Software]. Disponible en el sitio web de Autodesk.
- Bariki, S. G., & Movahedirad, S. (2022). A flow map for core/shell microdroplet formation in the co-flow Microchannel using ternary phase-field numerical model. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26648-3>
- Benettayeb, A., Guibal, E., Morsli, A., & Kessas, R. (2017). Chemical modification of alginate for enhanced sorption of Cd(II), Cu(II) and Pb(II). *Chemical Engineering Journal*, 316, 704–714. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2017.01.131>
- Castillo-León, & Svendsen, J.-L. (2014). *Lab-on-a-Chip Devices and Micro-Total Analysis Systems A Practical Guide*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08687-3>
- Doyo, A. N., Kumar, R., & Barakat, M. A. (2023). Recent advances in cellulose, chitosan, and alginate based biopolymeric composites for adsorption of heavy metals from wastewater. In *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* (Vol. 151). Taiwan Institute of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105095>

- Ebrahimiverkiani, A., Naghib, S. M., Shafiei Sabet, G., Arghavani, P., Edrisi, M., & Rabiee, N. (2025). Recent advances in microfluidic technologies for stimuli-sensitive alginate particles: Applications in biosensing and drug delivery. In *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* (Vol. 184). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.118124>
- Gan, Z., Liu, H., Qin, X., Wang, K., Li, X., Xie, F., & Qin, J. (2024). Microfluidic-Assisted Pneumatic Droplet Generators Designed for Multiscenario Biomanufacturing with Favorable Biocompatibility and Extendibility. *ACS Biomaterials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1021/acsbmaterials.4c01135>
- Grant, G. T., Mon, E. R., David REES, S. A., Jci Smiti-i, P., & Thom, id. (1973). *Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: The egg-box model*. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(73\)80770-7](https://doi.org/10.1016/0014-5793(73)80770-7)
- Haider, J. (2013). Numerical Modelling of Evaporation and Condensation Phenomena. <https://www.researchgate.net/publication/259898900>
- Hosseini, M., Arasteh, H., Afrouzi, H. H., & Toghraie, D. (2020). Numerical simulation of a falling droplet surrounding by air under electric field using VOF method: A CFD study. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28(12), 2977–2984. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.07.048>
- Jammula, M., & Sontti, S. G. (2024). Numerical Analysis of Controlled Droplet Formation Surrounded by a Shear-Thinning Fluid in a Coflow Microfluidic Device. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c03141>
- Lee, D., Greer, S. E., Kuss, M. A., An, Y., & Dudley, A. T. (2021). 3D printed alginate bead generator for high-throughput cell culture. *Biomedical Microdevices*, 23(2). <https://doi.org/10.1007/s10544-021-00561-4>

- Lee, K. Y., & Mooney, D. J. (2012). Alginate: Properties and biomedical applications. In *Progress in Polymer Science (Oxford)* (Vol. 37, Issue 1, pp. 106–126). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003>
- Lian, J., Luo, X., Huang, X., Wang, Y., Xu, Z., & Ruan, X. (2019). Investigation of microfluidic co-flow effects on step emulsification: Interfacial tension and flow velocities. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 568, 381–390. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.02.040>
- Liu, A. L., & García, A. J. (2016). Methods for Generating Hydrogel Particles for Protein Delivery. In *Annals of Biomedical Engineering* (Vol. 44, Issue 6, pp. 1946–1958). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1637-z>
- Liu, H., Wang, Y., Cui, K., Guo, Y., Zhang, X., & Qin, J. (2019). Advances in Hydrogels in Organoids and Organs-on-a-Chip. *Advanced Materials*, 31(50). <https://doi.org/10.1002/adma.201902042>
- Liu, Y., Chen, Z., & Xu, J. (2024). Recent advances in the microfluidic generation of shape-controllable hydrogel microparticles and their applications. In *Green Chemical Engineering* (Vol. 5, Issue 1, pp. 16–30). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.02.002>
- Marra, F., De Vivo, A., & Sarghini, F. (2017). Virtualization of fluid-dynamics in micro-air assisted extruders for food microfluidic based encapsulation. *Journal of Food Engineering*, 213, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.030>
- Moreira, A., Carneiro, J., Campos, J. B. L. M., & Miranda, J. M. (2021). Production of hydrogel microparticles in microfluidic devices: a review. In *Microfluidics and Nanofluidics* (Vol.

- 25, Issue 2). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
<https://doi.org/10.1007/s10404-020-02413-8>
- Nguyen, H. Q., & Seo, T. S. (2022). A 3D printed size-tunable flow-focusing droplet microdevice to produce cell-laden hydrogel microspheres. *Analytica Chimica Acta*, 1192.
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.339344>
- Oh, J. K., Drumright, R., Siegwart, D. J., & Matyjaszewski, K. (2008). The development of microgels/nanogels for drug delivery applications. In *Progress in Polymer Science (Oxford)* (Vol. 33, Issue 4, pp. 448–477).
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.01.002>
- Qin, X., Gan, Z., Liu, H., Tao, T., He, J., Li, X., Shang, D., Li, X., Xie, F., & Qin, J. (2024). A Pump-Free Strategy for the Controllable Generation of Alginate Microgels as Cellular Microcarriers. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 10(6), 3958–3967.
<https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.4c00375>
- Wang, Y. L., & Hu, J. J. (2021). Sub-100-micron calcium-alginate microspheres: Preparation by nitrogen flow focusing, dependence of spherical shape on gas streams and a drug carrier using acetaminophen as a model drug. *Carbohydrate Polymers*, 269.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118262>
- Ye, B., Xu, H., Bao, B., Xuan, J., & Zhang, L. (2017). 3D-printed air-blast microfluidic nozzles for preparing calcium alginate microparticles. *RSC Advances*, 7(77), 48826–48834.
<https://doi.org/10.1039/c7ra08611c>
- Zhang, J., Xu, W., Xu, F., Lu, W., Hu, L., Zhou, J., Zhang, C., & Jiang, Z. (2021). Microfluidic droplet formation in co-flow devices fabricated by micro 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110212>

- Zhao, H., Chen, Y., Shao, L., Xie, M., Nie, J., Qiu, J., Zhao, P., Ramezani, H., Fu, J., Ouyang, H., & He, Y. (2018). Airflow-Assisted 3D Bioprinting of Human Heterogeneous Microspheroidal Organoids with Microfluidic Nozzle. *Small*, 14(39).
<https://doi.org/10.1002/sml.201802630>
- Zheng, Y., Luo, C., Chai, Z., Liu, R., Yang, Z., Liao, X., Li, X., Wang, N., Li, D., Ji, X., & Chen, D. (2025). High-throughput preparation of monodisperse biocompatible core-shell capsules by 3D-Printed Microfluidics. *Chemical Engineering Science*, 304.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.121104>