

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de polimerización de metilmetacrilato por microemulsión  
para la formación de partículas encapsuladoras a escala laboratorio

Trabajo de graduación presentada por

Santiago Ramírez Rodríguez

para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Química

Industrial

Guatemala

2025



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de polimerización de metilmetacrilato por microemulsión  
para la formación de partículas encapsuladoras a escala laboratorio

Trabajo de graduación presentada por

Santiago Ramírez Rodríguez

para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Química

Industrial

Guatemala

2025

Va. Ba.

(f)  \_\_\_\_\_

Ing. Luis Ernesto Núñez González

Terna examinadora

(f)  \_\_\_\_\_

Ing. Luis Ernesto Núñez González

(f)  \_\_\_\_\_

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, M.Sc.

(f)  \_\_\_\_\_

Ing. Carmen Alicia Ortiz Pineda

Fecha de aprobación: Guatemala, 11 de diciembre de 2025

## PREFACIO

La elaboración de este presente trabajo de tesis surgió por un interés nacido en mi último año de colegio, tiempo en el que estuve decidiendo que carrera estudiar en la universidad. Fue en ese entonces cuando descubrí el mundo de la nanotecnología y desde ese momento despertó curiosidad para conocer más y descubrir nuevos conceptos que este novedoso campo de la ciencia ofrece. Desde entonces, ha sido mi objetivo desarrollarme profesionalmente en el campo de los nanomateriales. Este trabajo de graduación marca mi primer paso para lograr este objetivo.

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por permitirme estudiar esta carrera y por abrirme oportunidades y opciones para superar los obstáculos que viví a lo largo de la carrera y durante la elaboración de este ensayo. Adicionalmente, estoy muy agradecido con la capacidad que me ha bendecido para poder alcanzar mis objetivos tanto académicos, como profesionales y personales.

Quiero agradecer profundamente a mi mamá y papá con los que he tenido la bendición de poder compartir cada momento de mi vida. Ellos me han apoyado desde el momento que supieron que venía al mundo y siempre he podido contar con ellos desde entonces. Sin su apoyo incondicional, no podría llegar hasta donde he llegado.

Adicionalmente, agradezco a mi hermano Diego y a mi novia Rosa, por su continuo apoyo, escucharme y darme ánimos a lo largo del tiempo en el que estuve trabajando en mi tesis. Les agradezco por siempre creer en mí y acompañarme en mis fracasos y mis logros.

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesor, Ing. Luis Núñez, que, sin su apoyo y asesoramiento, este trabajo de tesis no hubiera sido posible. Le agradezco su ayuda y su disponibilidad para apoyarme en cada paso de la tesis.

Adicionalmente, le expreso mi gratitud al Dr. José Hernández, profesor auxiliar de la universidad de Ryukoku Japón. Sin su apoyo, no hubiera sido posible el análisis de tamaño de partícula. Le agradezco su apoyo, lo que me ha enseñado y por su disposición.

Agradezco al Dr. Eng. Kin-ya Tomizaki, profesor del curso de Química de los Materiales de la Universidad de Ryukoku de Japón, por su amabilidad y su disposición para llevar a cabo el análisis de tamaño de partícula (DLS). Gracias a él pude tener los resultados de tamaño de partícula de 4 muestras y su respectivo duplicado.

Finalmente, agradezco a la Universidad del Valle, por permitido ser mi casa de estudios y al Ing. Gamaliel Zambrano poder dirigir un departamento de calidad, con altos estándares de excelencia.

# ÍNDICE

INDICE DE ILUSTRACIONES.....	xiii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. JUSTIFICACIÓN .....	3
III. OBJETIVOS.....	5
A. Objetivo general .....	5
B. Objetivos específicos.....	5
IV. MARCO TEÓRICO .....	6
A. Encapsulamiento .....	6
B. Polimerización .....	8
C. Termodinámica .....	12
D. Transferencia de masa .....	19
E. Nanotecnología.....	22
F. Limoneno.....	25
G. Polimetilmetacrilato .....	28
H. Espectrofotometría de gases .....	31
I. Dispersión dinámica de luz (DLS).....	33
J. Agua ultrapura .....	36
V. ANTECEDENTES .....	39
A. Síntesis de nanopartículas de polimetilmetacrilato por microemulsión diferencial (Yuang et al., 2012) .....	39
B. Encapsulación de limoneno en nanopartículas poliméricas para aplicaciones en empaques de alimentos Eleftherios et al., (2021).....	40
C. Síntesis de PMMA nanopartículas por microemulsión vaporizando el monómero Chen et al., (2010) .....	40
D. Polimerización en emulsión de metacrilato de metilo en presencia de óxido de zinc Reyes et al., (2017) .....	41

VI. METODOLOGÍA .....	43
A. Preparación prueba piloto .....	43
Reactivos .....	43
Cristalería .....	43
Equipo .....	43
Procedimiento .....	44
B. Preparación nanopartículas .....	45
Reactivos .....	45
Cristalería .....	45
Equipo .....	46
Procedimiento .....	46
C. Preparación partículas encapsuladoras .....	48
Reactivos .....	48
Cristalería .....	48
Equipo .....	49
Procedimiento .....	49
VII. RESULTADOS .....	54
A. Análisis factorial.....	54
B. Resultado de tamaño de partícula y espectrofotometría de infrarrojo .....	56
C. Análisis de encapsulación por cromatografía de gases.....	65
VIII. DISCUSIÓN.....	67
IX. CONCLUSIONES .....	80
X. RECOMENDACIONES.....	82
XI. BIBLIOGRAFÍA.....	83
XII. ANEXOS.....	85
A. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA.....	86
B. DATOS ORIGINALES.....	87
C. ECUACIONES UTILIZADAS.....	99
D. CÁLCULO DE MUESTRA .....	104

E.	DATOS CALCULADOS .....	108
F.	ANÁLISIS DE ERROR .....	160
G.	DATOS DE PLACA .....	161
H.	ESPECIFICACIONES DE REACTIVOS .....	163
I.	ILUSTRACIONES .....	168
J.	GLOSARIO .....	180

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de encapsulamiento .....	6
Figura 2: Polimerización en cadena.....	9
Figura 3: Formación de microcápsula por polimerización por microemulsión de PMMA.....	11
Figura 4: Mecanismos de liberación de encapsulado .....	17
Figura 5: Tipos de emulsión .....	22
Figura 6: Estructura química del limoneno.....	26
Figura 7: Estructura química polimetilmetacrilato .....	28
Figura 8: Diagrama de flujo de cromatografía de gases .....	31
Figura 9: Funcionamiento de un DLS .....	34
Figura 10: Pareto de resultado de análisis factorial .....	54
Figura 11: Diagrama Q-Q de normalidad.....	54
Figura 12: Espectro de espectrofotometría de infrarrojo .....	56
Figura 13: Relación de tamaño de partícula con porcentaje de surfactante.....	58
Figura 14: Acumulación vs tamaño de partículas, con 5 % m/m SDS .....	59
Figura 15: Histograma de distribución de tamaño de partícula y porcentaje acumulado con 5 % m/m SDS.....	59
Figura 16: Grafico de tamaño de partícula vs porcentaje de acumulación, 10 % m/m SDS.....	60
Figura 17: Histograma de distribución de tamaño de partícula y porcentaje acumulado con 5 % m/m SDS.....	61
Figura 18: Porcentaje de acumulación vs tamaño de partícula con 20 % m/m SDS.....	61
Figura 19: Histograma de distribución de tamaño 20 % m/m SDS.....	62
Figura 20: Porcentaje de acumulación vs tamaño de partícula 30 % m/m de SDS.....	63
Figura 21: Histograma de distribución de tamaño de partícula con 30 % SDS.....	63
Figura 22: Balance de masa y Energía de la reacción de encapsulamiento de limoneno. ....	86
Figura 22: Resultados de cromatograma de gases primera encapsulación .....	152
Figura 23: Resultados de análisis de cromatografía de gases para primera encapsulación .....	152
Figura 24: Cromatograma de cromatografía de gases segunda corrida.....	153
Figura 25: Resultados de análisis de cromatografía de gases, segunda encapsulación .....	154

Figura 26: Resultados de cromatograma de cromatografía de gases tercera encapsulación .....	155
Figura 27: Resumen de cromatografía de gases tercera corrida .....	156
Figura 28: Cromatograma cuarta corrida de encapsulación .....	157
Figura 29: Resumen de análisis cuarta corrida de encapsulación.....	158

## LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1: Características resumen de los surfactantes .....	10
Cuadro 2: Resumen de parámetros de estudio en entalpia, entropía y energía libre de Gibbs .....	13
Cuadro 3. Tamaño de nanopartícula según su método de preparación.....	24
Cuadro 4: Resumen de experimentación para prueba piloto .....	44
Cuadro 5: Resumen de preparación de nanopartículas de polimetilmetacrilato.....	47
Cuadro 4: Resultados estadísticos de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk de los residuos del análisis factorial. ....	55
Cuadro 5: Resultados de prueba ANOVA de los resultados experimentales del análisis factorial. ....	55
Cuadro 6: Resultados de análisis factorial para los parámetros que prologan la estabilidad de la emulsión.....	56
Cuadro 7: Longitudes de onda característicos de polimetilmetacrilato (PMMA) en análisis espectrofotometría de infrarrojo (IR).....	57
Cuadro 8: Tabla de resultados de tamaño de partícula de análisis de Dispersión dinámica de luz (DLS) para cada triplicado de cada corrida experimental. ....	57
Cuadro 9: Resultados de análisis ANOVA de tamaño de partícula variando concentración de surfactante 5 %,10 %,20 % y 30 % (m/m).....	58
Cuadro 10: Resultados de encapsulación de limoneno por cromatografía de gases. ....	65
Cuadro 11: Resultados de costeo simple para encapsulamiento de limoneno a escala de laboratorio. ....	65
Cuadro 12: Condiciones experimentales de análisis factorial por corrida.....	87
Cuadro 13: Pesos y volúmenes experimentales del análisis factorial.....	87
Cuadro 14: Tiempo de estabilidad de la emulsión del análisis factorial emulsión agua y aceite. ....	88
Cuadro 15: Datos experimentales para corridas de síntesis de nanopartículas.....	88
Cuadro 16: Datos experimentales para corridas de síntesis de partículas encapsuladoras de limoneno. ....	89
Cuadro 17: Datos originales del estudio del triplicado de tamaño de partícula con una concentración de 5 % m/m de surfactante .....	89

Cuadro 18: Datos originales del estudio del triplicado de tamaño de partícula con una concentración de 10 % m/m de surfactante .....	91
Cuadro 19: Datos originales del estudio del triplicado de tamaño de partícula con una concentración de 20 % m/m de surfactante .....	94
Cuadro 20: Datos originales del estudio del triplicado de tamaño de partícula con una concentración de 30 % m/m de surfactante .....	97
Cuadro 21: Resultados de análisis de tamaño de partícula, primera corrida 5 % m/m SDS .....	108
Cuadro 22: Resultados de análisis de tamaño de partícula, segunda corrida 5 %m/m SDS. ....	110
Cuadro 23: Resultados de análisis de tamaño de partícula, tercer triplicado 5 %m/m SDS. ....	113
Cuadro 24: Resumen de análisis de tamaño de partícula, triplicado 5 %m/m SDS .....	115
Cuadro 25: Resultados de análisis de tamaño de partícula, primer triplicado 10 %m/m SDS. ....	118
Cuadro 26: Resultados de análisis de tamaño de partícula, segunda corrida 10 %m/m SDS. ...	120
Cuadro 27: Resultados de análisis de tamaño de partícula, tercera corrida 10 %m/m SDS.....	123
Cuadro 28: Promedio de análisis de triplicado de 10 % m/m SDS. ....	126
Cuadro 29: Resultados primer análisis de partícula 20 % m/m SDS.....	128
Cuadro 30: Resultados segundo análisis de partícula 20 % m/m SDS. ....	131
Cuadro 31: Resultados tercer análisis de partícula 20 % m/m SDS .....	134
Cuadro 32: Resumen de análisis de triplicado de análisis de tamaño de partícula 20 % m/m SDS .....	136
Cuadro 33: Resultado de análisis de primera corrida tamaño de partícula 30 % m/m SDS.....	139
Cuadro 34: Resultado de segunda corrida de análisis de tamaño de partícula 30 % m/m SDS .	141
Cuadro 35: Resultado de tercera corrida de análisis de tamaño de partícula 30 % m/m SDS ...	144
Cuadro 36: Resumen de corridas de análisis de tamaño de partícula 30 % m/m SDS.....	147
Cuadro 37: Cantidades experimentales calculadas para las corridas experimentales para la polimerización del metacrilato de metilo.....	149
Cuadro 38: Cantidades encapsulada de limoneno del cuadruplicado. ....	150
Cuadro 39: Cantidad de polimetilmetacrilato obtenido por corrida experimental para la síntesis de nanopartículas. ....	150
Cuadro 40: Precio unitario de los reactivos utilizados para la encapsulación de limoneno en polimetilmetacrilato. ....	150
Cuadro 41: Resultados de costeo simple .....	150
Cuadro 42: intervalo de confianza para cada corrida de tamaño de partícula .....	151

Cuadro 43: Resumen de balance de masa.....	151
Cuadro 44: Porcentaje de variabilidad análisis factorial .....	151
Cuadro 45: Porcentaje de variabilidad análisis de tamaño de partícula .....	151

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Especificaciones del surfactante utilizado, dodecilsulfato sódico .....	163
Ilustración 2: Especificaciones del D-L Limoneno utilizado.....	165
Ilustración 3: Especificaciones del monómero utilizado, metilmetacrilato .....	166
Ilustración 5: Muestra de emulsión agua y aceite.....	168
Ilustración 6: Primer intento de síntesis de nanopartículas.....	168
Ilustración 7: Primera polimerización para polimerizar el metacrilato de metilo .....	169
Ilustración 8: Diseño experimental dónde se llevó a cabo la experimentación .....	170
Ilustración 9: Segundo y tercer intento de sintetizar nanopartículas .....	171
Ilustración 10: Secado de muestra de polimetilmetacrilato .....	172
Ilustración 11: Primera síntesis de nanopartículas exitosa.....	173
Ilustración 12: Comparación nanopartículas y micropartículas .....	173
Ilustración 13: Muestras preparadas para enviar a Japón para análisis .....	174
Ilustración 14: Recepción de muestras en la Universidad de Ryukoku Japón.....	175
Ilustración 16: Muestra seca obtenida de 10 mL de polimetilmetacrilato. ....	175
Ilustración 17: Muestras de encapsulación de limoneno en partículas de polimetilmetacrilato. ....	176
Ilustración 18: Cotización de costo del metacrilato de metilo.....	177
Ilustración 19: Cotización de costo de limoneno.....	178
Ilustración 20: Cotización de costo del dodecilsulfato sódico.....	178
Ilustración 21: Cotización de costo del peróxido de benzoilo .....	179
Ilustración 22: Cotización de costo del agua destilada. ....	179

## RESUMEN

La nanotecnología aplicada a la encapsulación de compuestos activos ha surgido como una estrategia innovadora para mejorar la estabilidad, biodisponibilidad y liberación controlada de sustancias de interés industrial. Por este motivo se realizó un estudio de encapsulamiento de limoneno en partículas de polimetilmetacrilato. Para ello, se realizó una serie de emulsiones donde se llevó a cabo un análisis factorial para determinar que los parámetros que favorecen la síntesis son: 85 °C y 900 rpm. Adicionalmente, se determinó la influencia de la concentración de surfactante sobre el tamaño de partícula. Mediante análisis de Dispersión dinámica de luz (DLS), donde se determinó que la concentración de surfactante tiene una relación inversamente proporcional al tamaño de partícula. Incrementando de manera gradual el tensioactivo (5 %, 10 %, 20 % y 30 %) m/m, se logró obtener tamaños de partícula promedio entre los rangos: 40.83 nm a 18.16 nm. Asimismo, se realizó un análisis de encapsulamiento de limoneno. Para ello, se determinó mediante cromatografía de gases (GC) la cantidad de limoneno que no fue encapsulado en la matriz polimérica, donde se obtuvo en promedio 0.67 % m/m de limoneno libre, lo que indica un 99.33 % m/m de encapsulamiento. Por último, se determinó el costo de encapsulamiento a escala laboratorio mediante un costeo simple. Tomando en cuenta los costos de síntesis, se calculó un total de \$ 2.65 por corrida de encapsulación.

## ABSTRACT

Nanotechnology applied to the encapsulation of active compounds has emerged as a promising and innovative strategy to enhance the stability, bioavailability, and controlled release of industrially relevant substances. Accordingly, a study was conducted to investigate the encapsulation of limonene within polymethyl methacrylate (PMMA) particles. A series of emulsions was prepared, and a factorial analysis was performed to identify the optimal synthesis parameters, which were determined to be 85 °C and 900 rpm. Furthermore, the influence of surfactant concentration on particle size was evaluated. Dispersión dinámica de luz (DLS) analysis revealed an inverse relationship between surfactant concentration and particle size. By progressively increasing the surfactant concentration (5 %, 10 %, 20 %, and 30 % w/w), the average particle size obtained ranged from 40.83 nm to 18.16 nm. Moreover, encapsulation efficiency was assessed by quantifying the amount of free limonene using Gas Chromatography (GC). Results indicated an average of 0.67% free limonene, corresponding to an encapsulation efficiency of 99.33 %. Finally, a preliminary cost analysis at the laboratory scale was conducted using a simplified costing approach. Based on the synthesis expenses, the cost per encapsulation batch was estimated at \$ 2.65.

# I. INTRODUCCIÓN

La producción de partículas encapsuladoras ha tenido un auge importante debido a la cantidad de aplicaciones que tienen en la mejora de eficiencia de diferentes industrias como: farmacéutica, cosmética, alimenticia entre otras. Estas partículas se caracterizan con base a su tamaño y pueden ser micro (0.1-100  $\mu\text{m}$ ) o nanopartículas (1-100 nm) (Zielinska et al., 2020). Por ejemplo, en el área farmacéutica permite la disminución de tamaño de partícula del medicamento lo que facilita su absorción en el cuerpo. Con esta nueva tecnología es posible reducir las dosis necesarias para curar enfermedades o reducir el período de tiempo de administración (Britto et al., 2022).

El limoneno es un compuesto orgánico natural, el cual es el principal componente de los aceites esenciales cítricos alcanzando un 96% de su composición química (Dantas et al., 2023). En el ámbito farmacéutico es ampliamente utilizado ya que posee propiedades antiinflamatorias, antioxidantes, antimicrobiana y antifúngicas (Novella et al., 2023). Es por estos motivos por los cuales el limoneno es un componente clave para el desarrollo de fármacos con múltiples beneficios para la salud.

Existen diversas aplicaciones además de la industria farmacéutica como en la producción de productos de limpieza, el limoneno tiene presencia en detergentes para ropa, piso y vidrios. Esto se debe a las propiedades antibacterianas que tiene y por el olor cítrico que presenta. Mediante la encapsulación con partículas de polimetilmetacrilato, se presenta una oportunidad de aumentar la eficacia del producto, aumentando la superficie de contacto, logrando una mayor distribución homogénea y se aumenta el rendimiento utilizando menores concentraciones (López et al., 2022).

En este trabajo de graduación se encontrará los resultados de análisis de tamaño de partícula de la síntesis de partículas de polimetilmetacrilato con variaciones en la concentración de surfactante para determinar su efecto en los análisis con Dispersión dinámica de luz. Mediante análisis estadísticos se determinará la distribución de tamaño de partícula con relación al total de la muestra analizada.

Asimismo, se podrá evidenciar el rendimiento de encapsulación de limoneno dentro de las partículas analizadas con anterioridad. Mediante un análisis de cromatografía de gases se determinó la cantidad de limoneno libre en la solución. En otras palabras, se determinó la cantidad de limoneno no encapsulado para poder determinar el rendimiento de la encapsulación.

Este trabajo de investigación tiene como principal objetivo abrir nuevas líneas de investigación relacionadas con la nanotecnología y la encapsulación en nano y micropartículas. Adicionalmente, se busca aportar conocimiento correspondiente al campo de la ciencia de los polímeros y materiales con relación a la reacción de polimerización por microemulsión de polimetilmetacrilato.

## II. JUSTIFICACIÓN

En el año 2023, la industria global de la nanotecnología se evaluó en USD 79.14 billones (Fortune Business Insights 2025). Esta proyectado que para el año 2032 se alcanzará un valor de USD 332.73 billones, exhibiendo una tasa de crecimiento anual compuesta de 17.6 %. Esto se debe a la necesidad de la industria eléctrica y de manufactura de chips en disminuir el tamaño de los capacitores para poder producir computadoras con una mayor capacidad de procesamiento. Asimismo, el sector de automovilismo, aeroespacial presentan una inversión fuerte en el ámbito de ciencias de los materiales y nanotecnología para poder construir automóviles, aviones y naves espaciales con mayor resistencia disminuyendo su peso (BBC reaserch 2024).

El encapsulamiento con nanopartículas de polimetilmetacrilato (PMMA) ha cobrado relevancia en el ámbito global debido a su capacidad para proteger compuestos volátiles, biológicos o sensibles, garantizar su estabilidad, y proporcionar una liberación controlada eficiente.

Su alta biocompatibilidad, resistencia física y química, así como la posibilidad de ajustar tamaño y liberación, permiten optimizar procesos y mejorar desempeño de productos, reduciendo pérdidas por volatilización o degradación, y elevando la efectividad de ingredientes funcionales. Además, el uso de PMMA contribuye a la innovación en tratamientos terapéuticos avanzados, sistemas de administración controlada de fármacos, fragancias de larga duración y recubrimientos con propiedades específicas a nivel industrial.

En el contexto guatemalteco, la adopción de nanopartículas de PMMA abre una ventana de oportunidades para sectores clave de la industria nacional. Esto se debe a que no se ha encontrado fuentes de investigación guatemalteca sobre nanotecnología ni en tecnologías de microencapsulación. En la agroindustria, podrían utilizarse para encapsular extractos botánicos o insecticidas naturales, como aceites esenciales, con el fin de mejorar su rendimiento y reducir impactos ambientales. En el sector de alimentos y bebidas, la encapsulación de aditivos como saborizantes o antioxidantes naturales permitiría extender la vida útil de productos tradicionales guatemaltecos, conservando sabor y calidad.

Asimismo, la industria cosmética local podría beneficiarse de fragancias y activos encapsulados que liberen gradualmente ingredientes en lociones, cremas o jabones, mejorando su estabilidad y experiencia sensorial. El desarrollo de estas tecnologías en Guatemala también podría fomentar la innovación regional, dinamizar la cadena de valor agroindustrial y abrir oportunidades al mercado internacional con productos de alto valor agregado y diferenciados.

El campo de la nanotecnología es una nueva área de conocimiento en el área de la ciencia en donde no se ha encontrado investigación previa en Guatemala. Es por este motivo por el cual este trabajo busca disminuir esta brecha del conocimiento en el ámbito de investigaciones en las aplicaciones de encapsulamiento en micro y nanocápsulas. Para ello, en este estudio se enfocó en la evaluación de la relación de concentración de surfactante con el tamaño de partícula de polimetilmetacrilato obtenido a partir de una polimerización por microemulsión de metil metacrilato. Adicionalmente, se estudió la relación de concentración de surfactante con el tamaño de partícula haciendo uso de dispersión dinámica de luz (DLS). Habiendo obtenido la concentración con el menor tamaño de partícula, se estudió el rendimiento de encapsulación de limoneno sintetizando las partículas con la concentración de surfactante establecida anteriormente.

Con base a lo expuesto en este trabajo de graduación se establecen las bases para futuras investigaciones en el campo de la nanotecnología en Guatemala. Con los resultados encontrados en esta investigación se abre el campo para aplicaciones de estudios de cinética y escalamiento más allá de la escala de laboratorio, de esta manera se podrá ir desarrollando esta nueva tecnología en beneficio de este país.

### III. OBJETIVOS

#### A. Objetivo general

1. Realizar una polimerización de metilmetacrilato mediante una microemulsión para la formación de partículas encapsuladoras de limoneno.

#### B. Objetivos específicos

1. Realizar un análisis factorial total de una emulsión agua en aceite para determinar la velocidad de agitación y la temperatura que prolonguen el tiempo de estabilidad termodinámico de la emulsión.
2. Determinar tamaño de partícula de la microemulsión de metilmetacrilato mediante Dispersión dinámica de luz (DLS), para determinar la relación tamaño de partícula con la concentración de surfactante (dodecil sulfato).
3. Cuantificar la cantidad no encapsulada de limoneno mediante cromatografía de gases para determinar el rendimiento de encapsulación.
4. Determinar el costo de síntesis de la encapsulación de limoneno en las partículas de polimetilmetacrilato a escala laboratorio por medio de un costeo simple.

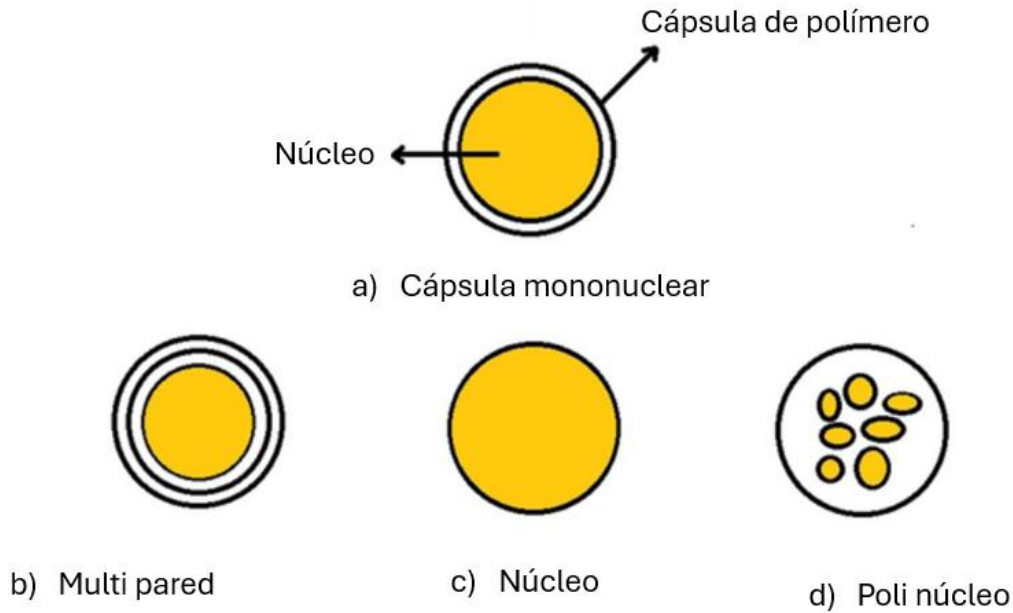
## IV. MARCO TEÓRICO

### A. Encapsulamiento

La nanoencapsulación es una técnica avanzada de ingeniería de materiales que permite la incorporación de compuestos activos dentro de estructuras a escala nanométrica, conocidas como nanocápsulas o nanopartículas. Estas estructuras, con dimensiones menores a un micrómetro, están diseñadas para proteger, transportar y liberar sustancias activas de forma controlada. Su fundamento científico se basa en principios de fisicoquímica de coloides, interacción molecular, fenómenos de superficie y termodinámica de interfaces. Estas propiedades hacen posible el diseño de sistemas capaces de mantener la estabilidad de compuestos sensibles, mejorar su biodisponibilidad y dirigir su liberación hacia una zona específica del medio o del organismo.

En un sistema nanoencapsulado, el compuesto activo puede ser un fármaco, aceite esencial, vitamina, enzima u otro tipo de molécula funcional, mientras que la matriz encapsulante o envoltente puede estar compuesta por polímeros naturales como la gelatina, el alginato o la quitina, o bien por polímeros sintéticos como el poliácido láctico (PLA), la policaprolactona (PCL) o el polimetilmetacrilato (PMMA). La selección del material encapsulante depende de la naturaleza química del compuesto, el medio de aplicación, la vía de administración y los requerimientos de liberación controlada. Las nanopartículas presentan una alta relación superficie-volumen, lo que incrementa su capacidad de interacción con el entorno, facilitando una mayor eficiencia en la entrega del principio activo.

Figura: 1 Tipos de encapsulamiento



(Rana et al., 2023)

Diversas técnicas han sido desarrolladas para lograr la nanoencapsulación de compuestos bioactivos, siendo una de las más utilizadas la polimerización en emulsión y microemulsión. Estos métodos consisten en la polimerización de monómeros dentro de sistemas dispersos estabilizados por surfactantes, permitiendo el crecimiento de partículas homogéneas y de pequeño tamaño. La microemulsión, en particular, se caracteriza por su estabilidad termodinámica y su capacidad para generar estructuras extremadamente pequeñas con distribución de tamaño estrecha, lo cual es especialmente útil en la encapsulación de sustancias lipofílicas. Otro método ampliamente empleado es la coacervación, el cual se basa en la separación de fases inducida por cambios en condiciones como el pH, la temperatura o la fuerza iónica, permitiendo que una fase polimérica recubra el compuesto activo. También se destaca la nanoprecipitación, donde un polímero disuelto en un solvente miscible con agua se precipita en fase acuosa formando nanopartículas al entrar en contacto con un agente estabilizante. A estas técnicas se suman procesos físicos como el secado por aspersion (spray drying) y la liofilización, que transforman emulsiones en partículas sólidas, facilitando su almacenamiento y posterior uso industrial.

La aplicación de la nanoencapsulación ha demostrado ofrecer múltiples ventajas. Una de las principales es la capacidad de proteger los compuestos activos frente a factores ambientales como la luz, el oxígeno, la humedad o el pH, lo que prolonga su estabilidad y vida útil. Adicionalmente, permite una liberación controlada, sostenida o dirigida del activo, optimizando su eficacia terapéutica o funcional y reduciendo efectos secundarios. La encapsulación a escala nanométrica mejora la solubilidad de sustancias poco hidrosolubles y aumenta su biodisponibilidad, especialmente en formulaciones farmacéuticas o alimentarias. Otra ventaja importante es la posibilidad de reducir la dosis necesaria del principio activo, gracias a una mayor

eficiencia en su administración, lo cual contribuye a una formulación más segura y económica. Estas propiedades hacen que la nanoencapsulación tenga un amplio espectro de aplicaciones en diferentes sectores, incluyendo la medicina, la industria alimentaria, la agricultura, la cosmética y los productos de limpieza o higiene.

No obstante, la implementación de la nanoencapsulación a escala industrial enfrenta algunos retos. Entre los principales desafíos se encuentran la estandarización de técnicas de síntesis, el escalado de producción, la evaluación toxicológica a largo plazo, los costos asociados a materiales y procesos, y la necesidad de regulaciones claras que garanticen la seguridad del consumidor. A pesar de estas limitaciones, las perspectivas futuras son altamente prometedoras. La investigación actual se enfoca en el desarrollo de sistemas de liberación inteligente que respondan a estímulos específicos como temperatura, pH o concentración de metabolitos, así como en el uso de polímeros biodegradables que permitan una mayor compatibilidad ambiental y biológica. Además, el diseño de sistemas multicomponentes que encapsulen más de un principio activo al mismo tiempo abre nuevas posibilidades para aplicaciones combinadas, especialmente en terapias farmacológicas y alimentos funcionales.

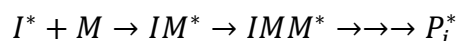
En conclusión, la nanoencapsulación representa una tecnología con un enorme potencial para transformar el modo en que se administran, protegen y liberan los compuestos activos en diversos campos. Su base científica sólida, junto con la versatilidad de sus métodos de síntesis y sus múltiples ventajas, la posicionan como una herramienta clave para el desarrollo de productos más eficientes, seguros y sostenibles.

## B. Polimerización

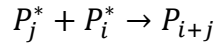
La polimerización del metil metacrilato se caracteriza por ser una reacción en cadena. Las polimerizaciones de este estilo son rápidas generalmente dándose por finalizada la reacción hasta llegar a la terminación. La concentración del monómero va reduciendo a medida que se va dando la reacción. El resultado es un polímero de alto peso molecular mezclado con partes del monómero que no reaccionó. Dicho proceso químico consta de tres pasos principales: la iniciación, propagación y la terminación (Himienz et al., 2001).

1. Iniciación: una especie activa  $I^*$  es formada mediante el uso de un iniciador  $I$ .  

$$I \rightarrow I^*$$
2. Propagación: el iniciador reacciona con el monómero  $M$  para iniciar la conversión del monómero al polímero. La reacción se repite hasta que el polímero se forma con un grado de polimerización  $i$ .

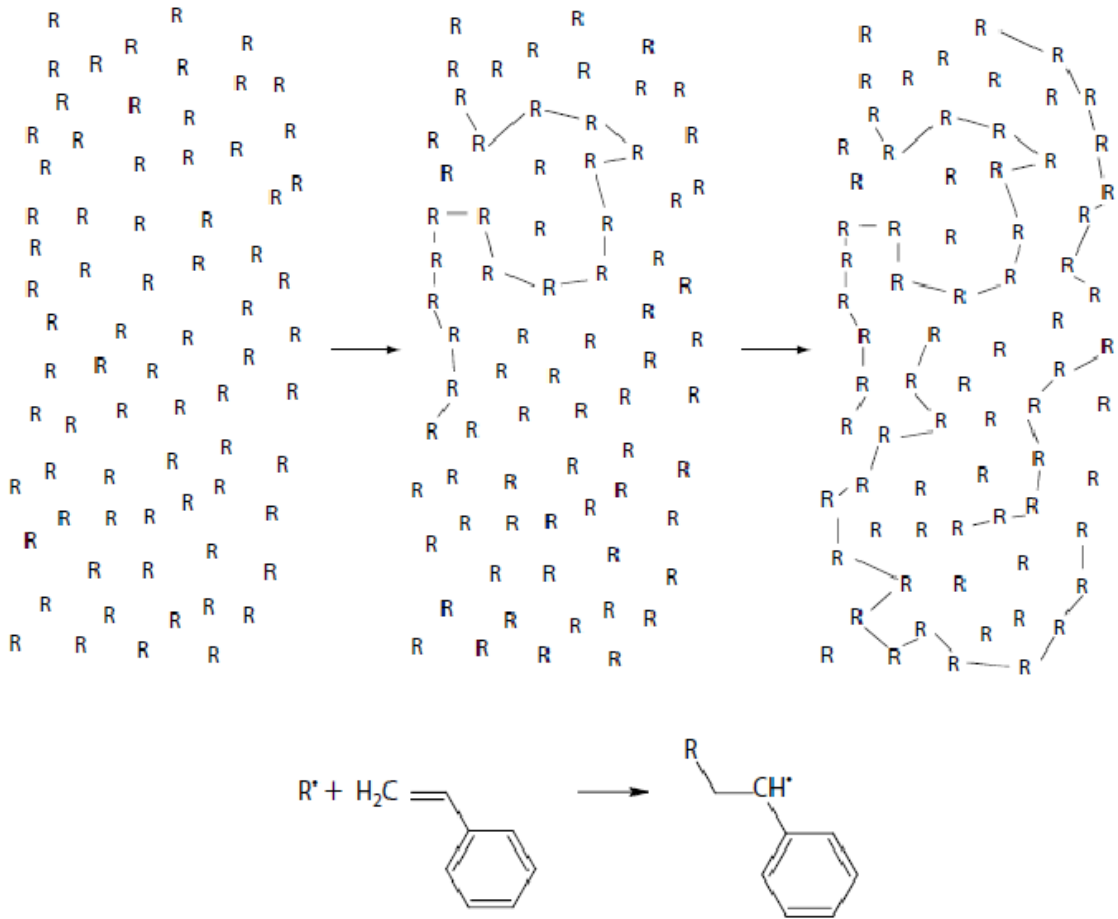


3. Terminación: ocurre cuando la polimerización se detiene debido a que la escasez de sitio activo disponible para continuar la formación de polímero o por la falta de monómero disponible para reaccionar. Una vez se detiene la formación de sitios activos, se detiene la polimerización y se forman el denominado “polímero muerto”.



(Himienz, 2007)

Figura 2: polimerización en cadena



(Himienz, 2007)

La formación de sitios activos es crucial para la polimerización en cadena, ya que en ella radica la formación del polímero. Es por este motivo, por el cual es necesario remover el oxígeno del sistema el cual está presente en el aire. Debido a la electronegatividad del oxígeno, llega a

presentar afinidad con el sitio activo formado para la reacción. Esto produce la inhibición del iniciador, disminuyendo el rendimiento de la reacción. Para evitar este problema se debe de purgar el sistema utilizando nitrógeno gaseoso (Himienz, 2007).

Muchos monómeros se someten a polimerización por radicales libres, mientras que otros pasan por polimerizaciones iónicas. Las polimerizaciones catiónicas requieren monómeros que contengan electrones de valencia libres para poder reacciones como un grupo alcoxi, fenilo o vinilo. Por otro lado, la polimerización aniónica ocurre con monómeros que contengan grupos receptores de electrones como los son los haluros y nitrilos. Esta selectividad se debe a la necesidad de estabilización de especies aniónicas y catiónicas.

El surfactante toma un rol vital en la polimerización ya que no sólo determina el tamaño de partícula, sino que también en la estabilidad de la emulsión. Para ello, los surfactantes se clasifican en tres categorías: catiónico, aniónico y no iónico. Las características se muestran a continuación:

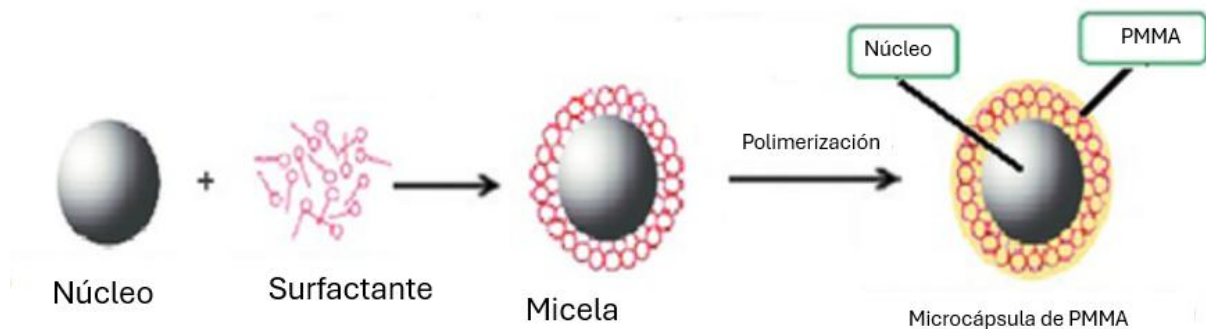
Cuadro 1: Características resumen de los surfactantes

Tipo de surfactante	Características
Catiónico	Extremos cargados positivamente cuando se encuentran en solución y se neutralizan con un anión de otro compuesto. Gracias a estas propiedades se logra la estabilidad de la reacción.
Aniónico	Se encuentran cargados negativamente en los extremos de la molécula y por lo tanto se deben de asociar con un carbocatión de otro compuesto químico para mantener la neutralidad de cargas.
No Iónico	Son aquellos que no contienen grupos funcionales disociables y por ende no son ionizables en soluciones acuosas. Tienen una parte polar y apolar.

(Yuang et al.,2012).

El tipo de surfactante es esencial para una correcta polimerización ya que debido a que se trata de una polimerización de radicales libres, donde en el mecanismo de la reacción se puede evidenciar la formación de un carbocatión en la estructura. Debido a que está cargado positivamente, se requiere un surfactante aniónico para poder reaccionar. Por el contrario, las cargas se repelerían y por consiguiente no habría reacción. El surfactante utilizado en este trabajo de investigación es dodecil sulfato (SDS) y es de naturaleza aniónica.

Figura 3: Formación de microcápsula por polimerización por microemulsión de PMMA



(Rana et al., 2023)

El SDS tiene la característica de que contiene compuestos denominados como aminas, las cuales están constituidas por un átomo de nitrógeno y una cadena de dos carbonos solitarios. Esto tiene un efecto de inhibidor en los monómeros, lo cual limita el tamaño de partícula ya que controla el índice de poli dispersión. Es por esto por lo que el dodecil sulfato puede oxidarse por el iniciador (peróxido de benzoilo) lo que puede involucrar cargas electrostáticas a la superficie de la partícula (Yuang et al.,2005). Adicionalmente, el SDS tiene un bajo peso molecular y por lo tanto puede generar mayor cantidad de micelas que otros tipos de surfactantes permitiendo una mayor estabilidad termodinámica de las partículas.

Previo a realizar las partículas de polimetilmetacrilato se debió definir que reactivos utilizar. El metacrilato de metilo (MMA) fue utilizado debido a las características fisicoquímicas que se posee. El polímero es altamente estable ante degradaciones químicas. Este parámetro es sumamente importante ya que el polímero debe evitar ser degradado con el solvente orgánico para evitar liberación de limoneno al momento de ejecutar la extracción líquido-líquido.

Adicionalmente, el polimetilmetacrilato es considerado como biocompatible, por lo que no es tóxico comparado a otros polímeros.

Para el iniciador se utilizó peróxido de benzoilo (BPO). Esto se debe a la complementación que tiene con el surfactante. Este compuesto es un iniciador radicalario, por lo que se descompone térmicamente liberando radicales libres, los cuales propician la polimerización del metacrilato de metilo generando radicales libres los cuales permiten la reacción en cadena.

En conjunto, el BPO y el SDS se complementan de manera óptima durante la polimerización. Por un lado, el surfactante genera las micelas controlando el tamaño de partícula y evitando la coagulación, mientras que el iniciador propicia la polimerización dentro de las micelas dando lugar a la formación de la corteza de las partículas. Esto permite dar lugar a nanopartículas estables con una distribución homogénea de tamaño.

El efecto de la cantidad de iniciador en una polimerización en cadena es vital para su correcta síntesis. Esto se debe a que el iniciador debe interactuar con el monómero para poder iniciar la reacción. Sin embargo, en términos de polimerización de polimetilmetacrilato, se puede evidenciar un aumento de tamaño gradual si se usa un exceso de iniciador. Esto se debe por las siguientes razones:

1. Radicales oligoméricos que se puedan transferir entre la fase acuosa y las partículas de polimetil metacrilato.
2. Radicales oligoméricos que podrían continuar con el proceso de nucleación y formar nuevas partículas con un mayor tamaño.

(Gan, 2005).

En otras palabras, se puede interpretar lo anterior como una relación directamente proporcional donde a bajas concentraciones se tienen menos cantidad de sitios activos disponibles para llevar a cabo la nucleación. A mayor cantidad de iniciador, mayor cantidad de sitios activos y por lo tanto mayor tamaño de partícula. Cuando se tiene que el número de radicales libres de una partícula interactúan con un monómero sin reaccionar, se puede iniciar otra reacción en cadena, afectando en tamaño nuevamente.

### C. Termodinámica

Uno de los parámetros más importantes de la síntesis de nano y micropartículas radica en la estabilidad termodinámica. Es vital que se llegue al punto donde las nanopartículas sean

termodinámicamente estables. En términos de este trabajo de graduación, dónde el método de síntesis radica en una polimerización de radicales libres mediante una microemulsión, se entiende por estabilidad termodinámica a la permanencia por un largo periodo de tiempo de la emulsión, donde las dos fases permanecen miscibles sin llegarse a separar. Los compuestos utilizados son, por naturaleza, inmiscibles entre sí, sin embargo, el uso de una correcta concentración de surfactante permite dichos compuestos se mezclen y por lo tanto que se formen las partículas y que se mantenga su tamaño.

En lo que concierne a la síntesis de nanopartículas por métodos químicos o “bottom up”, la segunda ley de la termodinámica es la que rige todo el proceso, por lo que se debe tomar en cuenta en cada paso del proceso. Dicha ley, establece que la entropía del universo tiende a incrementar con el tiempo (Smith et al., 2017). Este principio fundamental de la termodinámica establece sobre los fundamentos de los procesos irreversibles y reversibles.

El cambio de entropía de una reacción cualquiera es uno de los parámetros que se pueden utilizar para determinar si un proceso es termodinámicamente favorable o no y lo indica los cálculos de cambio de entropía, entalpía y energía libre de Gibbs. Los parámetros se demuestran a continuación.

Cuadro 2: Resumen de parámetros de estudio en entalpía, entropía y energía libre de Gibbs

<b>Parámetro</b>	<b>Signo Positivo</b>	<b>Signo Negativo</b>
<b>Entalpía</b>	No espontáneo	Espontáneo
<b>Entropía</b>	Espontáneo	No espontáneo
<b>Energía Libre de Gibbs</b>	No espontáneo	Espontáneo

(Smith et al., 2017).

La espontaneidad o no espontaneidad de un proceso no radica en que la reacción química ocurra de manera inmediata o en un período corto de tiempo. Este término indica sobre que dicho proceso ocurra de tal manera que ocurra por sí sola. Es decir, que no se tenga que aplicar energía en forma de trabajo para que dicho proceso ocurra.

Las leyes de la entropía indican matemáticamente si un proceso es espontáneo o no. Esto indica también sobre si un proceso cualquiera es favorable para que sea irreversible o no. Esto se determina por las leyes de la entropía, las cuales indican lo siguiente:

- Un proceso espontáneo es cuando este puede ocurrir sin interferencia de ningún tipo.
- Un proceso no espontáneo no puede ocurrir por sí solo a determinadas condiciones experimentales, por lo que se debe aplicar energía en forma de trabajo para que pueda suceder.
- Si un proceso fisicoquímico es espontáneo, el proceso inverso no es espontáneo y viceversa.

Por ejemplo, en el caso del agua y hielo. En condiciones estándar (25°C y 1 atm), el hielo se derrite y se convierte en agua líquida. Este es un ejemplo de un proceso termodinámicamente favorable, ya que, a estas condiciones ambientales, la fase líquida es la forma más estable de la materia. Sin embargo, no es un proceso reversible ya que el agua líquida no se convierte en hielo de manera espontánea en dichas condiciones. Para ello, es requerido que el agua líquida pierda calor hasta su solidificación mediante un proceso de congelamiento. De esta manera se fundamenta las leyes de la entropía, donde un proceso es espontáneo, mientras que el inverso de ese proceso no es termodinámicamente favorable.

De manera análoga, se puede explicar los procesos termodinámicos del proceso de una emulsión. El proceso de homogenización del agua y del aceite en condiciones estándar no es un proceso espontáneo ya que son inmiscibles entre sí. Es por esto por lo que se aplica energía en forma de calor y para estabilizar la reacción se adiciona un surfactante. Dicha sustancia es crítica ya que de lo contrario las dos fases solo se estabilizarían por un tiempo limitado hasta que se vuelvan a separar las fases. Como el proceso de emulsión no es termodinámicamente estable, el

inverso si lo es, por lo que el sistema tendrá la tendencia de que se separen las fases en la fase líquida y oleosa originales en condiciones normales. Para evitar esta separación, la concentración correcta del surfactante es esencial, ya que con una correcta temperatura y calor serán los parámetros que permitirán que la emulsión se mantenga sin romperse.

En concreto para este trabajo de graduación, se trabaja una microemulsión con una fase oleosa y una fase de agua con el monómero. Por si sola, la reacción no podría ocurrir por lo que no es termodinámicamente favorable ya que se debe agregar energía en forma de calor mediante un proceso de calentamiento. Esto quiere decir que, por la segunda ley de la termodinámica, el proceso inverso es de naturaleza espontánea. Esto quiere decir que las fases tenderán a separarse y por consiguiente las nanopartículas tenderán a aumentar de tamaño hasta llegarse a separar de la fase oleosa.

Es importante establecer que el tiempo de estabilidad termodinámica de cada tipo de nanopartícula varía dependientemente de la metodología empleada. El tiempo puede variar desde unas horas hasta años, dependiendo de las concentraciones utilizadas, metodología, inocuidad etc. Existen dos principales factores que reducen el tiempo de vida de las nanopartículas ya que, por entropía, las nanopartículas tienden a cambiar su morfología y tamaño. El primer factor es la coalescencia, que es cuando las partículas se van juntando y chocando entre sí y por consiguiente aumentando su tamaño.

Como se mencionó anteriormente las emulsiones no son termodinámicamente estables. Debido a los postulados establecidos en la segunda ley de la termodinámica, la separación de la fase acuosa y oleosa será espontánea, aunque en algunos casos tome más tiempo. Sin embargo, en la microemulsión el uso de surfactante le da una mayor duración de tiempo de estabilidad homogénea de las fases. Por este motivo, se utilizó una microemulsión y no una nanoemulsión por sonicación, la cual no utiliza surfactante. Por este motivo la separación de fases de partículas realizadas por medio de sonicación será más rápido que al realizarlas por microemulsión.

Cuando la coalescencia es el primer factor de desestabilización del sistema, el tamaño de partícula variará de manera significativa a lo largo del tiempo. Puede partir de una emulsión perfectamente homogénea con una baja variación de tamaño de partícula, hasta un crecimiento exponencial de tamaño de partícula hasta eventualmente llegar a una separación de fases (Deminiere et al., 1999). Este fenómeno se incrementa debido a un aumento de las fuerzas

intermoleculares de Vander Waals y se presenta un proceso análogo a la floculación, donde las moléculas se van juntando, aumentando de tamaño y por consiguiente precipitando, dando lugar a la separación de fases.

Una forma de evitar la coalescencia de las nanopartículas es logrando un tamaño de partícula pequeño. Entre menor sea el tamaño, la adhesión de estas será vera disminuido ya que existe una relación inversamente proporcional entre el la coalescencia y la acumulación con aumento de tamaño. Si se logra alcanzar la escala nanométrica, este fenómeno se reduce en probabilidad y por lo tanto el principal factor que podría afectar los resultados se denomina maduración de Ostwald.

El suceso de maduración de Ostwald se define como el proceso de crecimiento de las partículas mas grandes a expensas de las más pequeñas (ACS, 2011). Esto ocurre debido a la diferencia de potencial químico del aceite debido a la diferencia del radio de las partículas. Existe una relación inversamente proporcional entre el potencial químico y el tamaño de partícula, donde el potencial químico incrementa a medida que se disminuye el tamaño de partícula debido al incremento de la presión de Laplace. Esta presión se define por la presión de una burbuja dentro de una micela de diferente composición química. La presión de Laplace se puede definir por la siguiente formula:

$$P = 2 * \frac{T}{r}$$

(Billin, 2015).

Dónde T es la tensión superficial y r es el radio de la micela. Mediante este proceso, se puede evidenciar como las partículas más pequeñas tienden a ceder materia a las más grandes mediante un proceso de transferencia de masa entre fases líquido-líquido, por lo que una distribución uniforme de tamaño de partícula es esencial para disminuir el efecto de maduración de Ostwald. La presión de Laplace puede llegar a exceder varias atmosferas (ACS,2011) por lo que fundamente el papel de desestabilización de la emulsión a lo largo de un tiempo variable.

La presión de Laplace es un concepto fundamental en la fisicoquímica de interfaces, particularmente en sistemas que involucran superficies curvas, como burbujas, gotas, micelas o

vesículas. Esta presión surge como resultado de la tensión superficial en la interfase entre dos fases, generando una diferencia de presión entre el interior y el exterior de una estructura curva. El principio fue formulado por Pierre-Simon Laplace en el siglo XIX y se expresa mediante la ecuación:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R}$$

Donde:

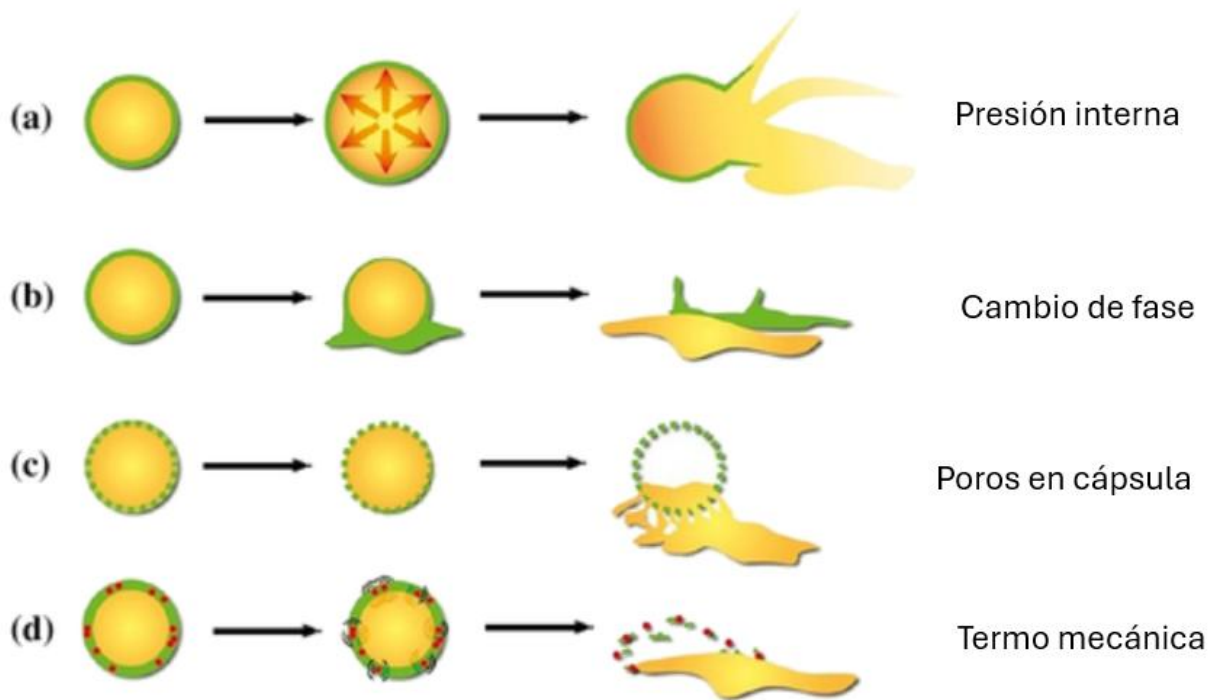
$\Delta P$  es la diferencia de presión

$\gamma$  es la tensión superficial

R es el radio.

Este fenómeno es de gran relevancia en sistemas coloidales y en la ciencia de materiales, ya que influye en la estabilidad y comportamiento de estructuras como nanopartículas, emulsiones y espumas. En contextos donde las dimensiones del sistema disminuyen, como ocurre a escala nanométrica, la presión de Laplace se vuelve significativa, llegando incluso a afectar la solubilidad de sustancias, la velocidad de difusión y los mecanismos de nucleación y crecimiento. Por ejemplo, en nanopartículas esféricas formadas por polimerización en microemulsión, como las de polimetilmetacrilato (PMMA), la presión interna puede aumentar considerablemente conforme disminuye el radio, lo que modifica la distribución de energía dentro de la partícula y puede influir en la eficiencia de encapsulación de compuestos activos.

Figura 4: Mecanismos de liberación de encapsulado



(Rana et al., 2023)

Además, la presión de Laplace tiene implicaciones importantes en fenómenos fisiológicos y biomédicos, como la mecánica pulmonar, donde determina la presión necesaria para inflar los alvéolos, o en la formación de liposomas y cápsulas para liberación controlada. En sistemas encapsulantes, una elevada presión de Laplace puede afectar la estabilidad de las nanocápsulas e incluso inducir su colapso o liberación prematura del contenido. Por ello, en el diseño de nanomateriales, se deben considerar tanto la tensión interfacial como la geometría del sistema para asegurar una adecuada estabilidad termodinámica.

En síntesis, la presión de Laplace es una propiedad crítica en sistemas con interfaces curvas, ya que controla la diferencia de presión interna que se origina por la acción de la tensión superficial. Su entendimiento es clave para el diseño, análisis y optimización de sistemas coloidales, farmacéuticos, biomédicos e industriales que dependen del comportamiento interfacial de fluidos confinados a micro y nanoescala.

## D. Transferencia de masa

En la práctica de síntesis de nanopartículas de polimetilmetacrilato por un microemulsión, se utiliza un reactor donde la fase oleosa se volatiliza para después mezclarse en un reactor donde se encuentra la fase líquida, dando lugar a una transferencia de masa interfacial. Para dicho proceso se debe tomar en cuenta la difusividad de las sustancias en sus respectivos estados y los coeficientes de transferencia los cuales indicarán el flux de materia de ambas fases.

La ley de Fick establece que la difusión molecular radica en la facilidad que tienen un soluto en moverse en cualquier punto y a cualquier dirección (Treybal,1980). La ley de Fick esta establecida por la siguiente ecuación matemática:

$$J_A = -D_{AB} \frac{\delta C_A}{\delta Z} = -cD_{AB} \frac{\delta x_A}{\delta Z}$$

(Treybal, 1980).

Dónde:

$J_A$  es el flux de la materia,

$D_{AB}$  es el coeficiente de difusividad A en el componente B,

$C_A$  es la concentración de A

$Z$  es la distancia

Debido a que el flux de la materia depende de la difusividad, es claro que los parámetros de temperatura, peso molecular, atracciones intermoleculares, fuerzas de Van Der Waals, potencial químico y la fuerza motriz cobran especial importancia ya que son los parámetros que definen la difusividad de la masa. Adicionalmente, el signo negativo de la fórmula anterior indica que la difusión ocurre en sentido de la estabilidad de los sistemas mediante el equilibrio dinámico y los principios de Le Chatelier. Donde un sistema favorece a la transferencia de masa de mayor concentración a menor concentración.

En el caso de difusividad existen dos tipos esenciales dónde el uno es el sistema A difundente y B no difundente. Esto se debe a que un compuesto se difunde a otro, pero el otro no. En la industria, este principio es aplicable en torres de absorción de gases en líquidos, torres de enfriamiento etc. Se denota por la siguiente ecuación:

$$N_A = -N_B, \quad N_B = 0$$

*(Treybal, 1980).*

Por otro lado, también existe la contradifusión equimolar, donde ambos compuestos se difunden equitativamente entre sí. Generalmente es aplicable a proceso de destilación. Sin embargo, es importante establecer que un flujo de materia puede ser 0, pero el flujo de masa tiene que ser distinto de 0 y viceversa.

$$N_A = -N_B$$

En este trabajo de investigación se trabaja con un sistema A difundente, B no difundente ya que durante el proceso de microemulsión, la fase oleosa se difunde en la fase acuosa con el monómero en cuestión. Por este mecanismo de transferencia de masa se explica el proceso de encapsulamiento del limoneno en la fase líquida.

La extracción líquido-líquido, también conocida como extracción con disolvente, es una operación unitaria ampliamente utilizada en ingeniería química para la separación de componentes presentes en una mezcla líquida. Este proceso se basa en la transferencia de masa de uno o varios solutos desde una fase líquida a otra inmiscible con ella, aprovechando las diferencias en la solubilidad del soluto en ambas fases. Por lo general, se emplean dos líquidos inmiscibles: uno que contiene el soluto a extraer, denominado fase de alimentación o fase acuosa, y otro que actúa como solvente extractante, usualmente un compuesto orgánico seleccionado por su afinidad hacia el soluto de interés.

Desde el punto de vista termodinámico, la extracción líquido-líquido se rige por el equilibrio de partición o distribución, el cual describe cómo se reparte un soluto entre dos fases inmiscibles en contacto. Este fenómeno está determinado por el coeficiente de distribución o coeficiente de reparto, que representa la relación de concentraciones del soluto en cada fase en equilibrio. Este coeficiente es una propiedad intensiva que depende de la naturaleza química del soluto, del solvente y de la temperatura del sistema. En la práctica, se busca un coeficiente de distribución suficientemente alto para lograr una transferencia eficiente del soluto hacia la fase extractante, lo cual permite disminuir el número de etapas necesarias para alcanzar una separación efectiva.

El diseño de un proceso de extracción líquido-líquido también considera el equilibrio de fases, es decir, la forma en que las fases líquidas interactúan y se separan al final de la operación. En general, se requiere que las fases sean completamente inmiscibles o que tengan una miscibilidad muy limitada para garantizar una separación clara. En caso contrario, se pueden formar emulsiones que dificultan la recuperación del extracto. La elección del solvente es crítica y debe cumplir con múltiples criterios: alta selectividad hacia el soluto, baja solubilidad en la fase de alimentación, baja toxicidad, facilidad de recuperación y regeneración, estabilidad química, y propiedades físicas favorables como baja viscosidad y tensión superficial.

El fenómeno de transferencia de masa en la extracción líquido-líquido involucra el movimiento del soluto desde la fase de mayor concentración hacia la fase de menor concentración a través de la interfase. Este proceso está gobernado por los gradientes de concentración y puede describirse mediante leyes de difusión como la ley de Fick. Para maximizar la eficiencia del proceso, es importante aumentar el área de contacto entre las fases, lo cual se puede lograr mediante el uso de equipos como columnas de extracción empacadas, columnas de platos, extractores centrífugos o mezcladores-decantadores. En estos dispositivos, se promueve una dispersión adecuada de una fase dentro de la otra, lo cual incrementa el área interfacial y mejora la tasa de transferencia de masa.

Además del equilibrio termodinámico, la cinética de la extracción y la hidrodinámica del sistema también juegan un papel importante en el diseño y la operación. La velocidad a la que ocurre la transferencia de masa está influenciada por factores como la agitación, la viscosidad de las fases, el tamaño de gota de la fase dispersa y el tiempo de contacto. En sistemas industriales, es común utilizar columnas de extracción con etapas múltiples en contracorriente, ya que esta configuración permite una mayor eficiencia de extracción con un menor consumo de solvente. Las condiciones operativas como el caudal de cada fase, la temperatura, la relación de fases y el régimen de flujo (laminar o turbulento) deben ser cuidadosamente ajustadas para mantener la estabilidad del sistema y evitar fenómenos no deseados como la formación de emulsiones o la saturación del solvente.

En conclusión, la extracción líquido-líquido es una técnica de separación muy versátil y eficiente, aplicable en diversas industrias como la farmacéutica, petroquímica, alimentaria, minera y ambiental. Su fundamento reside en la transferencia selectiva de un componente desde una fase

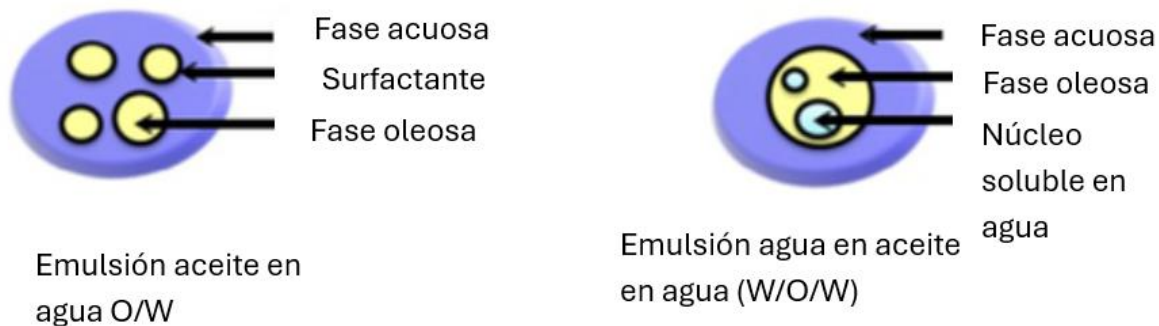
líquida a otra, aprovechando el equilibrio de distribución y las propiedades fisicoquímicas del sistema. El éxito del proceso depende de una adecuada selección del solvente, un diseño óptimo del equipo de contacto y un control preciso de las variables de operación. Con el desarrollo de nuevos solventes y técnicas intensificadas, como el uso de solventes verdes, líquidos iónicos o procesos asistidos por ultrasonido, la extracción líquido-líquido continúa evolucionando hacia métodos más sostenibles y eficientes.

### E. Nanotecnología

Las nanopartículas sintetizadas a partir de polímeros han generado creciente interés en el área de investigación debido a las diversas aplicaciones que tienen. Estas nanopartículas poliméricas, presentan tamaños que varían entre 1-1,000 nm dependiendo del polímero, método de síntesis y proporciones utilizadas de reactivos (Zielinska et al., 2020). Adicionalmente, una de las principales ventajas de las nanopartículas es que son termodinámicamente estables, siempre y cuando se alcance la concentración crítica micelar (CMC, por sus siglas en inglés). Se entiende por CMC, a la concentración mínima de tensoactivo requerido para la formación de micelas (Wang, et al., 2020).

Se entiende por micelas a la agrupación de moléculas que forma una de las fases del coloide (Webber et al., 2020). Estas partículas constan de una parte hidrofóbica y parte hidrofílica. Se conoce por micelas normales cuando la parte hidrofílica se encuentra en el exterior de la partícula, mientras que en la micela inversa la parte hidrofóbica se encuentra en el exterior. En las micelas normales, se tendrán emulsiones agua/aceite (W/O, por las siglas en inglés), mientras que, en las micelas invertidas, se tendrán emulsiones aceite/agua (O/W). Es importante diferenciar los dos tipos de micelas debido a que presentan diferentes propiedades y características (Wang, et., al. 2020).

Figura 5: Tipos de emulsión



(Rana et.al., 2023).

La naturaleza de las micelas dependerá de las proporciones de la fase oleosa y la acuosa, así como del método de síntesis utilizado y de las características fisicoquímicas del surfactante. Previo a realizar la encapsulación, se deberá conocer las cantidades correspondientes para obtener el resultado deseado. La metodología experimental también forma parte crítica para obtener partículas con las propiedades deseadas. Existen diversos métodos como: evaporación de solvente, nanoprecipitación, desolvatación, microemulsión entre otros. Los polímeros empleados, pueden ser naturales como es el caso del alginato, almidón o la albumina o sintetizados como polimetil metacrilato, polipropileno, poliamidas etc (Kamali, et., al. 2020). Adicionalmente, nanopartículas de oro y plata son utilizados en sensores de aplicación colorimétrica, focalización, imágenes de fluorescencia de rayos x, semiconductores, entre otros

En términos generales, se puede clasificar los diferentes métodos de preparación de nanopartículas en dos principales: los métodos “arriba-abajo” y “abajo-arriba”. En el primero, se utiliza fuerzas mecánicas y reacciones químicas que van reduciendo el tamaño de partícula macroscópicas de un sólido hasta llegar a una escala nanométrica. Algunas de las principales formas de las metodologías arriba-abajo son: ablación laser, ultrasonificación, radiación gama, hidrólisis ácida, entre otros.

Por otro lado, en las metodologías de síntesis “abajo-arriba”, se enfocan en principios fisicoquímicos para sintetizar las nanopartículas siguiendo las leyes de la termodinámica. En vez de construirse a partir de macromoléculas para después disminuir su tamaño, se comienza a construir las nanopartículas mediante reacciones químicas, asegurando y controlando el diámetro

de la partícula a lo largo del proceso. Para ello, se debe de asegurar que se utiliza la concentración óptima de reactivos por el tiempo requerido según establece la cinética de reacción. Algunos de los ejemplos de este tipo de procedimientos son: nanoprecipitación, microemulsión, mini emulsión, entre otros.

El tipo de método de preparación que se vaya a escoger dependerá de la materia prima que se esté utilizando, así como las aplicaciones que se requiera para las nanopartículas. Adicionalmente, es importante tomar en cuenta el tamaño de partícula que cada tipo de metodología puede llegar a alcanzar. Sin embargo, este parámetro es muy experimental debido a que depende de muchos factores, no sólo de la metodología utilizada como son las concentraciones, interferencia de contaminación, sustrato etc.

Cuadro 3. Tamaño de nanopartícula según su método de preparación

<b>Fuente</b>	<b>Métodología</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamaño (nm)</b>
Cassava	Ultrasonificación	Arriba-abajo	77.51
Polopropileno	Microemulsión	Abajo-arriba	80-350
Polimetil metacrilato	Microemulsión	Abajo-arriba	50
Almidón	Hidrólisis ácida	Arriba-abajo	132.56-263.38
Almidón	Nanoprecipitación	Abajo-arriba	50-150

Tereftalato de Polietileno	Ultrasonificación	Abajo-arriba	250
Poliestireno	Miniemulsion	Abajo-arriba	1000

(CD Bioparticles, 2025).

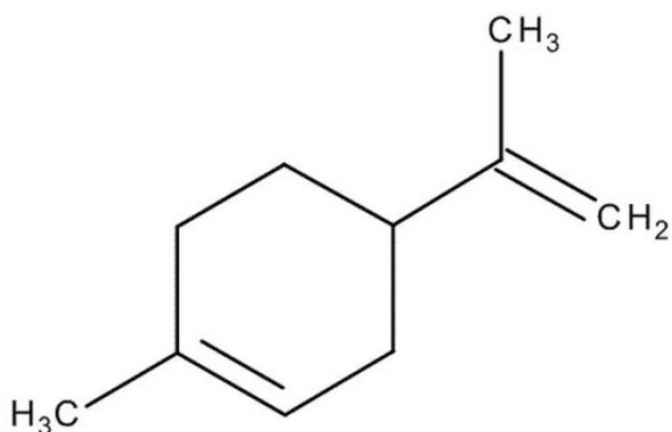
Con este gráfico se puede evidenciar los principales parámetros de resultados que se pueden obtener a partir de algunas sustancias con diferente método de síntesis. Sin embargo, es importante aclarar que los resultados pueden variar de manera significativa según los parámetros experimentales que se tengan. Asimismo, un factor vital a tomar en consideración son las concentraciones de cada uno de los reactivos a utilizar. Ya que la cantidad de cada uno será vital en determinar el tamaño de partícula obtenido.

## F. Limoneno

Para la encapsulación dentro de las nanopartículas se utilizó limoneno como la parte oleosa del estudio. El limoneno es un monoterpeno de naturaleza hidrofóbica, por lo que no es soluble en agua. Adicionalmente, el bajo peso molecular facilita la difusión dentro de la matriz polimérica. Adicionalmente, el encapsulamiento permite alargar la vida del limoneno, permitiendo que se volatilice fácilmente.

El limoneno es un compuesto orgánico natural perteneciente a la familia de los monoterpenos, ampliamente distribuido en la naturaleza, especialmente en aceites esenciales de frutas cítricas como el limón, la naranja, la mandarina y el pomelo. Su nombre deriva precisamente de su alta concentración en la cáscara del limón (*Citrus limon*), aunque también se encuentra en otras especies vegetales. Desde el punto de vista químico, el limoneno es un hidrocarburo cíclico insaturado con fórmula molecular  $C_{10}H_{16}$ , correspondiente a un monoterpeno derivado del isopreno, estructuralmente clasificado como un alqueno cíclico. Su estructura presenta un anillo de ciclohexeno con un grupo isopropenilo en la posición 1 y un grupo metilo en la posición 4, lo que le confiere una geometría asimétrica y da lugar a dos isómeros ópticos: el (R)-(+)-limoneno, de aroma cítrico característico, y el (S)-(-)-limoneno, de olor más herbáceo o a trementina.

Figura 6: Estructura química del limoneno



(Merck,2020)

El limoneno posee diversas propiedades fisicoquímicas que lo hacen particularmente interesante para aplicaciones industriales. Es un líquido incoloro a temperatura ambiente, con una densidad aproximada de 0.841 g/cm<sup>3</sup>, un punto de ebullición de 176 °C, y un punto de fusión cercano a -74 °C. Su presión de vapor moderada y su alta volatilidad le permiten difundirse fácilmente en el aire, lo que contribuye a su uso como agente aromatizante. Es insoluble en agua, pero miscible con la mayoría de los solventes orgánicos, lo cual representa un reto para su formulación en medios acuosos, especialmente en aplicaciones farmacéuticas y alimentarias. Además, presenta una alta reactividad debido a sus enlaces dobles, lo que lo hace susceptible a reacciones de oxidación, polimerización o apertura de anillo bajo ciertas condiciones ambientales, como la exposición prolongada al oxígeno, la luz o temperaturas elevadas.

Las aplicaciones del limoneno son numerosas y abarcan diversos sectores industriales. En la industria alimentaria, se emplea como agente saborizante natural en bebidas, confitería,

productos horneados y suplementos dietéticos, aprovechando su aroma fresco y cítrico. En la industria cosmética y de productos de cuidado personal, el limoneno se utiliza como fragancia en perfumes, jabones, lociones y desodorantes. Además, debido a su origen natural y bajo nivel de toxicidad, ha ganado aceptación como alternativa a solventes derivados del petróleo en formulaciones de productos de limpieza ecológicos y desengrasantes industriales. En el ámbito farmacéutico, estudios recientes han demostrado que el limoneno posee propiedades biológicas relevantes, como actividad antioxidante, antiinflamatoria, antimicrobiana e incluso antitumoral, lo que ha motivado su investigación como principio activo o coadyuvante en terapias complementarias. Su acción se asocia, entre otras cosas, a su capacidad para inducir enzimas del sistema detoxificante hepático y modular vías de señalización celular implicadas en el estrés oxidativo y la inflamación.

A pesar de sus ventajas, el uso del limoneno presenta ciertas limitaciones técnicas derivadas de su inestabilidad y su baja solubilidad en agua. Por ejemplo, su oxidación genera productos secundarios como óxidos y peróxidos que pueden causar irritación o alergias en la piel. Asimismo, su rápida volatilización puede reducir su eficacia en aplicaciones donde se requiere una liberación prolongada. Para superar estos desafíos, se han desarrollado diversas estrategias tecnológicas como la micro y nanoencapsulación, que permiten mejorar su estabilidad fisicoquímica, modular su liberación y aumentar su compatibilidad con sistemas hidrofílicos. Estas tecnologías permiten incorporar el limoneno en matrices poliméricas o lipídicas que lo protegen de factores ambientales, facilitan su manipulación y transporte, y mejoran su biodisponibilidad en aplicaciones terapéuticas o nutracéuticas.

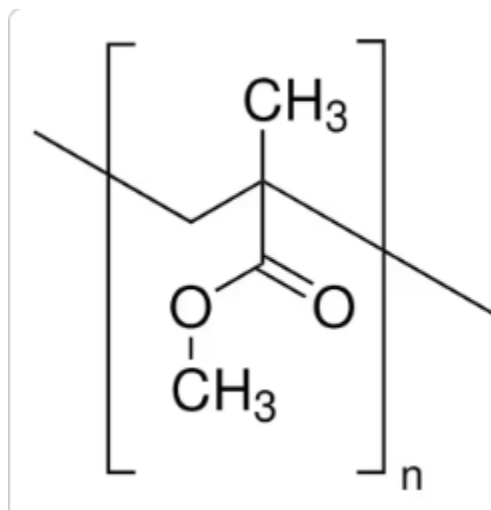
Desde un enfoque medioambiental y económico, el limoneno representa una valiosa alternativa dentro del paradigma de la química verde. Al ser un subproducto de la industria cítrica, especialmente del prensado y destilación de cáscaras, su obtención promueve el aprovechamiento integral de residuos agroindustriales. Además, su biodegradabilidad y baja toxicidad lo hacen una opción más sostenible frente a compuestos sintéticos con funciones similares. Actualmente, el interés por el limoneno continúa creciendo en campos como la formulación de biopesticidas, encapsulación de aceites esenciales, desarrollo de nuevos excipientes, y diseño de materiales funcionales con actividad antimicrobiana.

En resumen, el limoneno es un monoterpeno natural con propiedades fisicoquímicas y biológicas altamente valiosas para una amplia gama de aplicaciones industriales. Su estructura química, su volatilidad, su aroma y sus efectos bioactivos lo convierten en un compuesto versátil, aunque su uso requiere superar ciertas limitaciones mediante técnicas como la encapsulación. En contextos como la farmacología, la cosmética, la alimentación funcional y la ingeniería de materiales, el limoneno representa un recurso natural estratégico que, adecuadamente formulado, puede contribuir al desarrollo de productos más eficaces, seguros y sostenibles.

### G. Polimetilmetacrilato

El polimetilmetacrilato (PMMA) es un polímero termoplástico sintético derivado del monómero metilmetacrilato (MMA), ampliamente utilizado en diversas industrias debido a sus propiedades ópticas, mecánicas y químicas. Su estructura química consiste en una cadena lineal formada por la polimerización radicalaria del MMA, cuya unidad repetitiva está compuesta por un grupo éster metílico unido a un esqueleto carbonado. La fórmula empírica del polímero es  $(C_5O_2H_8)_n$  y su nombre sistemático según la IUPAC es poli (2-metilpropanoato de metilo). El PMMA pertenece a la familia de los polímeros acrílicos y es conocido comercialmente bajo nombres como Plexiglas®, Acrylite, Lucite y Perspex.

Figura 7: Estructura química polimetilmetacrilato



(Sigma Aldrich,2020)

Desde el punto de vista fisicoquímico, el PMMA es un material amorfo, transparente, de bajo peso molecular y con una excelente resistencia a la intemperie. Tiene una densidad aproximada de 1.18 g/cm<sup>3</sup>, una temperatura de transición vítrea (T<sub>g</sub>) entre 100 y 120 °C, y un índice de refracción de 1.49, lo que le confiere una alta transparencia óptica comparable al vidrio. A diferencia de otros plásticos, no contiene bisfenol-A (BPA), lo que lo hace atractivo para aplicaciones donde se requiere contacto con alimentos o con el cuerpo humano. Mecánicamente, el PMMA presenta una buena rigidez y dureza superficial, aunque es más frágil que otros termoplásticos como el policarbonato. También es resistente a la degradación por rayos UV y al envejecimiento térmico, pero puede ser atacado por solventes orgánicos como acetona o tolueno.

La síntesis del PMMA se realiza comúnmente mediante polimerización radicalaria libre, aniónica o controlada, dependiendo del grado de control sobre el peso molecular deseado. En la síntesis por radicales libres, el monómero de metilmetacrilato se disuelve en un medio líquido junto con un iniciador térmico, como el peróxido de benzoilo o el AIBN (azoisobutironitrilo), y se somete a condiciones de temperatura controlada que inducen la formación de radicales libres. Estos radicales atacan el doble enlace del monómero, generando una reacción en cadena que da lugar a la formación del polímero. Alternativamente, el PMMA puede sintetizarse en emulsión, suspensión o solución, según las propiedades de partícula, viscosidad y aplicaciones requeridas. La polimerización en microemulsión es una técnica reciente que ha cobrado relevancia en la fabricación de nanopartículas de PMMA, ya que permite un control más preciso del tamaño, distribución y morfología de las partículas, lo cual es fundamental en aplicaciones biomédicas y farmacéuticas.

El PMMA es considerado un polímero biocompatible, lo que ha favorecido su uso en dispositivos médicos como lentes intraoculares, prótesis dentales, cementos óseos y recubrimientos para liberación controlada de fármacos. En el ámbito de la nanotecnología, el PMMA ha sido explorado como matriz encapsulante para compuestos bioactivos como aceites esenciales, antioxidantes, vitaminas y medicamentos, mediante técnicas como la nanoencapsulación y la formación de nanocápsulas o nanopartículas. Estas formulaciones permiten mejorar la estabilidad, solubilidad y biodisponibilidad de los compuestos encapsulados, así como controlar su liberación en medios fisiológicos. Por su naturaleza hidrofóbica, el PMMA

es especialmente útil para encapsular sustancias lipofílicas, proporcionando una barrera contra la oxidación, volatilización o degradación térmica.

Además, el PMMA ha sido extensamente utilizado en la industria electrónica, óptica y automotriz. Su elevada transparencia y resistencia a los rayos UV lo hacen ideal para la fabricación de paneles solares, pantallas, lentes de seguridad, carcasas de dispositivos electrónicos, y piezas estructurales que requieren estética y durabilidad. En el campo de la ingeniería química, se ha empleado como soporte para catalizadores, membranas y como parte de materiales compuestos. Su procesabilidad mediante técnicas como moldeo por inyección, extrusión y termoformado facilita su integración en sistemas industriales a gran escala.

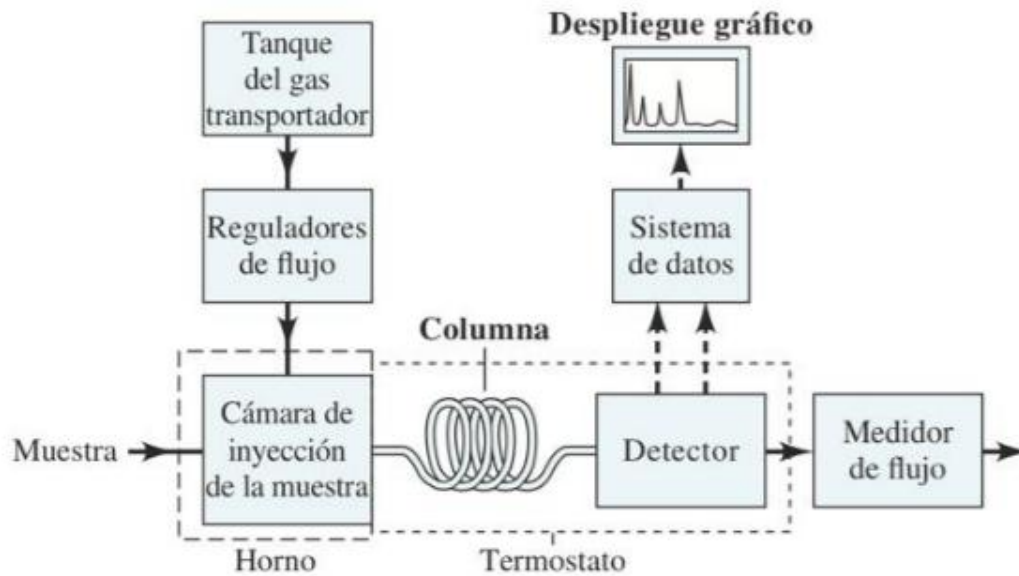
Sin embargo, el uso de PMMA no está exento de desafíos. Su fragilidad bajo impacto, baja resistencia a solventes orgánicos y su naturaleza no biodegradable plantean limitaciones que deben considerarse según la aplicación. Aunque el PMMA es más estable que otros plásticos bajo condiciones ambientales, su persistencia en el ambiente ha motivado investigaciones recientes para el desarrollo de copolímeros biodegradables o mezclas con materiales naturales que mejoren su perfil ecológico. Por otro lado, su compatibilidad con otras fases poliméricas permite modificar sus propiedades mediante copolimerización o la incorporación de plastificantes, surfactantes y aditivos funcionales.

En síntesis, el polimetilmetacrilato es un polímero versátil con una combinación única de propiedades ópticas, mecánicas y químicas, lo cual ha impulsado su uso en múltiples industrias. Su biocompatibilidad, estabilidad térmica y facilidad de procesamiento lo convierten en un material atractivo para aplicaciones tradicionales y emergentes, especialmente en el campo de la nanotecnología y la liberación controlada de sustancias activas. La capacidad del PMMA para formar nanopartículas mediante técnicas como la polimerización en microemulsión amplía sus posibilidades como sistema portador en formulaciones inteligentes, representando una herramienta clave en el desarrollo de soluciones sostenibles e innovadoras para sectores como el biomédico, farmacéutico y ambiental.

## H. Espectrofotometría de gases

La espectrofotometría de gases es una técnica instrumental basada en la interacción de la radiación electromagnética con las moléculas presentes en una muestra gaseosa, utilizada para la identificación y cuantificación de compuestos volátiles y gaseosos. Su principio de funcionamiento se fundamenta en la absorción de energía por parte de las moléculas del gas cuando son expuestas a luz de una determinada longitud de onda. Esta absorción genera una señal característica que puede correlacionarse cuantitativamente con la concentración del gas de interés, permitiendo así su análisis cualitativo y cuantitativo. Las transiciones electrónicas, vibracionales y rotacionales de las moléculas gaseosas dan lugar a bandas de absorción específicas dentro de regiones del espectro ultravioleta (UV), visible (Vis) e infrarrojo (IR), dependiendo de la naturaleza química del gas analizado.

Figura 8: Diagrama de flujo de cromatografía de gases



(Skoog et. al, 2007)

El principio fundamental que rige la espectrofotometría es la ley de Beer-Lambert, la cual establece que la absorbancia ( $A$ ) de una sustancia es directamente proporcional a su concentración ( $c$ ), a la longitud del trayecto óptico ( $l$ ) y al coeficiente de absorción molar ( $\epsilon$ ), es decir:  $A = \epsilon cl$ . Esta relación permite cuantificar la concentración de un gas a partir de la medición de la intensidad

de luz antes y después de atravesar la muestra. En el caso de los gases, se utilizan celdas de absorción con trayectos ópticos de longitud fija, generalmente de vidrio o cuarzo, y con materiales inertes que no reaccionen con los gases. Es fundamental asegurar que el gas se distribuya uniformemente dentro de la celda y que no haya condensación ni reacciones secundarias que interfieran con la medición.

La preparación de la muestra en espectrofotometría de gases es un paso crítico para asegurar la fiabilidad del análisis. En primer lugar, se requiere recolectar el gas en un sistema cerrado que evite la contaminación con el aire ambiente. En algunos casos, se emplean bolsas especiales (como las bolsas Tedlar) o sistemas de muestreo directo mediante bombas que transfieren el gas a la celda espectrofotométrica. La muestra debe estar seca, libre de partículas y a una temperatura constante, ya que factores como la humedad y la presión pueden alterar la absorción espectral. En aplicaciones industriales, los gases suelen diluirse con una corriente inerte (como nitrógeno o helio) para reducir la interferencia de otros componentes o para mantener la linealidad de la señal. Además, en mediciones cuantitativas es importante calibrar el instrumento utilizando gases patrón con concentraciones conocidas, lo que permite generar curvas de calibración para interpretar los resultados de forma precisa.

La espectrofotometría de gases se puede realizar en diferentes rangos del espectro electromagnético, dependiendo del tipo de análisis requerido. La espectrofotometría en el ultravioleta-visible (UV-Vis) se utiliza frecuentemente para la detección de compuestos con dobles enlaces conjugados o con grupos funcionales que absorben en esa región, como los óxidos de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y algunos compuestos orgánicos volátiles. Por otro lado, la espectroscopía infrarroja (IR), particularmente en su modalidad de transformación de Fourier (FTIR), permite analizar gases con enlaces polares, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO) y amoníaco (NH<sub>3</sub>), mediante la detección de sus modos vibracionales característicos. Esta técnica es altamente sensible y específica, ya que cada molécula presenta un patrón único de absorción en el IR, lo que facilita su identificación incluso en mezclas complejas.

Las aplicaciones de la espectrofotometría de gases son amplias y abarcan distintos campos de la ciencia y la tecnología. En el sector ambiental, se emplea para la vigilancia de la calidad del aire, la detección de contaminantes atmosféricos y el monitoreo de emisiones industriales. La

medición de gases como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), ozono y compuestos orgánicos volátiles permite cumplir con las normativas ambientales y prevenir riesgos para la salud pública. En la industria energética y petroquímica, se utiliza para analizar gases en procesos de combustión, craqueo catalítico y reformado, lo que ayuda a optimizar la eficiencia de los sistemas y reducir emisiones contaminantes. En el ámbito médico, la espectrofotometría se aplica en el análisis de gases respiratorios para diagnóstico no invasivo, por ejemplo, en el monitoreo de dióxido de carbono exhalado o en la detección de compuestos traza en el aliento humano. Asimismo, en la investigación científica se usa para estudiar la cinética de reacciones gaseosas, la foto degradación de contaminantes y la caracterización de atmósferas en estudios astrobiológicos.

En conclusión, la espectrofotometría de gases es una herramienta analítica potente, no destructiva y altamente sensible que permite estudiar con precisión la composición de mezclas gaseosas. Su fundamento en la absorción selectiva de radiación electromagnética proporciona una base sólida para el análisis cualitativo y cuantitativo de numerosos compuestos. La correcta preparación de la muestra, el uso de celdas adecuadas y la selección del rango espectral apropiado son aspectos fundamentales para garantizar resultados reproducibles y confiables. Con el desarrollo de nuevas tecnologías y sensores espectrales miniaturizados, esta técnica continúa evolucionando hacia sistemas portátiles y automatizados, facilitando su integración en redes de monitoreo ambiental, procesos industriales y aplicaciones biomédicas avanzadas.

## I. Dispersión dinámica de luz (DLS)

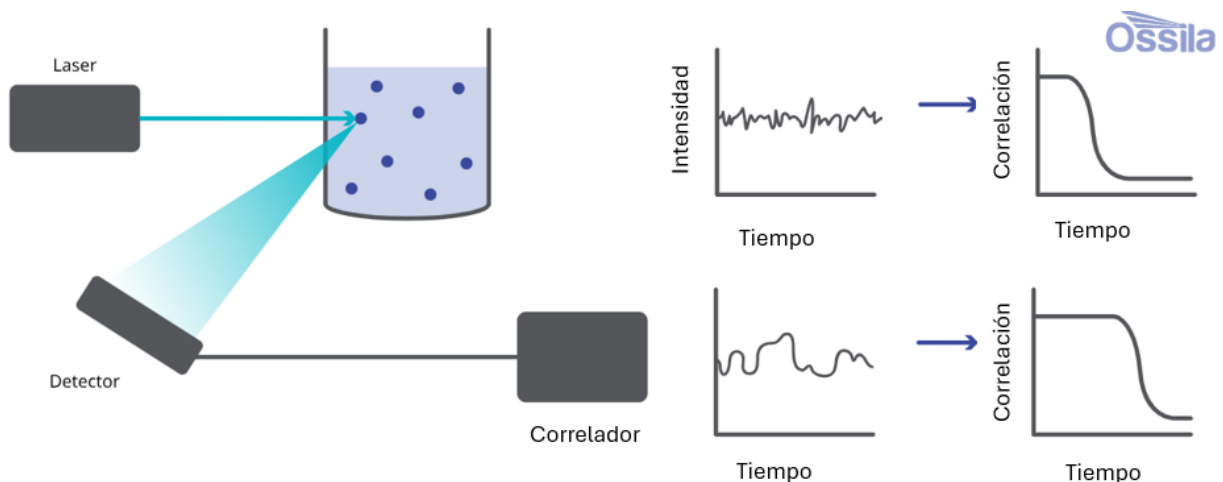
La dispersión dinámica de luz (DLS, por sus siglas en inglés: *Dispersión dinámica de luz*) es una técnica no invasiva utilizada para determinar el tamaño hidrodinámico de partículas en suspensión, particularmente útil en el estudio de nanopartículas, micelas, polímeros, proteínas y sistemas coloidales. Su principio de funcionamiento se basa en el análisis del patrón de fluctuaciones en la intensidad de luz dispersada cuando un haz láser incide sobre un sistema de partículas en movimiento browniano. Estas fluctuaciones son el resultado de los desplazamientos aleatorios de las partículas debido a colisiones térmicas con las moléculas del disolvente, lo que provoca una variación en el patrón de interferencia de la luz dispersada. A partir de estas

fluctuaciones, se calcula el coeficiente de difusión translacional, el cual se relaciona con el diámetro hidrodinámico mediante la ecuación de Stokes-Einstein.

La ecuación de Stokes-Einstein se expresa como  $D = kT / (6\pi\eta r)$ , donde  $D$  es el coeficiente de difusión,  $k$  es la constante de Boltzmann,  $T$  la temperatura absoluta,  $\eta$  la viscosidad del disolvente y  $r$  el radio hidrodinámico de la partícula. El radio hidrodinámico obtenido por DLS incluye no solo el núcleo de la partícula sino también las capas solvatadas o estructuras superficiales asociadas (como surfactantes, polímeros o grupos funcionales), lo que proporciona una medida más funcional del tamaño en el entorno líquido real. Es importante señalar que la técnica supone que las partículas son esféricas y no interactúan significativamente entre sí, lo cual debe tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados.

El instrumento DLS consta típicamente de una fuente de luz láser, un detector (como un fotomultiplicador o detector Avalanche) y un sistema de análisis de correlación. El detector recoge la luz dispersada en un ángulo fijo (comúnmente  $90^\circ$ , aunque en configuraciones avanzadas se usan múltiples ángulos) y registra la intensidad de la señal a lo largo del tiempo. Esta información se procesa mediante una función de autocorrelación, que permite determinar cómo cambia la intensidad con respecto a sí misma en diferentes intervalos temporales. La rapidez con que decae esta función está directamente relacionada con la velocidad de difusión de las partículas, y por tanto, con su tamaño. En sistemas polidispersos, el análisis se realiza mediante algoritmos de regularización matemática como CONTIN, los cuales permiten estimar la distribución de tamaños de partícula a partir de las curvas de correlación.

Figura 9: Funcionamiento de un DLS



(Dr. O’Kane, 2020)

El análisis por DLS ofrece numerosas ventajas, entre las que destacan su rapidez, no destructividad, requerimiento de volúmenes pequeños de muestra y su alta sensibilidad para detectar partículas en el rango de tamaño entre 1 nm y varios micrómetros. Esta técnica es especialmente adecuada para la caracterización de nanopartículas poliméricas, liposomas, emulsiones, proteínas y complejos supramoleculares en condiciones de solución. Su uso ha crecido significativamente en áreas como la nanotecnología, la biotecnología, la industria farmacéutica, la ciencia de materiales y la ingeniería de coloides. Por ejemplo, en el desarrollo de sistemas de liberación controlada de fármacos, el análisis DLS permite verificar la homogeneidad del sistema y monitorear cambios en el tamaño debido a la agregación, degradación o interacción con el medio.

No obstante, la técnica presenta algunas limitaciones que deben considerarse. El análisis DLS es altamente sensible a la presencia de agregados o contaminantes, ya que las partículas más grandes dispersan significativamente más luz que las pequeñas, lo que puede distorsionar el promedio de tamaño reportado. Asimismo, el resultado puede estar sesgado en sistemas con alta polidispersidad o partículas no esféricas, ya que la técnica no distingue formas ni estructuras internas. Por ello, se recomienda complementar los datos de DLS con otras técnicas como microscopía electrónica (SEM, TEM) o análisis de dispersión estática de luz (SLS), especialmente cuando se requiere una caracterización estructural más completa.

La preparación de la muestra es crítica en el análisis DLS. Es esencial trabajar con suspensiones diluidas y homogéneas para evitar efectos de múltiples dispersiones o interacciones intermoleculares. Se recomienda filtrar la muestra con membranas de 0.2 o 0.45  $\mu\text{m}$  para eliminar polvo o agregados no deseados. También es importante eliminar burbujas de aire que puedan interferir con la detección óptica. En casos donde se analiza la estabilidad coloidal, se pueden realizar estudios en diferentes condiciones de pH, fuerza iónica o temperatura, para observar la evolución del tamaño en el tiempo. Los resultados del DLS suelen reportarse como promedio en intensidad, número y volumen, siendo el promedio en intensidad el más sensible a partículas grandes y el más comúnmente utilizado.

En resumen, la dispersión dinámica de luz es una técnica esencial en la caracterización de partículas coloidales y nanométricas en medios líquidos. Su base científica se apoya en la teoría del movimiento browniano y en el análisis estadístico de la luz dispersada, permitiendo obtener de

forma rápida y precisa el tamaño hidrodinámico y la distribución de partículas. Aunque su interpretación requiere cautela en sistemas complejos, el análisis DLS sigue siendo una herramienta de referencia en la investigación y desarrollo de nanomateriales, formulaciones farmacéuticas, sistemas de encapsulación y estudios de estabilidad coloidal.

## J. Agua ultrapura

El agua ultrapura es un insumo fundamental en múltiples áreas de la ciencia, la ingeniería y la industria avanzada, debido a su altísimo grado de pureza química, iónica, orgánica y microbiológica. A diferencia del agua potable o incluso del agua desionizada convencional, el agua ultrapura se caracteriza por contener concentraciones extremadamente bajas de impurezas, lo que la hace indispensable en aplicaciones donde la presencia de contaminantes, aun en trazas, puede afectar de manera significativa la reproducibilidad, eficiencia o calidad de los procesos. En términos generales, puede definirse como agua que ha sido sometida a una serie de tratamientos físicos y químicos diseñados para eliminar prácticamente la totalidad de los iones disueltos, compuestos orgánicos, partículas coloidales, microorganismos y gases disueltos.

Desde el punto de vista fisicoquímico, el agua ultrapura se aproxima a las propiedades del agua teóricamente pura, cuya resistividad eléctrica máxima a 25 °C es de 18.2 M $\Omega$ ·cm, valor que indica una concentración iónica extremadamente baja. El contenido de contaminantes en este tipo de agua suele encontrarse en el orden de partes por billón o incluso menores, lo que la diferencia claramente de otros tipos de agua tratada. Sin embargo, esta alta pureza también implica que el agua ultrapura es altamente reactiva y susceptible a la contaminación secundaria, ya que puede disolver iones de materiales con los que entra en contacto o absorber gases del ambiente, como el dióxido de carbono.

El agua natural contiene una amplia variedad de impurezas provenientes de fuentes geológicas, atmosféricas y biológicas. Entre estas se incluyen sales inorgánicas como cloruros, sulfatos, nitratos y cationes metálicos, así como compuestos orgánicos disueltos, partículas en suspensión y microorganismos. Incluso después de procesos convencionales de tratamiento, como la filtración o la desinfección, el agua sigue conteniendo especies químicas que pueden interferir en procesos sensibles. Aun el agua destilada o desionizada puede contener trazas de contaminantes y es capaz de contaminarse rápidamente al exponerse al aire o a superficies no inertes.

En aplicaciones científicas y tecnológicas avanzadas, como la síntesis de nanopartículas, la preparación de microemulsiones, la industria farmacéutica o el análisis instrumental de alta precisión, la presencia de impurezas puede alterar reacciones químicas, modificar mecanismos de nucleación y crecimiento, afectar la estabilidad coloidal o generar interferencias analíticas. Por esta razón, se requiere el uso de agua ultrapura, la cual proporciona un medio controlado que minimiza la influencia de variables externas no deseadas.

La producción de agua ultrapura se basa en la integración secuencial de diversas tecnologías de purificación, cada una orientada a la remoción de un tipo específico de contaminante. Entre los métodos más utilizados se encuentran la ósmosis inversa, el intercambio iónico, la electrodesionización, la adsorción con carbón activado, la irradiación ultravioleta y la filtración por membranas de tamaño submicrométrico. La ósmosis inversa permite eliminar la mayor parte de los sólidos disueltos totales, mientras que los sistemas de intercambio iónico o electrodesionización reducen aún más la concentración de iones residuales, alcanzando niveles de conductividad extremadamente bajos.

La irradiación ultravioleta desempeña un papel clave en la degradación de compuestos orgánicos y en el control microbiológico, especialmente cuando se emplean longitudes de onda específicas capaces de romper enlaces químicos o inactivar microorganismos. Finalmente, los sistemas de filtración fina aseguran la remoción de partículas y bacterias remanentes. Debido a la alta reactividad del agua ultrapura, los sistemas de almacenamiento y distribución suelen operar en recirculación continua y están fabricados con materiales compatibles que minimizan la liberación de contaminantes.

El agua ultrapura presenta propiedades distintivas que influyen directamente en su comportamiento dentro de los sistemas químicos y físicos. Su elevada resistividad eléctrica es un indicador directo de su bajo contenido iónico, mientras que su pH, teóricamente neutro, puede variar ligeramente debido a la absorción de dióxido de carbono del ambiente. Asimismo, el contenido de carbono orgánico total es extremadamente bajo, lo que resulta crítico en procesos donde la presencia de compuestos orgánicos puede afectar reacciones de polimerización, oxidación o autoensamblaje.

Desde el punto de vista microbiológico, el agua ultrapura contiene niveles mínimos de bacterias, endotoxinas y otros contaminantes biológicos, lo que la hace adecuada para aplicaciones farmacéuticas, biomédicas y de investigación avanzada. No obstante, estas mismas características requieren un manejo cuidadoso, ya que el agua ultrapura puede favorecer la lixiviación de iones desde superficies metálicas o poliméricas si no se utilizan materiales adecuados.

La importancia del agua ultrapura radica en su capacidad para garantizar condiciones altamente controladas en procesos científicos e industriales. En la investigación en nanotecnología, por ejemplo, el uso de agua ultrapura permite mejorar la reproducibilidad experimental y reducir la variabilidad asociada a contaminantes externos. En la industria farmacéutica y de dispositivos médicos, este tipo de agua es esencial para la formulación de productos, la limpieza de equipos y la validación de procesos críticos. De igual manera, en la industria electrónica y de semiconductores, el agua ultrapura es indispensable para el lavado de componentes, donde incluso la presencia de una sola partícula microscópica puede generar defectos significativos.

En conjunto, el agua ultrapura constituye un recurso estratégico para la ciencia y la tecnología modernas. Su obtención requiere sistemas de purificación complejos y un control riguroso de las condiciones de operación y manejo. Comprender sus propiedades, limitaciones y aplicaciones resulta fundamental para asegurar su uso adecuado y para garantizar la calidad, seguridad y reproducibilidad de los procesos en los que se emplea.

## V. ANTECEDENTES

### A. Síntesis de nanopartículas de polimetilmetacrilato por microemulsión diferencial (Yuang et al., 2012)

Estudios anteriores han demostrado la viabilidad de síntesis de nanopartículas de polimetilmetacrilato, haciendo uso de diferentes iniciadores y surfactantes. Yuan et al., (2012) estudiaron los efectos de tamaño de partícula al variar la concentración de monómero, temperatura y concentración de iniciador. Se reportó que al incrementar la concentración de iniciador en la reacción se evidencia que existe una relación directamente proporcional con el tamaño de partícula. Los autores reportan que se debe a un aumento de sitios activos en las reacciones de polimerización. Esto genera una mayor largo de cadena y por lo tanto un mayor tamaño de partícula. Si se llega a la concentración crítica micelar, al usar una menor concentración de iniciador se obtendrá un tamaño de partícula reducido.

Adicionalmente, los autores reportan una estrecha relación entre la concentración de surfactante y el tamaño de partícula. Es vital que se llegue a la concentración crítica micelar para que haya formación de micelas. Sin embargo, al aumentar la concentración de surfactante se evidencia inicialmente una reducción de tamaño de partícula, pero llega un punto donde la concentración de surfactante es tan alta que el tamaño de partícula aumenta ligeramente y luego se mantiene estable. Los autores explican que esto se debe a la acción del surfactante y del tipo. Para la polimerización de metilmetacrilato, surfactantes aniónicos logran un menor tamaño de partícula.

El estudio de Yuan y Wang, establece una relación importante entre el tamaño de partícula y la temperatura. De manera análoga al surfactante, al incrementar la temperatura de la reacción, se ve una disminución de tamaño de partícula, sin embargo, llega un punto donde aumenta el tamaño de manera más grande que con el surfactante. En este caso, casi se llega a doblar el tamaño de partícula más pequeño.

## B. Encapsulación de limoneno en nanopartículas poliméricas para aplicaciones en empaques de alimentos Eleftherios et al., (2021)

Eleftherios et al., (2021) estudiaron el encapsulamiento de limoneno en nanopartículas de polimetilmetacrilato. Mediante análisis termogravimétricos analizaron el porcentaje de limoneno encapsulado. Debido a la baja concentración de limoneno empleada durante la encapsulación, reportaron casi un 100 % de eficiencia de encapsulación. Al usar la metodología de la microemulsión para la síntesis de las nanopartículas, se valida el uso del proceso de encapsulación en las nanopartículas. Adicionalmente, se estudió la liberación del limoneno en sistemas bacterianos, donde reportaron los efectos del limoneno en las bacterias con un resultado positivo.

## C. Síntesis de PMMA nanopartículas por microemulsión vaporizando el monómero Chen et al., (2010)

Chen et al., (2010) realizaron un estudio de síntesis de nanopartículas de polimetilmetacrilato haciendo uso de un reactor donde introdujeron el monómero en forma de vapor. En este estudio determinaron cual es el efecto de volatilizar el metilmetacrilato y mediante un sistema de distribución de vapor lo introdujeron dentro de la mezcla con el iniciador y surfactante.

Al igual que en el presente trabajo de graduación, los investigadores emplearon el mismo monómero y surfactante. Sin embargo, en vez de utilizar peróxido de benzoilo utilizaron persulfato de potasio. Adicionalmente, la temperatura de reacción que emplearon fue menor ya que operaron entre 70 y 80 grados centígrados. Sin embargo, reportaron tamaños de partícula más grandes a los obtenidos en este trabajo de graduación. Tras realizar 14 corridas experimentales, solo 5 muestras dieron tamaños de partícula menores a 20 nm. El resto de las corridas se encontraban entre 20 y 40 nanómetros de diámetro.

El estudio reporta que se logró un tamaño realizar una separación de las partículas mediante el uso de una membrana de diálisis. Con este procedimiento se pudo analizar cantidad de sólidos en suspensión y asimismo se realizó un análisis de microscopía electrónica de barrido.

La variación de surfactante de los estudios de Wenbao Chen y Xuyan Liu, demostraron una relación entre la concentración del surfactante y del tamaño de partícula. Al aumentar la concentración, disminuye el tamaño de partícula hasta llegar a un límite. Para ellos, el límite fue

17.2 nm. Adicionalmente, reportan que un exceso de monómero provoca un aumento de tamaño de partícula importante en los resultados. Por este motivo, es mejor emplear una menor cantidad de monómero.

#### D. Polimerización en emulsión de metacrilato de metilo en presencia de óxido de zinc Reyes et al., (2017)

Reyes et al., (2017) realizaron un estudio de cinética de la polimerización de polimetilmetacrilato. Realizaron mediciones de tamaño de partícula a diferentes tiempos de reacción. Adicionalmente, reportaron la cantidad de nanopartículas formadas a diferentes intervalos de tiempo.

Con base a sus resultados, los investigadores determinaron que la polimerización de polimetilmetacrilato es una reacción rápida. Después de 10 minutos no se reportaron aumento de la cantidad de nanopartículas sintetizadas. Adicionalmente, el tamaño de partícula no aumentó después de ese tiempo reportado. Con esto se puede evidenciar que no es necesario mantener la reacción por un largo periodo de tiempo.

A diferencia de los parámetros establecidos en este trabajo de graduación, los autores utilizaron una temperatura fija de 70 grados centígrados. Adicionalmente, de surfactante utilizaron Aerosol MA-80 y persulfato de amonio de iniciador. Estos parámetros afectan la velocidad de reacción por lo que puede haber cierta variación con lo presentado en este trabajo. Sin embargo, se evidencia amplia variabilidad en sus datos, con tamaños de partícula entre 50 y 250 nm de diámetro.



## VI. METODOLOGÍA

### A. Preparación prueba piloto

#### Reactivos

80 mL de agua

14 mL aceite vegetal

0.789g de dodecil sulfato sódico (SDS)

#### Cristalería

1 beaker 250 mL, Kimax

1 termómetro

1 vidrio de reloj

1 probeta de 25 mL

12 tubos de ensayo de 10 mL

#### Equipo

1 estufa con agitación, marca Vevar

1 balanza analítica, marca Ohaus

1 agitador magnético

## Procedimiento

1. En un vidrio de reloj, se pesó 0.789 g de detergente comercial haciendo uso de la balanza analítica.
2. Se agregó 80 mL de agua a un beaker de 250 mL.
3. Se calentó hasta 75 grados celcius con una agitación constante de 600 rpm.
4. Se midió 14 mL de aceite vegetal
5. Cuando el sistema se estabilizó a la temperatura deseada, se agregó 14 mL de aceite.
6. Se dejó emulsionar durante 15 minutos.
7. Después de cumplido el plazo de tiempo descrito anteriormente, el sistema se dejó enfriar hasta temperatura ambiente.
8. Se tomó una muestra de 10 mL usando un tubo de ensayo.
9. Después de concluir el procedimiento descrito anteriormente, se procedió a repetir los pasos 1-8 15 veces más para un total de 12 pruebas. Se varió la temperatura en incremento de 5 grados hasta llegar a 85 grados celcius. Adicionalmente, se varió la velocidad de agitación en intervalos de 100 rpm hasta llegar a 900, para poder realizar el análisis factorial.

Cuadro 4: Resumen de experimentación para prueba piloto

Corrida	Volumen de agua (mL)	Volumen de aceite (mL)	Peso (SDS) (g)	Temperatura (°C)	Agitación (rpm)
1	80	14	0.789	75	600
2	80	14	0.789	75	700
3	80	14	0.789	75	800
4	80	14	0.789	75	900
5	80	14	0.789	80	600
6	80	14	0.789	80	700
7	80	14	0.789	80	800
8	80	14	0.789	80	900
9	80	14	0.789	85	600
10	80	14	0.789	85	700
11	80	14	0.789	85	800

12	80	14	0.789	85	900
----	----	----	-------	----	-----

Nota: En el cuadro anterior se establece un resumen de la preparación y ejecución del procedimiento experimental descrito anteriormente con un tiempo de reacción de 15 minutos. Elaboración propia (2025).

## B. Preparación nanopartículas

### Reactivos

10 mL metil metacrilato (MMA)

0.789g de dodecil sulfato sódico (SDS)

0.02 g de peróxido de benzoilo (BPO)

Nitrógeno gaseoso

80 mL de agua destilada

2 mL de gluconato de clorhexidina

### Cristalería

1 condensador de reflujo Pyrex

1 embudo de adición Pyrex, 100 mL

2 beaker Pyrex, 250 mL

1 probeta, Kimax 25 mL

1 vidrio de reloj

1 adaptador de entrada de termómetro

4 tubos de ensayo de 10 mL

1 matraz de tres cuellos, Stony lab 500 mL

1 matraz Schlenk

Un accesorio en forma de y

1 pipeta de 10 mL, marca kimax

#### Equipo

2 estufas, marca vevar

2 mangueras de plástico de 50 cm.

1 manguera de plástico de 3 metros.

1 agitador magnético ovalado

1 balanza analítica, marca Ohaus

1 recipiente de aluminio 750 mL

2 soportes universales

3 pinzas de laboratorio

#### Procedimiento

1. Se esterilizó el matraz de 3 cuellos con 2 mL de gluconato. Se lavó con agua durante 2 minutos para eliminar cualquier residuo.
2. Se agregó 350 mL de agua al recipiente de aluminio y se colocó sobre una de las estufas.
3. Se armó el reactor con la cristalería indicada, colocando el balón de tres cuellos en el recipiente de aluminio.
4. En el orificio del centro se colocó el condensador de reflujo, asegurado en un soporte universal con 2 pinzas.
5. En el orificio izquierdo se colocó el termómetro con su respectivo adaptador.
6. En el orificio derecho del balón se colocó el accesorio en forma de “y”. En un orificio se colocó el Schlenk y en el otro el embudo de adición.
7. Colocar 1 manguera de 50 cm al matraz Schlenk.

8. Se expuso el sistema a un flujo de nitrógeno constante durante un minuto. Tras haber concluido el tiempo, se cerró el flujo de nitrógeno al matraz Schlenk.
9. Con la probeta medir 80 mL de agua destilada y colocarla en un beaker de 250 mL.
10. Se midió la cantidad requerida de dodecil sulfato en un vidrio de reloj y se agregó al beaker con el agua destilada.
11. Se pesó 0.02 g del iniciador en el vidrio de reloj para verterlo al beaker con el agua destilada y el surfactante.
12. En la estufa se colocó el beaker con el iniciador y el surfactante para someterlo a una agitación de 900 rpm con el agitador magnético mientras se precalentaba a 70 C hasta que se disolvieron los reactivos.
13. Después de asegurar sello del sistema para evitar la entrada del oxígeno, se agregó agua al condensador de reflujo mediante un sistema de mangueras.
14. Se calentó el sistema experimental hasta 80 grados centígrados sin haber medido los reactivos.
15. Se agregó la solución con el iniciador y el surfactante al balón de tres cuellos y se esperó hasta estabilizar la temperatura a 80 grados celcius, con agitación constante a 900 rpm.
16. Se esperó a que la temperatura se estabilizara en 80 grados celcius.
17. Con la probeta se midió 10 mL de metil metacrilato.
18. Se vertió el metil metacrilato al embudo de adición.
19. Se fue goteando el metil metacrilato al matraz de 3 cuellos.
20. Se repitió todo el proceso un total de 4 veces aumentando la concentración de surfactante.

Cuadro 5: Resumen de preparación de nanopartículas de polimetilmetacrilato

Concentración SDS (m/m)	Peso surfactante (SDS) (g)	Peso iniciador (BPO) (g)	Volumen monómero (MMA) (mL)
5 %	0.47	0.094	10
10 %	0.94	0.094	10
20 %	1.88	0.094	10
30 %	2.82	0.094	10

Nota: En el cuadro anterior se resume como se realizó el procedimiento experimental explicado anteriormente para la preparación de las 4 muestras de polimetilmetacrilato. Elaboración propia (2025).

## C. Preparación partículas encapsuladoras

### Reactivos

10 mL metil metacrilato

0.94g de dodecil sulfato sódico

0.02 g de peróxido de benzoilo

Nitrógeno gaseoso

80 mL de agua destilada

2 mL de gluconato de clorhexidina

5 mL de cloroformo al 99%.

### Cristalería

1 condensador de reflujo Pyrex

1 embudo de adición Pyrex, 100 mL

2 beaker Pyrex, 250 mL

1 beaker Pyrex, 100 mL

1 probeta, Kimax 25 mL

1 vidrio de reloj

1 adaptador de entrada de termómetro

4 tubos de ensayo de 10 mL

1 matraz de tres cuellos, Stony lab 500 mL

1 matraz Schlenk

Un accesorio en forma de y

1 pipeta de 1 mL, marca kimax

## Equipo

- 2 estufas, marca vevar
- 2 mangueras de plástico de 50 cm.
- 1 manguera de plástico de 3 metros.
- 1 agitador magnético ovalado
- 1 balanza analítica, marca Ohaus
- 1 recipiente de aluminio 750 mL
- 2 soportes universales
- 3 pinzas de laboratorio

## Procedimiento

1. Se esterilizó el matraz de 3 cuellos con 2 mL de gluconato. Se lavó con agua durante 2 minutos para eliminar cualquier residuo.
2. Se agregó 350 mL de agua al recipiente de aluminio y se colocó sobre una de las estufas.
3. Se armó el reactor con la cristalería indicada, colocando el balón de tres cuellos en el recipiente de aluminio.
4. En el orificio del centro se colocó el condensador de reflujo, asegurado en un soporte universal con 2 pinzas.
5. En el orificio izquierdo se colocó el termómetro con su respectivo adaptador.
6. En el orificio derecho del balón se colocó el accesorio en forma de “y”. En un orificio se colocó el Schlenk y en el otro el embudo de adición.
7. Colocar 1 manguera de 50 cm al matraz Schlenk.
8. Se expuso el sistema a un flujo de nitrógeno constante durante un minuto. Tras haber concluido el tiempo, se cerró el flujo de nitrógeno al matraz Schlenk.
9. Con la probeta medir 80 mL de agua destilada y colocarla en un beaker de 250 mL.
10. Se midió la cantidad requerida de dodecil sulfato en un vidrio de reloj y se agregó al beaker con el agua destilada.

11. Se pesó 0.02 g del iniciador en el vidrio de reloj para verterlo al beaker con el agua destilada y el surfactante.
12. En la estufa se colocó el beaker con el iniciador y el surfactante para someterlo a una agitación de 900 rpm con el agitador magnético mientras se precalentaba a 70 C hasta que se disolvieron los reactivos.
13. Después de asegurar sello del sistema para evitar la entrada del oxígeno, se agregó agua al condensador de reflujo mediante un sistema de mangueras.
14. Se calentó el sistema experimental hasta 80 grados centígrados sin haber metido los reactivos.
15. Se agregó la solución con el iniciador y el surfactante al balón de tres cuellos y se esperó hasta estabilizar la temperatura a 80 grados celcius, con agitación constante a 900 rpm.
16. Se esperó a que la temperatura se estabilizara en 80 grados celcius.
17. Con la probeta se midió 10 mL de metil metacrilato.
18. Se vertió el metilmetacrilato en un beaker con agitador magnético.
19. Se colocó limoneno en un beaker de 100 mL y con una pipeta de 1 mL, se midieron 3 mL.
20. Se colocó el limoneno en el beaker con el metilmetacrilato.
21. Se tapó el beaker con papel Parafilm para evitar evaporación del limoneno.
22. Agitar a 300 rpm la mezcla de limoneno con metilmetacrilato durante 5 minutos.
23. Se fue goteando la mezcla al matraz de 3 cuellos.
24. Dejar reaccionar durante 25 minutos.
25. Transcurrido el tiempo, con una de la manguera del Schlenk, vaciar el recipiente de aluminio haciendo un sifón.
26. Llenar el recipiente con agua fresca para bajar la temperatura
27. Esperar a que la temperatura del reactor baje a temperatura ambiente.
28. Cuando se haya enfriado el sistema, quitar el termómetro con su adaptador.
29. Verter 5 mL de cloroformo en un beaker con agitador magnético
30. Tomar una alícuota de 1 mL con la pipeta y su bulbo.
31. Verter la alícuota en el beaker con cloroformo, taparlo con papel Parafilm y agitar durante 15 minutos.
32. Verter la solución en un embudo de decantación.
33. Separar en un beaker el sobrenadante.

34. El sobrenadante deberá guardarse en un tubo de ensayo para su análisis.

#### D. Análisis en Dispersión dinámica de luz (DLS)

##### Reactivos

4 muestras de 10 mL de partículas de polimetilmetacrilato

108 mL de agua ultrapura

##### Cristaleria

1 pipeta de 10 mL

1 pipeta de 1 mL

1 tubo de ensayo de 10 mL

##### Equipo

Analizador de Potencial Zeta y Tamaño de Partícula ELSZ-1000ZS (DLS), (Otsuka Electronics Co., Ltd., Osaka, Japón.)

1 jeringa de 10 mL

4 filtros jeringas de 0.45  $\mu\text{m}$ , marca UNIFLO

##### Procedimiento.

1. Trasvasar 1 muestra de 10 mL de partículas de polimetilmetacrilato a una jeringa de 10 mL.
2. Filtrar con un filtro de jeringa de 0.45  $\mu\text{m}$ .
3. Almacenar en un tubo de ensayo de 10 mL.
4. Repetir paso 1-3 para cada muestra, con un total de 4 repeticiones.

5. Tomar una alícuota de 1mL de una de las muestras de partículas de polimetilmetacrilato.
6. Trasvasar 9 mL de agua ultrapura a un tubo de ensayo haciendo uso de una pipeta de 10 mL.
7. Colocar muestra en equipo DLS.
8. Colocar ángulo de láser a 173°.
9. Analizar durante 60 segundos.
10. Realizar triplicado.
11. Repetir los pasos 5-9 para cada muestra.

### E. Costeo simple

Reactivos

N/A

Cristalería

N/A

Equipo

N/A

Procedimiento:

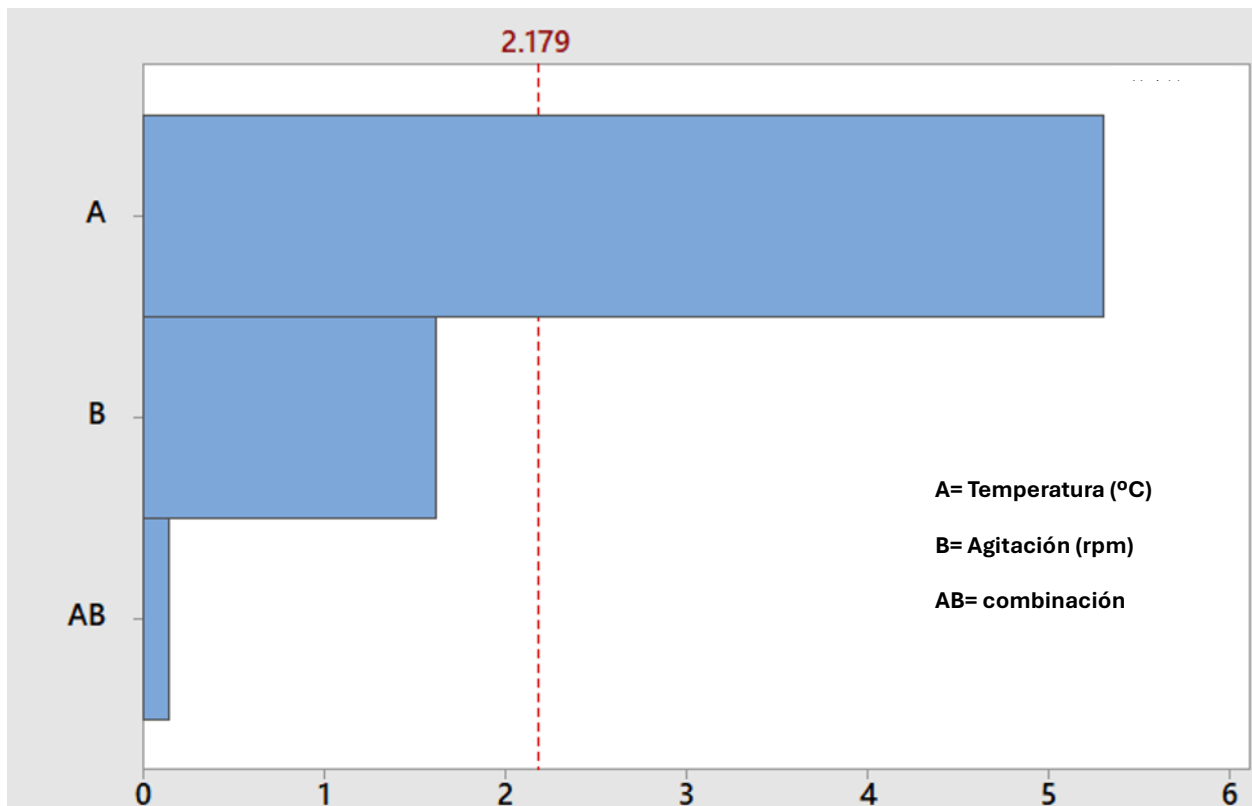
1. Registrar características fisicoquímicas de los reactivos utilizados, como pureza, marca, cantidad de la presentación utilizada, etc.
2. En la página de Merck Millipore buscar los compuestos utilizados y realizar una cotización.
3. Listar los costos y calcular el precio unitario.
4. Multiplicar el precio unitario por la cantidad utilizada para determinar el costo total utilizado de cada reactivo y sumarlo.
5. Investigar en la página del banco de Guatemala el tipo de cambio utilizado a la fecha.



## VII. RESULTADOS

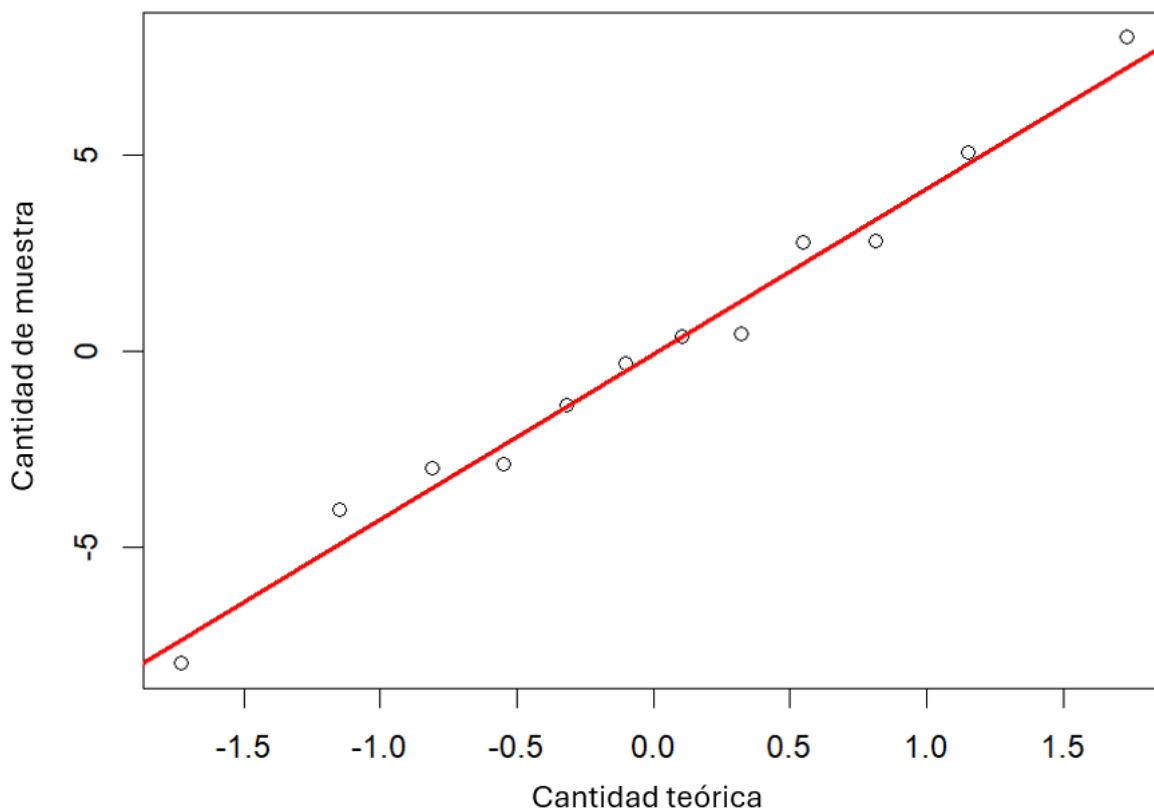
### A. Análisis factorial

Figura 10: Pareto de resultado de análisis factorial para determinar la influencia de la temperatura con el tiempo de estabilidad termodinámica del sistema



Nota: En la Figura anterior se demuestra el Pareto llevado a cabo en el software Minitab, donde el factor A es la temperatura (°C), el factor B es la velocidad de agitación (rpm) y AB es la combinación de los dos factores anteriores. Se varió las temperaturas (75,80 y 85) °C y la agitación con (600,700,800 y 900) rpm. Elaboración propia (2025).

Figura 11: Diagrama Q-Q de normalidad de los residuos obtenidos del análisis factorial



Nota: En la gráfica anterior se elaboró con el software Minitab, con los resultados experimentales del análisis factorial variando la temperatura (75,80,85) °C y la velocidad de agitación (600,700,800,900) rpm. Elaboración propia (2025).

Cuadro 4: Resultados estadísticos de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk de los residuos del análisis factorial

Parámetro	Resultado
Valor-p	0.9991
Valor-W	0.98799

Nota: En el cuadro anterior se demuestran los resultados de prueba de normalidad llevado a cabo en el software Minitab del análisis factorial variando la temperatura (75,80,85) °C y la velocidad de agitación (600,700,800,900) rpm. Elaboración propia (2025).

Cuadro 5: Resultados de prueba ANOVA de los resultados experimentales del análisis factorial

	Grados de libertad	Ajuste SS	Ajuste MS	Valor-F	Valor-P

T (Celcius)	2	7214	3607.02	28.16	<0.001
rpm	3	678	226.24	2.62	0.131
T(Celcius*rpm)	1	753.44	548.63	0.02	0.891
Error	6	2510.23			
Total	12	8044.2			

Nota: El cuadro anterior fue elaborado haciendo uso del software Minitab, donde el Ajuste SS es la suma de cuadrados y Ajuste MS es el ajuste de cuadrados medios. Esta prueba se realizó variando los valores experimentales del análisis factorial variando la temperatura (75,80,85) °C y la velocidad de agitación (600,700,800,900) rpm. Elaboración propia (2025).

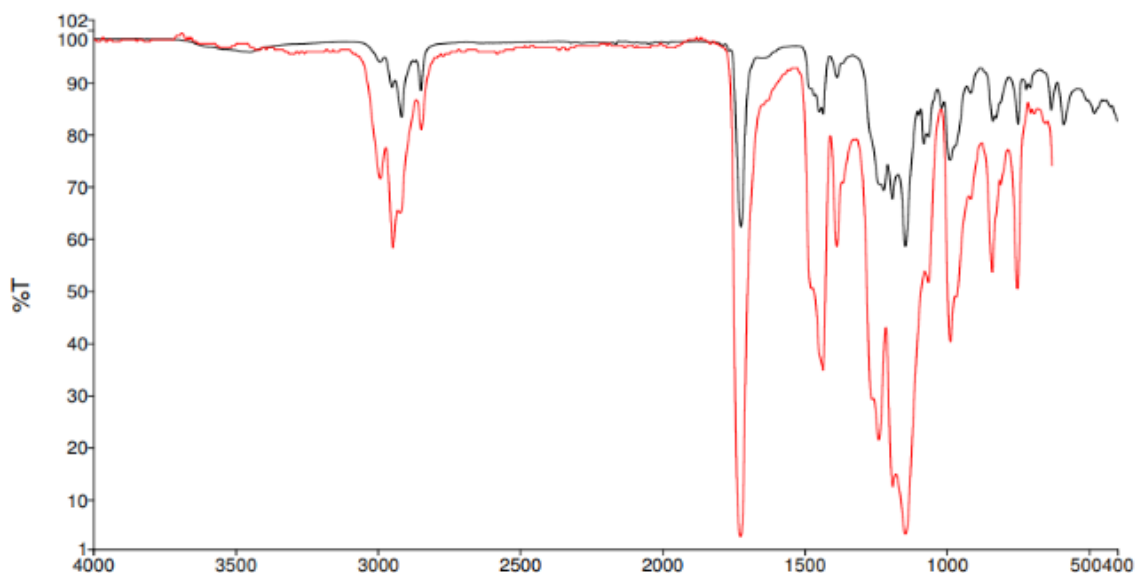
Cuadro 6: Resultados de análisis factorial para los parámetros que prologan la estabilidad de la emulsión

Velocidad de agitación (rpm)	Temperatura °C	Tiempo de estabilidad experimental (h)
600 rpm	75	4
	80	8
	85	12
700 rpm	75	21
	80	34
	85	36
800 rpm	75	43
	80	56
	85	63
900 rpm	75	72
	80	81
	85	105

Nota: En el cuadro anterior se demuestran los parámetros que prolongan la estabilidad termodinámica de las emulsiones, obtenidos mediante un análisis factorial llevado a cabo usando el software Minitab variando la temperatura (75,80,85) °C y la velocidad de agitación (600,700,800,900) rpm y su respectivo esfuerzo cortante donde se evidencia que el tiempo de mayor tiempo experimental es con 900 rpm y 85 °C. Elaboración propia (2025).

## B. Resultado de tamaño de partícula y espectrofotometría de infrarrojo

Figura 12: Espectro de espectrofotometría de infrarrojo de la polimerización del polimetilmetacrilato por microemulsión



Nota: El espectro anterior fue elaborado con los resultados de análisis de espectrofotometría de infrarrojo del laboratorio de análisis instrumental avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025)

Cuadro 7: Longitudes de onda característicos de polimetilmetacrilato (PMMA) en análisis espectrofotometría de infrarrojo (IR)

Longitud de onda teórico (cm <sup>-1</sup> )	Longitud de onda experimental (cm <sup>-1</sup> )
2900	2920.1
1700	1724.12
1400	1435.06
1100	1144.18

Nota: El cuadro anterior se compararon las longitudes de onda característicos del análisis IR del polimetilmetacrilato experimental y los teóricos obtenidos del Manual de transformación de Fourier y espectros infrarrojos de los polímeros (Kupstov, 1998). Elaboración propia (2025).

Cuadro 8: Tabla de resultados de tamaño de partícula de análisis de dispersión dinámica de luz (DLS) para cada triplicado de cada corrida experimental

No. De muestra	5 % m/m SDS (nm)	DE/nm	10 % m/m SDS (nm)	DE/nm	20 % m/m SDS (nm)	DE/nm	30 % m/m SDS (nm)	DE/nm
1	38.1	9.6	17.7	4.8	18.9	5.2	19.0	5.1
2	44.7	10.1	17.9	4.9	21.4	5.8	18.9	5.1

3	39.7	9.7	18.9	5.1	20.4	5.6	19.2	5.1
Promedio	<b>40.83</b>	<b>9.8</b>	<b>18.16</b>	<b>4.9</b>	<b>20.23</b>	<b>5.5</b>	<b>19.03</b>	<b>5.1</b>

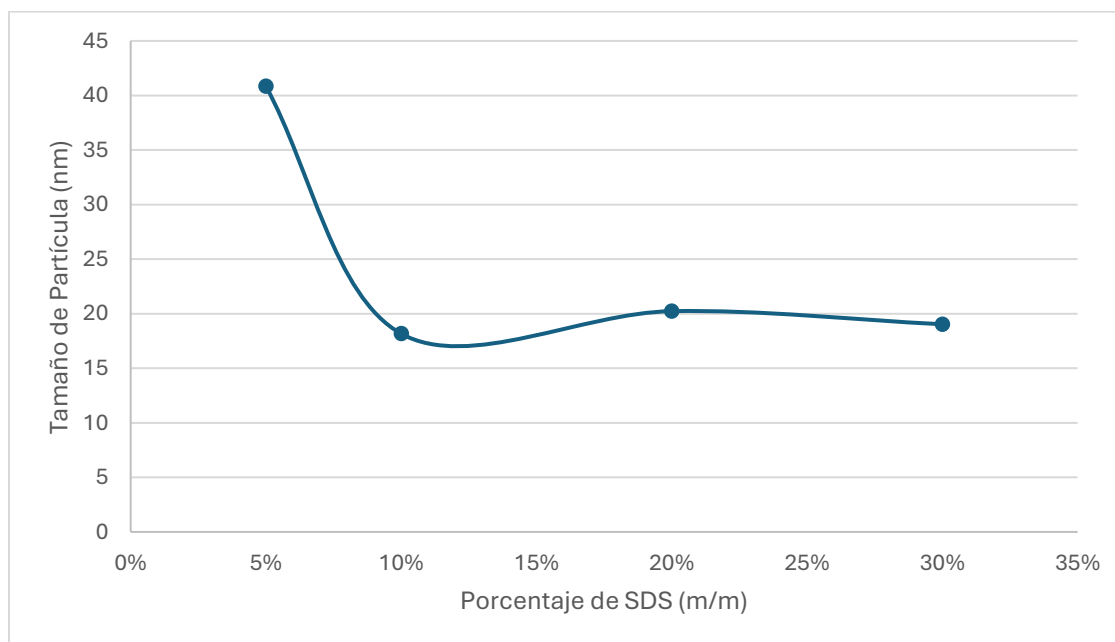
Nota: En el cuadro anterior se demuestran los resultados de análisis de tamaño de partícula obtenidos con el analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Dónde SDS es concentración de dodecilsulfato sódico (m/m), DE es desviación estándar y nm es nanómetros. Elaboración propia (2025).

Cuadro 9: Resultados de análisis ANOVA de tamaño de partícula variando concentración de surfactante 5 %,10 %,20 % y 30 % (m/m)

	Grados de libertad	Ajuste SS	Ajuste MS	Valor-F	Valor-P
Factor	1	1198.1	1198.1	20.43	0.004
Error	6	351.8	58.63		
Total	7	1549.8			

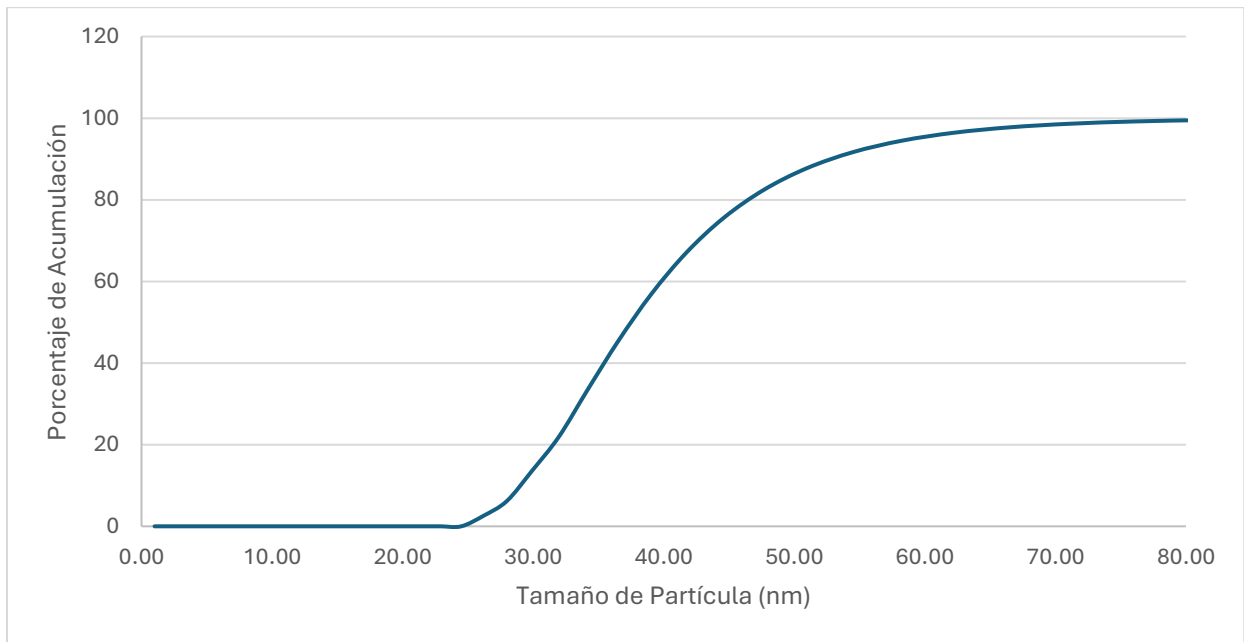
Nota: El cuadro anterior fue elaborado con el software de estadística Minitab del resumen de tamaño de partícula del cuadro 8. Dónde el Ajuste SS es la suma de cuadrados y el Ajuste MS son los cuadrados medios. Elaboración propia (2025).

Figura 13: Relación del promedio de tamaño de partícula (nm) variando concentración de surfactante 5 %,10 %, 20 % y 30 % (m/m)



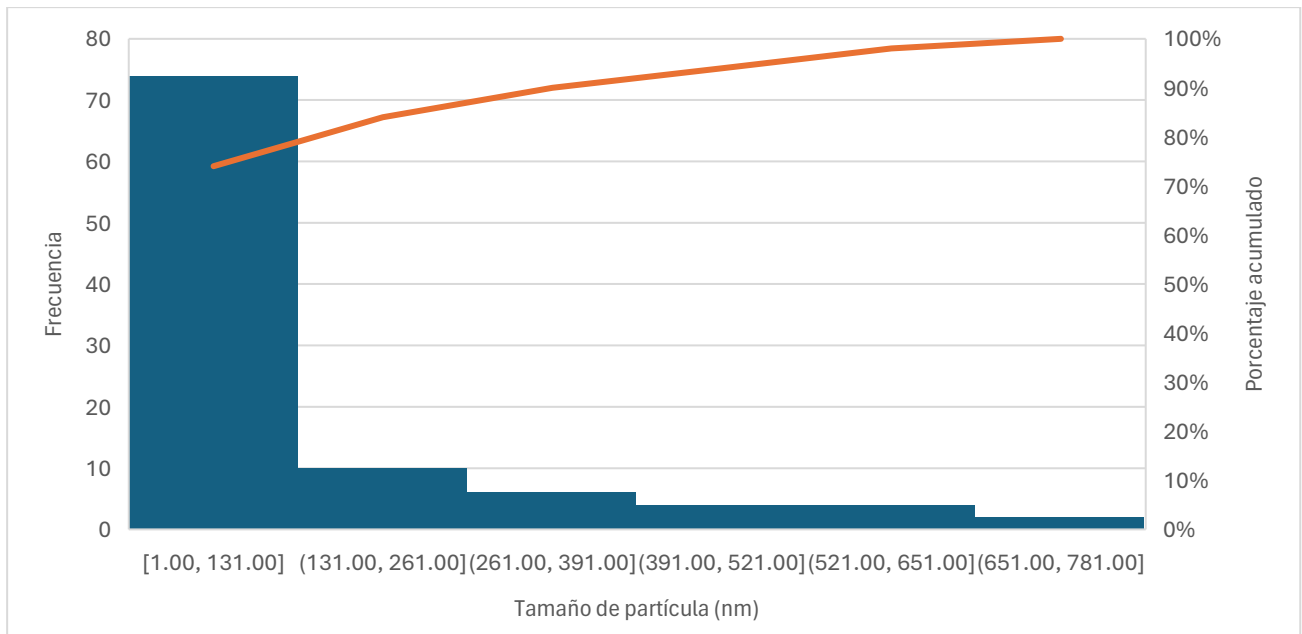
Nota: En el gráfico anterior se evidencia los resultados experimentales graficados con línea suavizada en la hoja de cálculo Excel, los resultados fueron obtenidos del análisis realizado con el analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Dónde SDS es dodecilsulfato sódico. Elaboración propia (2025).

Figura 14: Acumulación vs tamaño de partícula (nm), del triplicado de la muestra utilizando una concentración de 5 % m/m de dodecilsulfato sódico (SDS)



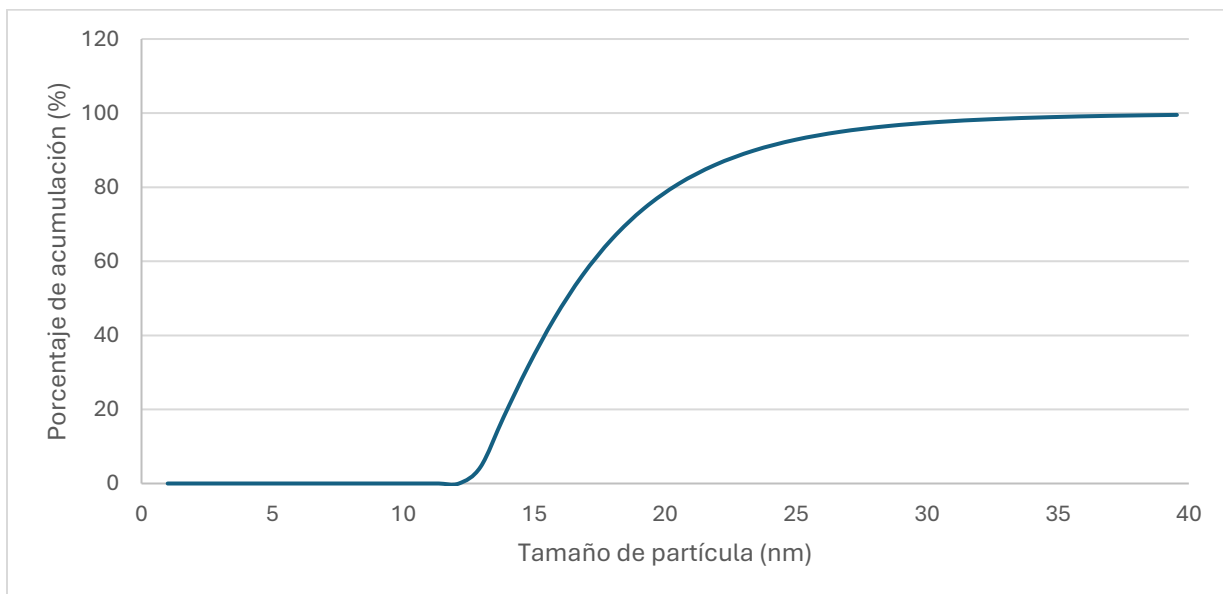
Nota: En el gráfico anterior se demuestra el resultado experimental del promedio del triplicado del análisis de tamaño de partícula de la primera muestra mediante una línea suavizada en Excel del análisis hecha por el analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración propia (2025).

Figura 15: Histograma de distribución de tamaño de partícula y porcentaje acumulado del triplicado de la muestra con concentración de 5 % m/m de dodecilsulfato sódico (SDS)



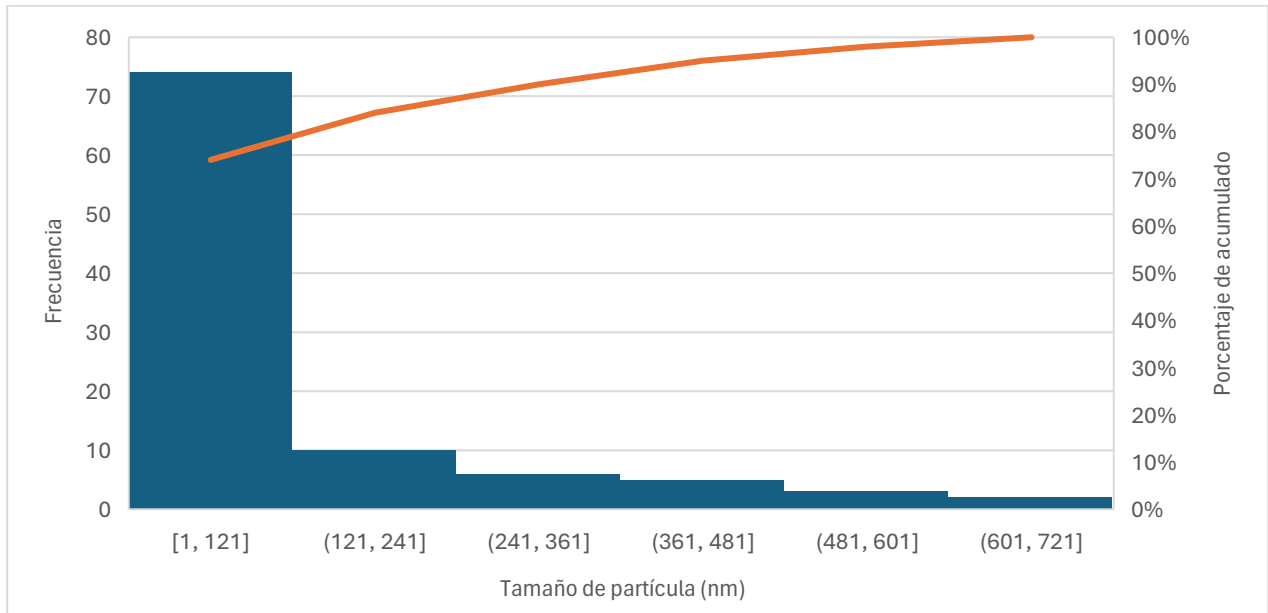
Nota: En la Figura anterior se demuestra el histograma del análisis del triplicado de la primera muestra utilizando los resultados del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración propia (2025).

Figura 16: Grafico de tamaño de partícula (nm) y porcentaje de acumulación, del promedio del triplicado de la segunda muestra con concentración de 10 % m/m de dodecilsulfato sódico (SDS)



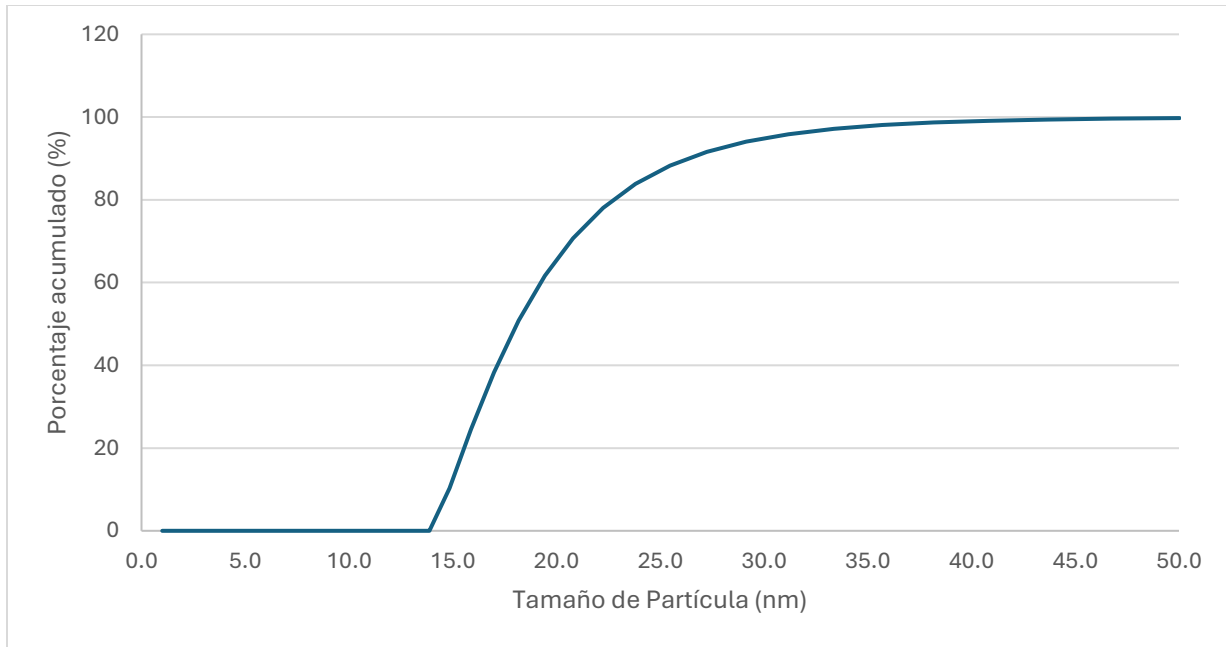
Nota: En el gráfico anterior se demuestra el resultado del porcentaje de acumulación de tamaño de partícula del análisis realizado por el analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración propia (2025).

Figura 17: Histograma de distribución de tamaño de partícula (nm) y porcentaje acumulado con concentración de 10 % m/m de dodecilsulfato sódico (SDS)



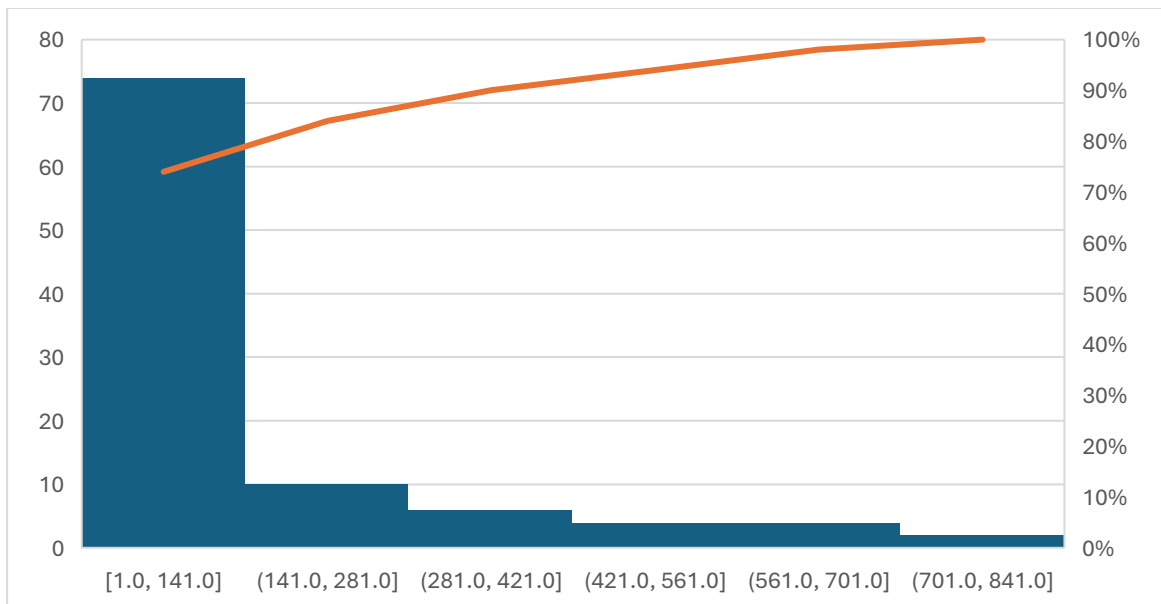
Nota: En la Figura anterior se demuestra el histograma del análisis del triplicado de la segunda muestra utilizando el analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración propia (2025).

Figura 18: Porcentaje de acumulación vs tamaño de partícula (nm) del triplicado de la muestra con concentración 20 % m/m de dodecilsulfato sódico (SDS)



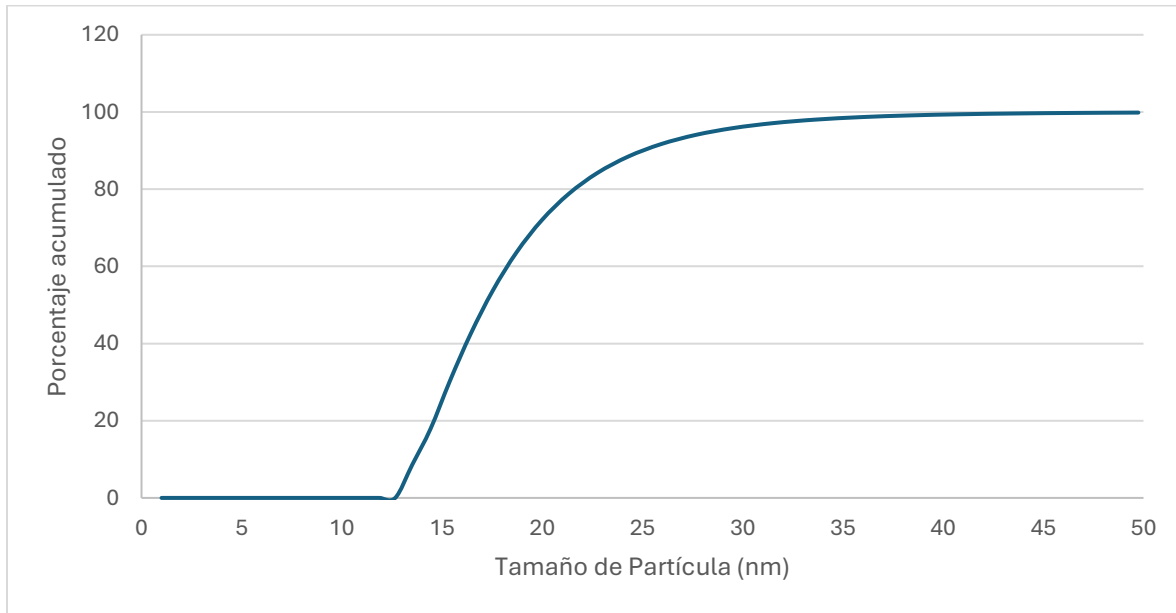
Nota: En el gráfico anterior se demuestra el resultado del porcentaje de acumulación de tamaño de partícula del análisis realizado por el analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración propia (2025).

Figura 19: Histograma de distribución de tamaño de partícula (nm) y porcentaje acumulado con concentración de 20 % m/m de dodecilsulfato sódico (SDS)



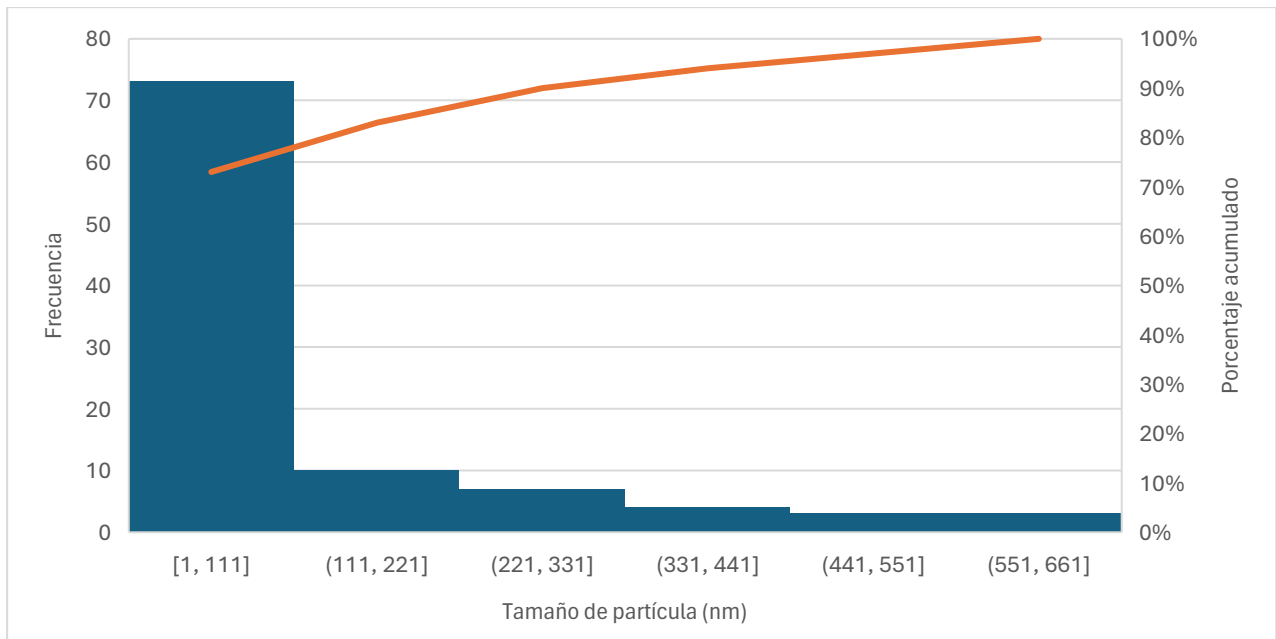
Nota: En la Figura anterior se demuestra el histograma del análisis del triplicado de la tercera muestra utilizando el analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración propia (2025).

Figura 20: Porcentaje de acumulación vs tamaño de partícula (nm) del triplicado de la muestra con concentración 30 % m/m de dodecilsulfato sódico (SDS)



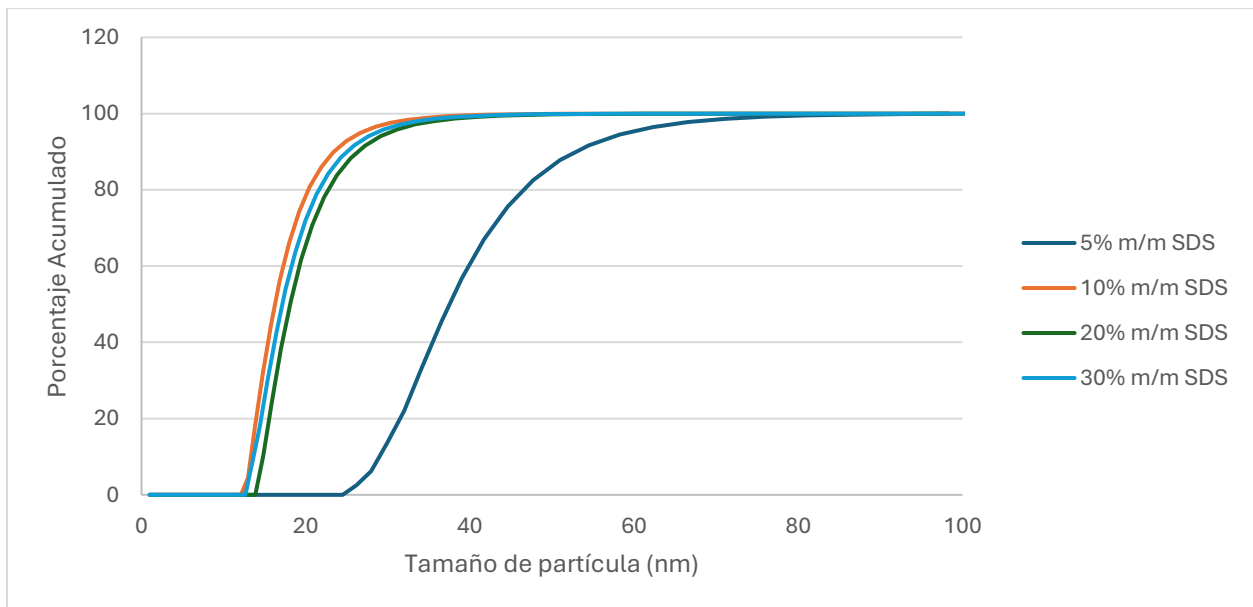
Nota: En el gráfico anterior se demuestra el resultado del porcentaje de acumulación de tamaño de partícula del análisis realizado por el analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración propia (2025).

Figura 21: Histograma de distribución de tamaño de partícula (nm) y porcentaje acumulado con concentración de 30 % m/m de dodecilsulfato sódico (SDS)



Nota: En la Figura anterior se demuestra el histograma del análisis del triplicado de la cuarta muestra utilizando el analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración propia (2025).

Figura 22: Porcentaje de acumulación vs tamaño de partícula (nm) del promedio de todas las corridas variando concentración del surfactante



Nota: En el gráfico anterior se demuestran los resultados del porcentaje de acumulación de tamaño de partícula de todas las corridas del análisis realizado por el analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón, donde SDS es dodecilsulfato sódico. Elaboración propia (2025).

### C. Análisis de encapsulación por cromatografía de gases

Cuadro 10: Resultados de encapsulación de limoneno por cromatografía de gases

No. De muestra	Porcentaje de limoneno no encapsulado (%)	Porcentaje de limoneno encapsulado (%)
1	<0.01	99.99
2	<0.01	99.99
3	1.77	98.2
4	0.92	99.08
Promedio	0.67	<b>99.33</b>

Nota: En el cuadro anterior se demuestran los resultados obtenidos del análisis de porcentaje de encapsulamiento, haciendo uso de los resultados del equipo de cromatografía de gases del laboratorio de análisis instrumental avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

### D. Costeo simple de encapsulamiento

Cuadro 11: Resultados de costeo simple para encapsulamiento de limoneno a escala de laboratorio

Químico	Precio (USD)	Unidad de Costo	Cantidad usada experimentalmente	Costo de síntesis (USD)
MMA	56.25	1 L	0.1L	0.56
BPO	51.26	250 g	0.02 g	0.00
SDS	92.80	250 g	1.2 g	0.45
Limoneno	86.13	1 L	0.03 L	0.26
Agua destilada	68.81	4 L	0.8 L	1.38
Agua ultrapura	33.00	1 L	0.10 L	3.3
Cloroformo	189.51	2.5 L	0.05 L	3.72
<b>Total</b>				<b>9.68</b>

Nota: En el cuadro anterior se demuestran los costos de los reactivos utilizados experimentalmente. Los datos de costos fueron obtenidos de la página de Merck Millipore. A la

fecha del 21 de agosto de 2025, el tipo de cambio oficial establecida por el banco de Guatemala es de Q7.66. Elaboración propia (2025).

## VIII. DISCUSIÓN

El estudio de la síntesis de nanopartículas representa un campo de estudio de interés, ya que permite evaluar cómo las condiciones de experimentales que influyen directamente en las características de los nanomateriales como tamaño de partícula y porcentaje de encapsulamiento. En este sentido, los resultados obtenidos de esta investigación exploratoria constituyen la base para comprender la relación entre parámetros experimentales y el comportamiento de las partículas, así como para identificar las tendencias que favorecen o limitan el rendimiento de la encapsulación y la estabilidad de los sistemas.

Para llevar a cabo el análisis factorial se tuvo que definir los parámetros experimentales a utilizar. De acuerdo con el estudio realizado por Eleftherios et al., (2021), el intervalo de temperatura que propicia la ruptura homolítica del iniciador para la generación de radicales libres se encuentra entre (75-85) °C, por lo que se decidió trabajar en intervalos de 5 °C para llevar a cabo las corridas experimentales de la emulsión. Adicionalmente, la velocidad de agitación se determinó a partir de la velocidad máxima experimental donde el agitador magnético podía girar de manera continua sin parar durante todo el proceso experimental. De acuerdo con los resultados, la velocidad máxima fue de 900 rpm debido que al incrementar a 1000 rpm, dejaba de girar el agitador y se trabajó en intervalos de 100 rpm disminuyendo la velocidad de agitación.

Después de realizar la prueba piloto experimental variando la temperatura (°C) y la velocidad de agitación (rpm) se determinó su influencia sobre la estabilidad termodinámica de una emulsión agua y aceite. El resultado del análisis factorial es demostrado inicialmente en el gráfico de Pareto demostrado en la Figura 10 sección de resultados. Con un nivel de significancia de 0.05, el valor crítico de t fue establecido por la línea de referencia con un valor de 2.179. Debido a que el único valor que sobrepasa el valor crítico de t se establece que el parámetro de temperatura es estadísticamente significativo.

Se puede determinar que la temperatura es el factor más influyente en el tiempo de estabilidad termodinámico de la emulsión. Esto se debe a que la temperatura influye directamente en la cinética de la reacción de emulsión. Como es demostrada en la ecuación de Arrhenius la

constante de velocidad de reacción es influenciada por la temperatura de manera exponencial. Esto se debe a que la temperatura aumenta la energía interna y cinética de las moléculas, favoreciendo las colisiones y aumenta la probabilidad de superar la energía de activación.

Adicionalmente, la temperatura modifica la tensión superficial de la emulsión, lo que aumenta la solubilidad del surfactante, fomentando la formación de una mayor cantidad de micelas con tamaño más uniforme y alargando la vida de estabilidad termodinámica del sistema. Debido a que los resultados establezcan que la temperatura es el único factor estadísticamente significativo, sugiere que la velocidad de reacción y la formación de micelas en el sistema depende principalmente de la cinética de reacción la cual es controlada principalmente por la temperatura en lugar de factores mecánicos como la velocidad de agitación.

Por otro lado, en el estudio del Pareto se evidencia que la velocidad de agitación no es estadísticamente significativa con un nivel de significancia de 0.05. Esto se debe a que el factor se encuentra muy por debajo del valor crítico  $t$ . Con un valor de 1.6, se establece que el esfuerzo cortante no influye directamente sobre la estabilidad termodinámica de la emulsión, agua y aceite.

Como se evidencia en el Cuadro 46, sección de datos calculados, el esfuerzo cortante va incrementando a medida que se aumenta la velocidad de agitación. Esto se debe a la relación directamente proporcional entre el esfuerzo cortante y la turbulencia generada por el agitador magnético. Se evidencia que el menor esfuerzo cortante es a 600 rpm con un valor de 0.020 Pa y va en aumento hasta llegar al 0.029 Pa a 900 rpm, que fue el parámetro utilizado para la polimerización por microemulsión.

A pesar de que la agitación fomenta a la colisión de las moléculas gracias a la homogenización no influye directamente sobre la estabilidad en el tiempo de la emulsión. Esto se debe a que la cinética de reacción no se ve afectada en la misma proporción que con la temperatura. Sin embargo, es posible que el rango utilizado de revoluciones por minuto ya estuviera por encima de la velocidad mínima necesaria para una emulsión eficiente permitiendo que se propiciara la formación de micelas.

Uno de los parámetros esenciales para una emulsión o una microemulsión es la concentración de surfactante. Para que una lograr una homogenización de dos sustancias inmiscibles es esencial que se llegue a la concentración crítica micelar (CMC). Este parámetro

establece la cantidad mínima de surfactante a utilizar para que exista la formación de micelas. Para la microemulsión de polimetilmetacrilato (PMMA) utilizando dodecilsulfato sódico (SDS), la concentración crítica micelar es de 0.2 g/L (Yuan et al., 2012). Debido a que para todas las corridas experimentales se trabajó con una concentración de surfactante significativamente mayor a la CMC, se puede deducir que siempre habrá formación de micelas, siempre que se mantenga una velocidad de agitación constante, independientemente del esfuerzo cortante.

A pesar de que el esfuerzo cortante no influye directamente sobre el tiempo en el que ambas fases se mantienen miscibles en una emulsión homogénea, la velocidad de agitación influye en otros parámetros importantes no tomados en cuenta en el diseño factorial. Los principales factores que es determinado por el esfuerzo cortante es el tamaño de partícula y la distribución de micelas a lo largo de la emulsión. Un aumento de velocidad de agitación aumenta la dispersión y reduce el tamaño de las micelas siempre que se supere la concentración crítica micelar y una temperatura que permita superar la energía de activación de la reacción.

Por último, en el Pareto se establece que la interacción entre temperatura y velocidad de agitación no es estadísticamente significativa. Esto sugiere que el efecto que la temperatura tiene sobre la estabilidad termodinámica de la solución es independiente al esfuerzo cortante inducido por la velocidad de agitación. En otras palabras, se evidencia que la cinética de reacción es influenciada directamente por la temperatura sin importar la velocidad de agitación.

Para asegurar que los datos obtenidos del análisis factorial tienen una distribución normal, se realizó un gráfico de probabilidad normal de los residuos. Se puede evidenciar en la Figura 11 de la sección de resultados que los residuos de los datos se distribuyen cerca de la línea roja. Eso permite asegurar que la distribución es normal, sin embargo, se evidencia una ligera desviación en los extremos de la gráfica. A pesar de esto, debido a que se puede concluir que los datos siguen una distribución normal.

Para poder corroborar la distribución de los datos, se realizó una prueba de normalidad de los residuos mediante la prueba Shapiro-Wilk demostrada en el cuadro 4, sección de resultados. Se puede evidenciar que el valor-p es mayor a 0.05, con un valor de 0.9991, lo cual concluye que no se rechaza la hipótesis nula. En otras palabras, no hay evidencia estadística para afirmar que los residuos no siguen una distribución normal. Adicionalmente, la prueba Shapiro-Wilk estableció un valor-w de 0.98799. Al ser un valor cercano a 1, que indica normalidad perfecta, se refuerza la

conclusión que los datos siguen una distribución normal. Esto permite realizar pruebas paramétricas como ANOVA que se fundamentan en la normalidad de los datos.

El análisis de varianza mostró que tanto la temperatura como el rpm ejercen un efecto significativo sobre la variable de respuesta ( $p < 0.05$ ). La temperatura presentó un valor F de 10.31 y un valor  $p < 0.001$ , lo que indica que es el factor más influyente, explicando aproximadamente el 89.7 % de la variabilidad total. Por su parte, el rpm obtuvo un valor F de 1.62 con un valor  $p = 0.131$ , evidenciando un efecto estadísticamente no relevante, con una contribución cercana al 8.4 % de la variabilidad total. Adicionalmente, se evidenció un factor- $p$  de 0.891 del efecto combinado de la temperatura y agitación sobre la estabilidad termodinámica del sistema. Al ser un valor mayor a 0.05, se evidencia que el efecto no es estadísticamente significativo, por lo que se atribuye que ambos factores tienen influencias independientes sobre la variable respuesta. La variabilidad residual representó únicamente el 1.9 %, lo que sugiere un buen ajuste del modelo. Estos resultados son consistentes con el análisis gráfico de Pareto, en el que la temperatura dominó el comportamiento del sistema, y confirman que el modelo estadístico es válido, dado que los residuos cumplen el supuesto de normalidad según la prueba de Shapiro-Wilk ( $p = 0.9991$ ).

A pesar de que los resultados fueron realizados en una emulsión agua y aceite, los resultados pueden reflejarse en parámetros de la síntesis del polimetilmetacrilato por microemulsión. En este caso, Los resultados del ANOVA indican que la temperatura es el factor más determinante en el proceso, lo cual es coherente con la naturaleza química de la polimerización del metilmetacrilato (MMA) por radicales libres. A temperaturas más elevadas, el iniciador (por ejemplo, peróxido de benzoilo) se descompone más rápidamente, generando una mayor concentración de radicales libres y acelerando la etapa de iniciación. Esto incrementa la velocidad de propagación y la conversión del monómero a polímero, reduciendo el tiempo necesario para formar la matriz polimérica que encapsula el limoneno. Sin embargo, un aumento excesivo de temperatura podría incrementar la volatilización del limoneno, por lo que el efecto observado también refleja un equilibrio entre mayor velocidad de reacción.

Los parámetros utilizados para las variables independientes fueron establecidos basándose en los estudios demostrados en la sección de antecedentes de esta investigación. En la literatura, se determina que la temperatura de descomposición térmica del peróxido de benzoilo (BPO) para

poder actuar como iniciador para las polimerizaciones esta entre el intervalo de 70 ° C a 85 °C, por lo que se replicó para el análisis.

Por su parte, el rpm presentó un efecto estadísticamente no significativo, porque se evidencia que es considerablemente menor que el de la temperatura. Este resultado es atribuible a su influencia sobre la fase de emulsificación previa a la polimerización. Una mayor agitación favorece la reducción del tamaño de gota y la dispersión homogénea del monómero y del limoneno en la fase acuosa, lo que mejora la transferencia de masa y la uniformidad de las partículas formadas. No obstante, una vez que se alcanza un nivel de emulsificación suficiente para garantizar la estabilidad de la microemulsión, incrementos adicionales de rpm producen mejoras marginales en el tamaño de partícula, lo que explica su menor contribución porcentual a la variabilidad total.

En conjunto, la combinación de un control preciso de la temperatura, para maximizar la cinética de polimerización, así como un rango adecuado de rpm, para mantener una emulsión estable, es fundamental para maximizar el porcentaje de encapsulamiento y obtener menor cantidad de limoneno libre.

Previo a realizar un estudio de tamaño de partícula, fue necesario confirmar que la polimerización fue exitosa. Para ello se realizó un análisis de espectrofotometría infrarrojo (IR), cuyo resultado se puede evidenciar en la Figura 12, sección de resultados. Se corroboraron los picos característicos encontrados en la literatura y se comparó con los obtenidos de manera experimental. Se evidenció que se obtuvieron los mismos picos característicos del polimetilmetacrilato, por lo que se concluye que la polimerización por microemulsión se realizó exitosamente.

Se realizó en análisis por medio de DLS, ya que el equipo permite la presencia de agua en la muestra. En la tabla de resultados de tamaño de partícula (cuadro 7, sección de resultados) se evidencia que en todas las corridas el tamaño de partícula fue menor a 1000 nm (1  $\mu$ m). Con estos resultados se evidencia que la polimerización dio como resultado nanopartículas, donde la de mayor tamaño fue de 40 nm y la menor de 18 nm. Debido a que no se obtuvo tamaños menores a 18 nm, se puede inferir que se llegó al menor tamaño de partícula posible con los parámetros establecidos experimentalmente en este trabajo.

Wang, et al., (2012) determinó que el menor tamaño de partícula reportado en ese estudio fue de 13.9 nm, mientras que el mayor obtenido fue de 27.3 nm. Al igual que en este trabajo de graduación, fueron variando la concentración de surfactante. Ambos estudios reportan una disminución de tamaño de partícula hasta llegar a un límite, cuando se supera dicho límite, el tamaño de partícula comienza a incrementar. En su caso fue de 13.9 nm, mientras que en este trabajo de graduación el límite fue de 18.16 nm. Las principales fuentes que influyen en dicha diferencia es el surfactante (SDS en el presente trabajo y APS en el otro). Es posible que el APS logre una mayor disminución de tensión superficial en la microemulsión, generando un menor tamaño de partícula.

En el diseño factorial descrito anteriormente, se estableció la importancia de la velocidad de agitación sobre el tamaño de partícula. Es factible que hayan utilizado velocidades de agitación más altas, generando la diferencia en tamaño de partícula. Sin embargo, al ser una diferencia de 4.26 nm, se concluye que la diferencia entre APS y SDS no es lo suficientemente significativa como para indicar que un surfactante es mejor que otro.

Wang et al., (2012) determinó el efecto de uso de un co-surfactante, que brinde estabilidad a la emulsión y permita que se reduzca aún más la tensión superficial generando un menor tamaño de partícula. Debido a la baja diferencia de tamaño con y sin surfactante, se establece que no hay beneficio obtenido por lo que se puede erradicar de la formulación.

Como se puede evidenciar en el Cuadro 7 de la sección de resultados, se evidencia que la cantidad de surfactante tiene una influencia directa sobre la desviación estándar de la distribución de tamaño de partícula. Se puede establecer que, al incrementar la cantidad de surfactante, se reduce la desviación estándar de la distribución de tamaño de partícula. Sin embargo, se realizó un análisis por corrida en triplicado para analizar este efecto más a fondo en las Figuras 14-21 de la sección de resultados de este informe.

Como se evidencia en la Figura 13, se evidencia una disminución de tamaño de partícula significativo al aumentar la concentración de surfactante de 5 %m/m a 10 %m/m. Esto se debe a que, a mayor cantidad de surfactante en el medio, se aumenta la cantidad de micelas formadas. Sin embargo, se evidencia que no se puede disminuir el tamaño de partícula infinitamente. Al superar dicho límite, el tamaño de partícula se estabiliza, como se evidencia con el tamaño de partícula con concentraciones de 20 % m/m y 30 %m/m. Esto se debe al exceso de surfactante presente en

el medio que se adhiere a la superficie de la partícula y se saturan y que tanto físicamente como químicamente no se puede reducir más el tamaño de partícula. Es por este motivo por el que se establece que la concentración ideal para evitar usar exceso de surfactante para sintetizar nanopartículas de polimetilmetacrilato con dodecilsulfato sódico es de 10 % m/m.

El estudio de varianza ANOVA del tamaño de partícula es demostrado en el cuadro 8 en la sección de resultados. El análisis mostró que la concentración de SDS ejerce un efecto significativo sobre el tamaño de partícula obtenido por DLS, con un valor-F de 20.43 y un valor-p de 0.004, lo cual confirma que el surfactante es un factor determinante en el proceso de nanoencapsulación. El SDS explicó aproximadamente el 77 % de la variabilidad total, lo que indica que su influencia supera ampliamente a la variación atribuible al error experimental. Este resultado es consistente con la teoría de micro emulsiones, donde un aumento en la concentración de surfactante reduce la tensión interfacial y proporciona una mayor cobertura de las gotas, impidiendo la coalescencia y favoreciendo la formación de partículas más pequeñas y estables. De esta manera, el ajuste adecuado del porcentaje de SDS se confirma como un parámetro crítico de formulación para controlar el tamaño de partícula.

El SDS presenta características que explican los resultados de tamaño nanométrico obtenidos en la sección de resultados. Esto se debe a que el dodecilsulfato sódico es un tensioactivo de naturaleza aniónica. En otras palabras, su estructura molecular consta de un extremo hidrofóbico y el otro hidrofílico cargado negativamente. Estas características permiten la formación de micelar cuando se supera la concentración crítica micelar, disminuyendo la tensión superficial del agua. La carga negativa del grupo sulfato en la superficie crea repulsión electrostática entre las partículas, por lo que se da una mejor separación entre ellas y se disminuye la coagulación, por lo que genera una emulsión estable. Adicionalmente, el SDS no interfiere con los iniciadores radicalarios como es el caso del peróxido de benzoilo, por lo que no actúa como inhibidor de la polimerización.

Para analizar la distribución de tamaño de partícula con una concentración de SDS se graficó la curva de distribución de tamaño de partícula con el porcentaje de acumulación del triplicado de las polimerizaciones con 5 % SDS. Como se evidencia en la Figura 14, el 80 % de las nanopartículas son menores a 50 nm de diámetro. Para el análisis de DLS, se establece el tamaño de partícula cuando la muestra llega al 60 % de acumulación. Como se evidencia en el

gráfico, el tamaño de partícula máximo obtenido es de 80 nm. Esto se puede explicar a la baja concentración de SDS, lo que genera una menor cantidad de micelas, pero con un mayor tamaño de partícula.

Adicionalmente, en el Gráfico 15 de la sección de resultados se evidencia el histograma de distribución de partícula. Se observa un sesgo pronunciado a hacia la izquierda, debido a que 95 % de la concentración de nanopartículas se encuentra entre los 1-131 nm. Esto permite establecer una variabilidad del tamaño de partícula establecida por la concentración de surfactante. Sin embargo, es la corrida experimental con la menor concentración de surfactante, con un promedio de 40 nm. Sin embargo, no se presenta evidencia de que se haya alcanzado un tamaño de micropartícula (mayor a 1000 nm).

Por otro lado, se evidencia una distribución con menor variabilidad en los resultados al utilizar 10 % SDS m/m. Como se demuestra en las Figuras 16 y 17. Los resultados de DLS con 10 % de SDS mostraron una distribución acumulativa de tamaño de partícula con una mediana cercana a los 18 nm y un intervalo de acumulación comprendido entre 15 y 25 nm, lo cual evidencia una población monomodal y de estrecha dispersión. Este comportamiento se atribuye al efecto del SDS en la reducción de la tensión interfacial y en la estabilización de las gotas de microemulsión, evitando la coalescencia y limitando el crecimiento de las partículas durante la polimerización. En consecuencia, el aumento en la concentración de surfactante no solo reduce el tamaño promedio de partícula, sino que también mejora la uniformidad del sistema.

Con una concentración de 10 % de SDS, el histograma de distribución de tamaños de partícula muestra que aproximadamente el 75 % de la población se encuentra en el intervalo de 1 a 121 nm, confirmando la formación predominante de nanopartículas. La curva acumulativa indica que más del 90 % de las partículas tienen un tamaño menor a 361 nm, lo que refleja una distribución sesgada hacia diámetros menores a 100 nm y un adecuado control del proceso de emulsificación. La presencia de una fracción minoritaria de partículas más grandes podría deberse a fenómenos de coalescencia residual o aglomeración durante la preparación de la muestra. En conjunto, estos resultados evidencian que el SDS en concentración de 10 % m/m garantiza una emulsión estable. Adicionalmente, se corrobora la conclusión que la concentración de surfactante óptima para obtener un menor tamaño de partícula es de 10 % m/m.

Por otro lado, la Figura 17 establece la distribución de tamaño de partícula al utilizar 20 %m/m de surfactante. Se evidencia que el diámetro medio es de alrededor de 20 nm. Adicionalmente, se evidencia una distribución más estrecha, por lo que se sugiere que un exceso de surfactante no presenta mejoras en la distribución de tamaño de partícula. Tampoco se evidencia una disminución en el tamaño de partícula debido a que se alcanzado la capacidad del surfactante en reducir el tamaño de las micelas.

Con 20 % de SDS, la distribución de tamaños está claramente sesgada hacia partículas nanométricas (< 141 nm), con un tamaño predominante muy pequeño y una fracción mínima de partículas mayores a 200 nm. Esto evidencia que un mayor contenido de surfactante favorece la reducción y estabilización del tamaño de partícula, aunque no elimina por completo la posibilidad de aglomeración residual.

Con base a los análisis anteriores se puede establecer que con una concentración de surfactante de 10 %m/m se llega al tamaño de partícula más pequeño que se puede con las condiciones experimentales establecidas en este trabajo de investigación. Al aumentar la concentración de surfactante en un 10 % más, no se ve mejora significativa de reducción de tamaño, por lo que se evidencia que el diámetro se estabiliza. Sin embargo, se evidencia una distribución más uniforme al aumentar la concentración de surfactante a un 20 % SDS m/m. Esto se debe a que en la distribución acumulativa de los diagramas Pareto se demuestra una menor acumulación porcentual de partículas con tamaño superior a los 100 nm. Esto concuerda con los resultados expuestos en el Cuadro 7, donde se evidencia una reducción en la desviación estándar de la distribución de tamaño de partícula.

El último análisis de triplicado realizado por medio de DLS fue para una concentración de surfactante de 30 %. Como se evidencia en la Figura, el tamaño promedio es de 20 nm con una distribución significativamente estrecha, sin evidencia de partículas de tamaños de partícula mayores a 600 nm. Esto confirma que se alcanza una distribución más homogénea y con menor variabilidad de los tamaños de partícula al incrementar la concentración de surfactante.

Adicionalmente, en el Gráfico 21 se demuestra el histograma de distribución de tamaño de partícula muestra que aproximadamente el 73 % de la población se concentra en el rango de 1–111 nm, lo que confirma la formación predominante de nanopartículas dentro de este rango. La curva acumulativa indica que más del 90 % de las partículas se encuentran por debajo de 331 nm,

evidenciando un sistema fuertemente sesgado hacia el rango nanométrico bajo. Aunque se observa una fracción minoritaria de partículas grandes ( $> 300$  nm), su proporción es reducida y no compromete la uniformidad global. Estos resultados demuestran que el proceso de síntesis logra un buen control del tamaño, favoreciendo la obtención de nanopartículas estables y homogéneas.

La comparación de las distribuciones de tamaño de partícula obtenidas con diferentes concentraciones de SDS evidencia una clara tendencia hacia la reducción del tamaño promedio y una mayor uniformidad a medida que aumenta la cantidad de surfactante. Al tener una concentración de SDS de 5 % m/m se ve la mayor variabilidad de tamaño de partícula. Adicionalmente se evidencia una mayor formación de partículas de mayor tamaño. Con 10 % de SDS, la mayoría de las partículas se ubican por debajo de 121 nm, aunque se detecta una fracción minoritaria de tamaños mayores que indica cierta coalescencia residual.

Al incrementar la concentración a 20 %, la distribución se estrecha considerablemente, con un tamaño medio cercano a 20 nm y menor presencia de partículas grandes de tamaño superior a los 200 nm, reflejando una emulsión más estable. Finalmente, con 30 % de SDS, la distribución acumulativa confirma una disminución de desviación estándar de la distribución de tamaño de partícula, mostrando nanopartículas de alrededor de 20 nm con una dispersión muy reducida y sin colas hacia tamaños mayores.

El histograma de distribución de tamaño de partícula con 30 % de SDS muestra que aproximadamente el 73 % de la población se encuentra en el rango de 1–111 nm, confirmando la predominancia de nanopartículas de pequeño diámetro. La curva acumulativa indica que más del 90 % de las partículas están por debajo de los 331 nm, lo que evidencia una distribución fuertemente sesgada hacia tamaños nanométricos inferiores a los 100 nm. Sin embargo, se observa una fracción minoritaria de partículas más grandes (superiores a 300 nm), atribuible a fenómenos de coalescencia o agregación secundaria. En conjunto, estos resultados demuestran que el 30 % de SDS favorece la formación de nanopartículas pequeñas y relativamente uniformes, aunque aún persiste una proporción reducida de partículas de mayor tamaño.

Es importante señalar que existe un breve incremento de distribución de tamaño de partícula superiores a 30 nm de 20 % m/m SDS a 30 %. Aunque se esperaría que un incremento en la concentración de SDS reduzca el tamaño de partícula y mejore la uniformidad, los resultados obtenidos muestran que al pasar de 20 % a 30 % de surfactante aumenta la fracción de partículas

de mayor tamaño. Este comportamiento puede explicarse por la sobresaturación del sistema con moléculas de SDS, lo que genera micelas libres en el medio acuoso que no contribuyen a la estabilización de las gotas de microemulsión. Además, el exceso de surfactante puede inducir un efecto iónico que disminuye la repulsión electrostática entre partículas, favoreciendo fenómenos de coalescencia y agregación secundaria. De esta forma, el 30 % de SDS, aunque mantiene una fracción dominante de nanopartículas pequeñas, también promueve la formación de una minoría de partículas grandes, comprometiendo parcialmente la uniformidad del sistema en comparación con la concentración óptima de 20 %.

Como se evidencia en el cuadro 9 de la sección de resultados, se logró un alto porcentaje de encapsulación de limoneno. Esto se debe a que se utilizó una baja concentración de limoneno para garantizar la mayor cantidad de encapsulación posible. Al tener un exceso de nanopartículas de PMMA, se asegura que el limoneno sea encapsulado en su totalidad.

Los resultados de encapsulación obtenidos por cromatografía de gases muestran un rendimiento promedio de 99.33 %, con valores cercanos al 100 % en las cuatro muestras analizadas. En dos de ellas no se detectó limoneno libre, mientras que en las otras dos se observaron únicamente trazas mínimas ( $\leq 1.77$  %), lo que confirma la alta eficacia del método de encapsulación. Este desempeño se atribuye a la naturaleza hidrofóbica del limoneno y su afinidad con la matriz de PMMA, lo que favorece su retención durante la polimerización en microemulsión. En conjunto, los resultados evidencian que la técnica utilizada permite obtener nanopartículas con una elevada capacidad de encapsulamiento, garantizando la protección y estabilidad del limoneno.

Es claro que el encapsulamiento de limoneno genera un crecimiento importante del tamaño de las nanopartículas establecidas anteriormente. Existe una alta probabilidad de que la encapsulación aumente su tamaño hasta una escala micrométrica (mayor a 1  $\mu\text{m}$ ). Esto se debe al aumento de la presión de Laplace que ejerce el limoneno en la cápsula formada por el polimetilmetacrilato. Sin embargo, debido a la baja concentración, se evidencia que dicha presión no fue lo suficientemente alta como para romper la matriz polimérica. Si se hubiera trabajado con concentraciones más grandes, es altamente probable que llegara un punto donde el rendimiento de encapsulación disminuiría debido a que habría más limoneno libre y que llegar un punto donde se diera un colapso de la coraza polimérica debido a que la presión de Laplace aumentaría su tamaño pasando la resistencia reológica que presente la coraza de PMMA.

El análisis de costos a escala laboratorio demostrada en el cuadro 10 mostró que la síntesis de nanopartículas de PMMA con limoneno encapsulado tiene un costo total de \$ 9.68 USD por corrida experimental. El mayor gasto correspondió al cloroformo (\$ 3.72 USD), seguido del agua ultrapura y el agua destilada, mientras que el limoneno y el iniciador tuvieron un aporte mínimo. Este resultado refleja que el proceso puede llevarse a cabo de manera eficiente sin una limitación económica significativa en el laboratorio y que, en una eventual escala industrial, los costos tenderían a reducirse aún más debido a economías de escala en la adquisición de insumos.

El balance de masa establecido en la sección de anexos se evidencia como se llevó a cabo la reacción de polimerización por microemulsión del polimetilmetacrilato. Se evidencia un porcentaje de rendimiento del 76% de polimerización debido a la diferencia entre la cantidad teórica de PMMA sintetizable con base a la cantidad de monómero disponible. Se atribuye ese porcentaje de rendimiento a la disponibilidad de peróxido de benzoico para la formación de cadenas poliméricas. Por ende, se puede asumir que el reactivo limitante en este caso es el iniciador. Debido a que la utilización del condensador de reflujo se asume que no hubo pérdidas de limoneno por volatilización.

La nanotecnología constituye un campo novedoso, con un vasto potencial para la innovación científica y tecnológica, al permitir la manipulación de materiales a escala nanométrica. El desarrollo de nanopartículas poliméricas, como las obtenidas en este estudio, demuestra que es posible diseñar sistemas con propiedades orientadas a la encapsulación y protección de compuestos bioactivos. Estos avances no solo fortalecen el conocimiento fundamental en el área de la ciencia de materiales, sino que también sientan las bases para futuras investigaciones orientadas a la optimización de procesos y a la generación de aplicaciones con impacto en diversos sectores productivos.



## IX. CONCLUSIONES

1. El análisis factorial permitió identificar los factores relevantes en la síntesis de nanopartículas de PMMA. Los resultados demostraron que la temperatura es el factor dominante, con un efecto significativo sobre la respuesta experimental con un valor-p  $<0.001$ . La velocidad de agitación resultó estadísticamente no significativa dentro del rango evaluado con un valor-p de 0.131. Analizando la combinación de ambos factores, se determinó que no hay interacciones significativas entre los factores, debido a que se obtuvo un valor p-0.891, lo que indica que cada uno actúa de manera independiente en sobre la variable dependiente. Por lo que se concluye que la temperatura es el factor más significativo para la prolongación de la estabilidad termodinámica de la emulsión. Con esto, se determinó que los factores que prolongan la estabilidad termodinámica de la emulsión son: 85 °C y 900 rpm.
2. Los resultados de análisis por dispersión dinámica de luz (DLS) evidencian que el tamaño de partícula promedio sintetizada en las corridas experimentales se encuentran en el rango de 40.83 nm a 18.16 nm. Al ser menores a 1,000 nm (1  $\mu\text{m}$ ), se clasifican como nanopartículas. Adicionalmente, los estudios comparativos demuestran que la concentración de surfactante tiene un efecto inversamente proporcional en el tamaño de las nanopartículas de polimetilmetacrilato y es estadísticamente significativo con un valor-p de 0.004 en el estudio ANOVA. A bajas concentraciones (5 % m/m SDS), el sistema produce mayoritariamente nanopartículas en un rango de (26-47 nm) con un porcentaje de acumulación del 80 % de la muestra total, aunque persiste una fracción de tamaños mayores, entre 50 nm y 180 nm en el 20 % remanente de la distribución de tamaño de partícula de la muestra. Al aumentar a la concentración de surfactante a 10 % m/m, se alcanza el límite mínimo de tamaño de partícula con las condiciones experimentales establecidas, con un tamaño medio de 18.16 nm, dónde 80 % de la muestra total analizada tiene un tamaño de partícula inferior al 21.89 nm. Adicionalmente, el aumento de surfactante redujo la desviación estándar de 9.8 nm a

- 4.9 nm. Mostrando así, que el surfactante influye en la distribución porcentual de tamaño de partícula. Sin embargo, al incrementar la concentración de surfactante a 30 % m/m, se obtuvo un tamaño de partícula de 19.03 nm, pero no se evidencia un cambio significativo en distribución de tamaño de partícula dado que la desviación estándar de tamaño de partícula es de 5.1 nm.
3. Los resultados obtenidos de los análisis por cromatografía de gases evidencian que en promedio la cantidad libre de encapsulamiento del limoneno es de 0.67 % m/m del total de la muestra. Esto indica que se encapsuló un promedio del 99.33 % de la muestra dentro de la matriz polimérica de polimetilmetacrilato.
  4. El análisis de costos de síntesis a escala de laboratorio evidenció que la encapsulación de limoneno en nanopartículas de PMMA tiene un valor total de USD 9.68 por corrida experimental. El mayor aporte correspondió al cloroformo (\$3.372) y al agua ultrapura (\$ 3.30) que constituyen un 68 % del costo total, mientras que el surfactante, el limoneno, monómero, el iniciador y el agua destilada representaron el remanente 32 % del costo total.

## X. RECOMENDACIONES

1. Dado el entendimiento del efecto de la presión de Laplace sobre la matriz polimérica durante la encapsulación, incrementar la concentración de limoneno con el objetivo de analizar la variación del rendimiento de la encapsulación.
2. Basándose en los resultados de encapsulamiento, llevar a cabo estudios cinéticos de los procesos de liberación del limoneno con el propósito de estudiar el mecanismo de degradación del polímero variando condiciones de temperatura y medios de reacción.
3. Realizar estudios de encapsulamiento de diferentes tipos de sustancias que presenten inmiscibilidad con el agua como aceites esenciales con el propósito de determinar el porcentaje de encapsulación y la influencia del tipo de compuestos que contiene sobre dicho rendimiento.
4. Llevar a cabo estudios de síntesis de nanopartículas haciendo uso de otros polímeros, con el propósito de comparar y contrastar los tamaños de partícula obtenidos en este trabajo.
5. Con el propósito de establecer criterios de seguridad y sostenibilidad para aplicaciones de sistemas de liberación controlada, sería conveniente llevar a cabo estudios de biodegradabilidad en diferentes medios, así como identificar los subproductos generados.
6. Realizar estudios de síntesis por microemulsión de nanopartículas de polimetilmetacrilato con diferentes surfactantes de naturaleza aniónica para determinar variabilidad de tamaño de partícula y morfología.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

- Ahangaran, F., Navarchian, A. H., & Picchioni, F. (2019). Material encapsulation in poly(methyl methacrylate) shell: Fuente: Journal of Applied Polymer Science, 136(48), 48283. <https://doi.org/10.1002/app.48283>
- Anselmo, A., & Mitragotri, S. (2016). Designing drug-delivery nanoparticles. Chemical Engineering Progress (CEP), 112(9), 52–58. American Institute of Chemical Engineers.
- Banco de Guatemala. (2025). *Tipo de cambio – Histórico por rango*. Recuperado el 21 de agosto de 2025, de Banco de Guatemala: [https://www.banguat.gob.gt/tipo\\_cambio/Tipocambio/HistoricoRango](https://www.banguat.gob.gt/tipo_cambio/Tipocambio/HistoricoRango)
- BCC Research. (2024, 11 de enero). Global nanotechnology market poised to reach \$183.7 billion by 2028, according to BCC Research analysis. PR Newswire.
- Brookhaven Instruments Corporation. (2022). How to prepare and stabilize samples for dispersión dinámica de luz (DLS) [Archivo PDF]. Brookhaven Instruments Corporation.
- Brookhaven Instruments Corporation. (2018). How to prepare and stabilize samples for dispersión dinámica de luz (DLS) [Archivo PDF]. Brookhaven Instruments Corporation.
- Chen, W., Liu, X., Liu, Y., Bang, Y., & Kim, H. (2010). Synthesis of PMMA and PMMA/PS nanoparticles by microemulsion polymerization with a new vapor monomer feeding system. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 364(1-3), 145–150. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.05.010>
- Chin, S. F., Azman, A., & Pang, S. C. (2014). Size controlled synthesis of starch nanoparticles by a microemulsion method. Journal of Nanomaterials, 2014, 763736. <https://doi.org/10.1155/2014/763736>
- Delmas, T., Piraux, H., Couffin, A., Texier, I., Vinet, F., Poulin, P., Cates, M. E., & Bibette, J. (2011). How to prepare and stabilize very small nanoemulsions. Langmuir, 27(5), 1683–1692. <https://doi.org/10.1021/la104221q>

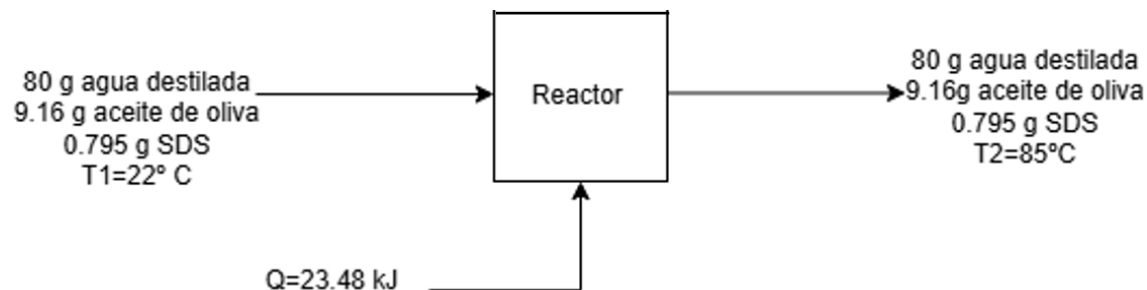
- Farrell, E., & Brousseau, J.-L. (2020). Guide for DLS sample preparation. Technical Note. Brookhaven Instruments Corporation. <https://bic.com>
- Lodge, T. P., & Hiemenz, P. C. (2020). Polymer chemistry. CRC Press.
- Merck. (2024). *DL-Limoneno (mezcla de formas D- y L-, ca. 1:1) para síntesis* (Versión 8.5). Ficha de datos de seguridad. MilliporeSigma. <https://www.sigmaaldrich.com>
- Merck. (2024). *Metilo metacrilato (estabilizado) para síntesis* (Versión 8.11). Ficha de datos de seguridad. MilliporeSigma. <https://www.sigmaaldrich.com>
- Merck. (2025). *Peróxido de benzoilo (con 25 % de agua) para síntesis* (Versión 8.9). Ficha de datos de seguridad. Sigma-Aldrich. <https://www.sigmaaldrich.com>
- Merck. (2025). *Sodium dodecyl sulfate* (Versión 7.9). Ficha de datos de seguridad. Sigma-Aldrich. <https://www.sigmaaldrich.com>
- Miriam Novelo-Torres, A., & Gracia-Fadrique, J. (2005). Concentración micelar crítica mediante la ecuación de adsorción de Gibbs. Profesores al Día (Fisicoquímica), 63–72. Facultad de Química, UNAM.
- Nanoparticles incorporation into PMMA and their antimicrobial properties: A systematic review. (2022). SciELO, 15(29), 2448-5691. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2448-56912022000200305](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912022000200305)
- Pérez, J., Ramírez, L., & Gómez, A. (2018). Polimerización en emulsión de metil metacrilato: Influencia del tiempo de reacción. Universidad Nacional Autónoma de México. [Archivo PDF].
- Precedence Research. (2025, 2 de abril). Nanotechnology market revenue to attain USD 86.68 billion by 2033. Precedence Research.
- Rai, M., Yadav, A., & Gade, A. (2009). Microemulsion method: A novel route to synthesize nanomaterial. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 75(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2009.09.002>
- Rana, S., Alam, M. N., & Haider, S. Z. (2023). Synthesis and characterization of PMMA nanoparticles for the encapsulation of hydrophobic bioactive compounds. Journal of Applied Polymer Science, 140(31), e48039. <https://doi.org/10.1002/app.48039>

- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Fundamentos de química analítica* (9.<sup>a</sup> ed.). Cengage Learning.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M. M., & Swihart, M. T. (2020). *Introduction to chemical engineering thermodynamics*.
- Torres, A. M. N., & Fadrique, J. G. (2021). Idealidad en superficies fluidas. *Educación Química*, 14(4), 220. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2003.4.66229>
- Treybal, R. E. (1980). *Mass-transfer operations*.
- Yuan, L., Wang, Y., Pan, M., Rempel, G. L., & Pan, Q. (2012). Synthesis of poly(methyl methacrylate) nanoparticles via differential microemulsion polymerization. *European Polymer Journal*, 49(1), 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2012.10.005>
- Yusa, S., Bahadur, P., Matsuoka, H., & Sato, T. (2018). *Polymer micelles*. MDPI.

## XII. ANEXOS

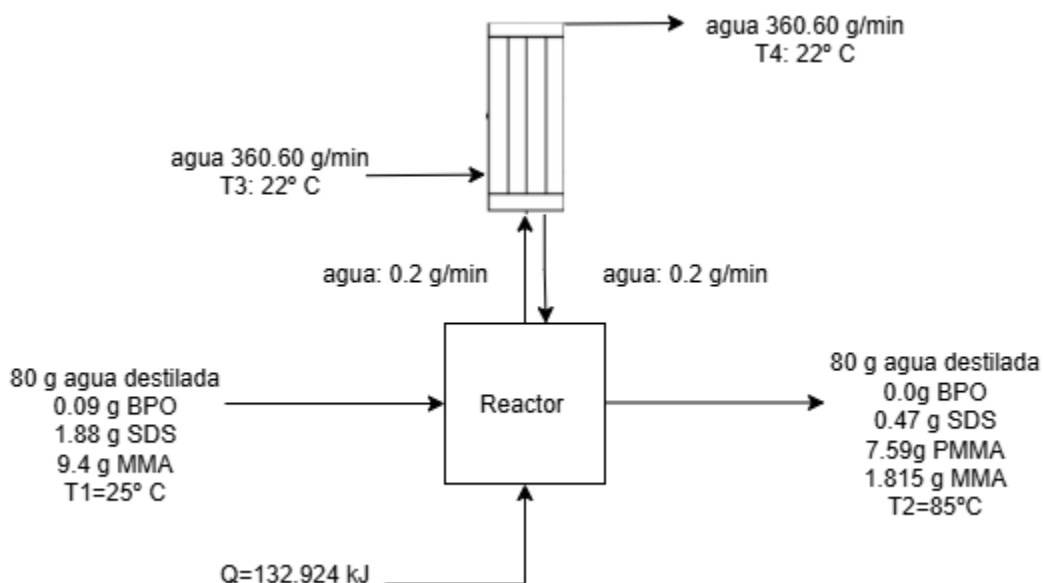
## A. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

Figura 23: Balance de masa y energía de emulsión agua con aceite de oliva



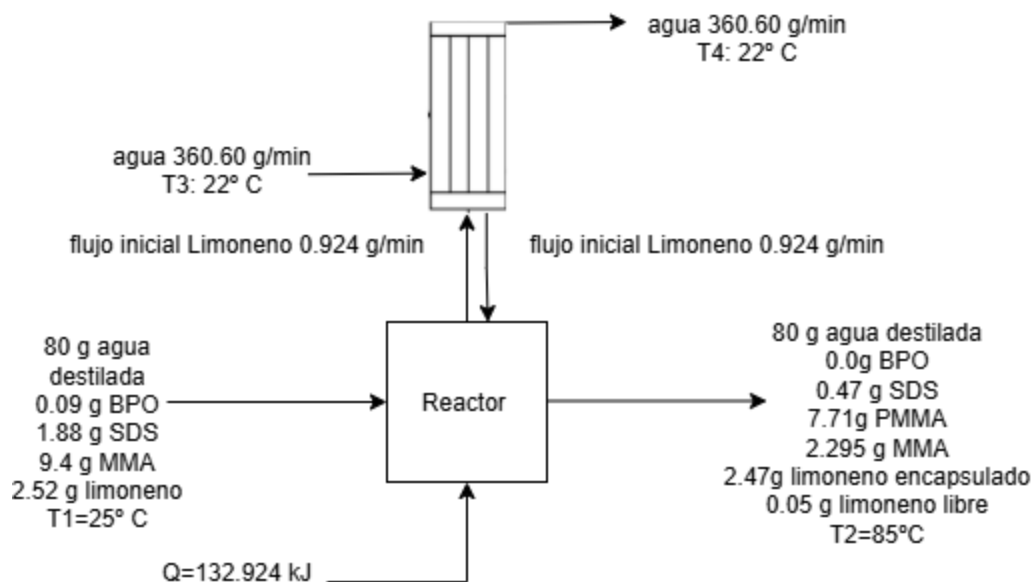
Nota: En el diagrama anterior se demuestra el balance de masa y energía la emulsión agua y aceite utilizado para el análisis factorial, Donde SDS es dodecilsulfato sódico. Fue elaborado en haciendo uso del programa draw.io. Elaboración propia (2025).

Figura 24: Balance de masa y energía de polimerización de metilmetacrilato por microemulsión



Nota: En el diagrama anterior se demuestra el balance de masa y energía para la síntesis de polimetilmetacrilato por microemulsión, utilizando 10 % m/m de surfactante y 1% m/m de iniciador. Fue elaborado en haciendo uso del programa draw.io. Elaboración propia (2025).

Figura 25: Balance de masa y energía de la reacción de encapsulamiento de limoneno.



Nota: En la Figura anterior se demuestra el balance de masa realizado para la reacción de polimerización del polimetilmetacrilato, donde la reacción fue realizada durante 20 minutos. Fue elaborado en haciendo uso del programa draw.io. El balance se hizo en los primeros minutos de la reacción cuando el limoneno no se había encapsulado. Elaboración propia (2025).

## B. DATOS ORIGINALES

Cuadro 12: Condiciones experimentales de análisis factorial por corrida

Corrida	Temperatura ( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ )	Agitación ( $\pm 0.5 \text{ rpm}$ )
1	75	600
2	75	700
3	75	800
4	75	900
5	80	600
6	80	700
7	80	800
8	80	900
9	85	600
10	85	700
11	85	800
12	85	900

Nota: en el cuadro anterior se demuestran los parámetros establecidos para el análisis factorial para la emulsión agua y aceite. Elaboración propia (2025).

Cuadro 13: Pesos y volúmenes experimentales del análisis factorial

Corrida	Volumen agua ( $\pm 0.05 \text{ ml}$ )	Volumen aceite ( $\pm 0.05 \text{ ml}$ )	Peso SDS ( $\pm 0.005 \text{ g}$ )
1	80.2	10.2	0.7998
2	80.1	10.1	0.7982
3	80.2	10.3	0.7983
4	80.0	10.2	0.7983
5	80.2	10.1	0.7999
6	80.1	10.1	0.7938
7	80.2	10.1	0.7945
8	80.3	10.0	0.7956
9	80.1	10.0	0.7953
10	80.2	10.1	0.7971
11	80.0	10.2	0.7903
12	80.1	10.1	0.7999

Nota: En el cuadro anterior se demuestra los valores reales experimentales utilizados para la emulsión agua y aceite por corrida. Elaboración propia, (2025).

Cuadro 14: Tiempo de estabilidad de la emulsión del análisis factorial emulsión agua y aceite

Corrida	Tiempo de estabilidad experimental (h)
1	4
2	8
3	12
4	21
5	34
6	36
7	43
8	56
9	63
10	72
11	81
12	105

Nota: En el cuadro anterior se demuestran los resultados de los tiempos de estabilidad termodinámica del resultado de análisis factorial. Elaboración propia (2025).

Cuadro 15: Datos experimentales para corridas de síntesis de nanopartículas

Corrida	Peso BPO ( $\pm 0.005 \text{ g}$ )	Peso SDS ( $\pm 0.005 \text{ g}$ )	Volumen MMA ( $\pm 0.05 \text{ mL}$ )
1	0.0921	0.4787	10.1
2	0.0931	0.9432	10.0
3	0.0928	1.8781	10.0
4	0.0976	2.8213	10.1

Nota: En el cuadro anterior se demuestran las cantidades experimentales para la síntesis de nanopartículas con sus respectivas incertidumbres. Elaboración propia (2025).

Cuadro 16: Datos experimentales para corridas de síntesis de partículas encapsuladoras de limoneno.

Corrida	Peso BPO ( $\pm 0.005g$ )	Peso SDS ( $\pm 0.005g$ )	Volumen MMA ( $\pm 0.05$ mL)	Volumen Limoneno ( $\pm 0.05$ mL)
1	0.0924	0.4799	10.0	3.1
2	0.0978	0.9456	10.0	3.0
3	0.0999	1.8673	10.1	3.0
4	0.0934	2.8532	10.0	3.1

Nota: En el cuadro anterior se demuestran las cantidades experimentales que se utilizaron para la encapsulación de limoneno en polimetilmetacrilato. Elaboración propia (2025).

Cuadro 17: Datos originales del estudio del triplicado de tamaño de partícula con una concentración de 5 % m/m de surfactante

Tamaño de partícula muestra 1 (nm)	Tamaño de partícula Muestra 2 (nm)	Tamaño de partícula muestra 3 (nm)
1	1	0.9999998
1.068411	1.068411	1.069853
1.141502	1.141502	1.144585
1.219594	1.219594	1.224538
1.303027	1.303027	1.310076
1.392169	1.392169	1.401589
1.487408	1.487408	1.499494
1.589164	1.589164	1.604238
1.69788	1.69788	1.716299
1.814034	1.814034	1.836188
1.938133	1.938133	1.964451
2.070723	2.070723	2.101675
2.212384	2.212384	2.248483
2.363735	2.363735	2.405546
2.52544	2.52544	2.573581
2.698209	2.698209	2.753354
2.882796	2.882796	2.945684
3.080011	3.080011	3.151449
3.290718	3.290718	3.371588
3.515839	3.515839	3.607103
3.756361	3.756361	3.859071
4.013338	4.013338	4.128639
4.287894	4.287894	4.417037

4.581234	4.581234	4.72558
4.89464	4.89464	5.055676
5.229488	5.229488	5.408831
5.587243	5.587243	5.786655
5.969471	5.969471	6.19087
6.377849	6.377849	6.623322
6.814164	6.814164	7.085982
7.280328	7.280328	7.580959
7.778383	7.778383	8.110513
8.310511	8.310511	8.677057
8.879041	8.879041	9.283176
9.486465	9.486465	9.931635
10.13544	10.13544	10.62539
10.82882	10.82882	11.36761
11.56963	11.56963	12.16167
12.36112	12.36112	13.0112
13.20676	13.20676	13.92007
14.11025	14.11025	14.89243
15.07554	15.07554	15.93271
16.10688	16.10688	17.04566
17.20877	17.20877	18.23635
18.38603	18.38603	19.51022
19.64384	19.64384	20.87307
20.9877	20.9877	22.33112
22.42348	22.42348	23.89101
23.9575	23.9575	25.55987
25.59645	25.59645	27.34531
27.34754	27.34754	29.25546
29.21841	29.21841	31.29905
31.21727	31.21727	33.48539
33.35288	33.35288	35.82444
35.63458	35.63458	38.32689
38.07238	38.07238	41.00414
40.67695	40.67695	43.86841
43.4597	43.4597	46.93275
46.43283	46.43283	50.21115
49.60934	49.60934	53.71855
53.00317	53.00317	57.47096
56.62917	56.62917	61.48548
60.50323	60.50323	65.78043
64.64231	64.64231	70.3754
69.06457	69.06457	75.29134
73.78934	73.78934	80.55067

78.83735	78.83735	86.17738
84.23069	84.23069	92.19714
89.993	89.993	98.63739
96.14951	96.14951	105.5275
102.7272	102.7272	112.8989
109.7549	109.7549	120.7853
117.2633	117.2633	129.2225
125.2854	125.2854	138.2491
133.8563	133.8563	147.9062
143.0136	143.0136	158.2379
152.7973	152.7973	169.2913
163.2503	163.2503	181.1169
174.4184	174.4184	193.7684
186.3506	186.3506	207.3037
199.099	199.099	221.7845
212.7196	212.7196	237.2769
227.2719	227.2719	253.8514
242.8199	242.8199	271.5837
259.4314	259.4314	290.5547
277.1794	277.1794	310.8508
296.1415	296.1415	332.5647
316.4008	316.4008	355.7953
338.0461	338.0461	380.6488
361.1722	361.1722	407.2383
385.8804	385.8804	435.6851
412.2789	412.2789	466.119
440.4833	440.4833	498.6789
470.6172	470.6172	533.5132
502.8126	502.8126	570.7807
537.2105	537.2105	610.6515
573.9617	573.9617	653.3074
613.227	613.227	698.9429
655.1785	655.1785	747.7662
699.9999	699.9999	800

Nota: Los resultados de la tabla anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 18: Datos originales del estudio del triplicado de tamaño de partícula con una concentración de 10 % m/m de surfactante

Tamaño de partícula (nm) muestra 1	Tamaño de partícula (nm) muestra 2	Tamaño de partícula (nm) muestra 3
1	1	1
1.068411	1.068411	1.066749
1.141502	1.141502	1.137953
1.219594	1.219594	1.21391
1.303027	1.303027	1.294937
1.392169	1.392169	1.381372
1.487408	1.487408	1.473577
1.589164	1.589164	1.571936
1.69788	1.69788	1.676861
1.814034	1.814034	1.788789
1.938133	1.938133	1.908189
2.070723	2.070723	2.035558
2.212384	2.212384	2.171429
2.363735	2.363735	2.316369
2.52544	2.52544	2.470984
2.698209	2.698209	2.635919
2.882796	2.882796	2.811863
3.080011	3.080011	2.999551
3.290718	3.290718	3.199768
3.515839	3.515839	3.413348
3.756361	3.756361	3.641185
4.013338	4.013338	3.884229
4.287894	4.287894	4.143497
4.581234	4.581234	4.42007
4.89464	4.89464	4.715104
5.229488	5.229488	5.029831
5.587243	5.587243	5.365566
5.969471	5.969471	5.72371
6.377849	6.377849	6.105761
6.814164	6.814164	6.513312
7.280328	7.280328	6.948068
7.778383	7.778383	7.411842
8.310511	8.310511	7.906573
8.879041	8.879041	8.434327
9.486465	9.486465	8.997308
10.13544	10.13544	9.597867
10.82882	10.82882	10.23851
11.56963	11.56963	10.92192
12.36112	12.36112	11.65094

13.20676	13.20676	12.42863
14.11025	14.11025	13.25822
15.07554	15.07554	14.14319
16.10688	16.10688	15.08723
17.20877	17.20877	16.09429
18.38603	18.38603	17.16856
19.64384	19.64384	18.31454
20.9877	20.9877	19.53701
22.42348	22.42348	20.84108
23.9575	23.9575	22.2322
25.59645	25.59645	23.71617
27.34754	27.34754	25.2992
29.21841	29.21841	26.98789
31.21727	31.21727	28.78929
33.35288	33.35288	30.71094
35.63458	35.63458	32.76086
38.07238	38.07238	34.9476
40.67695	40.67695	37.28031
43.4597	43.4597	39.76872
46.43283	46.43283	42.42324
49.60934	49.60934	45.25493
53.00317	53.00317	48.27564
56.62917	56.62917	51.49798
60.50323	60.50323	54.93541
64.64231	64.64231	58.60228
69.06457	69.06457	62.5139
73.78934	73.78934	66.68662
78.83735	78.83735	71.13787
84.23069	84.23069	75.88623
89.993	89.993	80.95154
96.14951	96.14951	86.35496
102.7272	102.7272	92.11903
109.7549	109.7549	98.26786
117.2633	117.2633	104.8271
125.2854	125.2854	111.8242
133.8563	133.8563	119.2883
143.0136	143.0136	127.2507
152.7973	152.7973	135.7445
163.2503	163.2503	144.8053
174.4184	174.4184	154.4708
186.3506	186.3506	164.7816
199.099	199.099	175.7805
212.7196	212.7196	187.5136

227.2719	227.2719	200.0299
242.8199	242.8199	213.3817
259.4314	259.4314	227.6246
277.1794	277.1794	242.8183
296.1415	296.1415	259.0261
316.4008	316.4008	276.3158
338.0461	338.0461	294.7595
361.1722	361.1722	314.4343
385.8804	385.8804	335.4224
412.2789	412.2789	357.8114
440.4833	440.4833	381.6949
470.6172	470.6172	407.1725
502.8126	502.8126	434.3508
537.2105	537.2105	463.3431
573.9617	573.9617	494.2707
613.227	613.227	527.2626
655.1785	655.1785	562.4568
699.9999	699.9999	600

Nota: Los resultados de la tabla anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 19: Datos originales del estudio del triplicado de tamaño de partícula con una concentración de 20 % m/m de surfactante

Tamaño de partícula (nm) muestra 1	Tamaño de partícula (nm) muestra 2	Tamaño de partícula (nm) muestra 3
1	1	1
1.068411	1.068411	1.072267
1.141502	1.141502	1.149757
1.219594	1.219594	1.232847
1.303027	1.303027	1.321941
1.392169	1.392169	1.417474
1.487408	1.487408	1.519911
1.589164	1.589164	1.629751
1.69788	1.69788	1.747528
1.814034	1.814034	1.873817
1.938133	1.938133	2.009233

2.070723	2.070723	2.154435
2.212384	2.212384	2.31013
2.363735	2.363735	2.477077
2.52544	2.52544	2.656088
2.698209	2.698209	2.848036
2.882796	2.882796	3.053856
3.080011	3.080011	3.274549
3.290718	3.290718	3.511192
3.515839	3.515839	3.764936
3.756361	3.756361	4.037017
4.013338	4.013338	4.328762
4.287894	4.287894	4.641589
4.581234	4.581234	4.977024
4.89464	4.89464	5.336699
5.229488	5.229488	5.722368
5.587243	5.587243	6.135908
5.969471	5.969471	6.579333
6.377849	6.377849	7.054803
6.814164	6.814164	7.564634
7.280328	7.280328	8.111309
7.778383	7.778383	8.69749
8.310511	8.310511	9.326034
8.879041	8.879041	10
9.486465	9.486465	10.72267
10.13544	10.13544	11.49757
10.82882	10.82882	12.32847
11.56963	11.56963	13.21941
12.36112	12.36112	14.17474
13.20676	13.20676	15.19911
14.11025	14.11025	16.29751
15.07554	15.07554	17.47528
16.10688	16.10688	18.73818
17.20877	17.20877	20.09233
18.38603	18.38603	21.54435
19.64384	19.64384	23.1013
20.9877	20.9877	24.77077
22.42348	22.42348	26.56088
23.9575	23.9575	28.48036
25.59645	25.59645	30.53856
27.34754	27.34754	32.74549
29.21841	29.21841	35.11192
31.21727	31.21727	37.64936
33.35288	33.35288	40.37017

35.63458	35.63458	43.28762
38.07238	38.07238	46.41589
40.67695	40.67695	49.77024
43.4597	43.4597	53.36699
46.43283	46.43283	57.22368
49.60934	49.60934	61.35908
53.00317	53.00317	65.79332
56.62917	56.62917	70.54803
60.50323	60.50323	75.64634
64.64231	64.64231	81.11308
69.06457	69.06457	86.9749
73.78934	73.78934	93.26035
78.83735	78.83735	100
84.23069	84.23069	107.2267
89.993	89.993	114.9757
96.14951	96.14951	123.2847
102.7272	102.7272	132.1941
109.7549	109.7549	141.7474
117.2633	117.2633	151.9911
125.2854	125.2854	162.9751
133.8563	133.8563	174.7529
143.0136	143.0136	187.3818
152.7973	152.7973	200.9233
163.2503	163.2503	215.4435
174.4184	174.4184	231.013
186.3506	186.3506	247.7077
199.099	199.099	265.6088
212.7196	212.7196	284.8036
227.2719	227.2719	305.3856
242.8199	242.8199	327.455
259.4314	259.4314	351.1192
277.1794	277.1794	376.4936
296.1415	296.1415	403.7018
316.4008	316.4008	432.8762
338.0461	338.0461	464.1589
361.1722	361.1722	497.7024
385.8804	385.8804	533.6699
412.2789	412.2789	572.2368
440.4833	440.4833	613.5908
470.6172	470.6172	657.9332
502.8126	502.8126	705.4803
537.2105	537.2105	756.4634
573.9617	573.9617	811.1309

613.227	613.227	869.7491
655.1785	655.1785	932.6035
699.9999	699.9999	1000

Nota: Los resultados de la tabla anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 20: Datos originales del estudio del triplicado de tamaño de partícula con una concentración de 30 % m/m de surfactante

Tamaño de partícula (nm) Muestra 1	Tamaño de partícula (nm) Muestra 2	Tamaño de partícula (nm) Muestra 3
0.9999995	1	1
1.064786	1.068411	1.068411
1.133769	1.141502	1.141502
1.207221	1.219594	1.219594
1.285432	1.303027	1.303027
1.36871	1.392169	1.392169
1.457383	1.487408	1.487408
1.551801	1.589164	1.589164
1.652336	1.69788	1.69788
1.759385	1.814034	1.814034
1.873368	1.938133	1.938133
1.994736	2.070723	2.070723
2.123967	2.212384	2.212384
2.26157	2.363735	2.363735
2.408088	2.52544	2.52544
2.564098	2.698209	2.698209
2.730216	2.882796	2.882796
2.907096	3.080011	3.080011
3.095435	3.290718	3.290718
3.295976	3.515839	3.515839
3.509509	3.756361	3.756361
3.736876	4.013338	4.013338
3.978973	4.287894	4.287894
4.236754	4.581234	4.581234
4.511237	4.89464	4.89464
4.803502	5.229488	5.229488

5.114701	5.587243	5.587243
5.446063	5.969471	5.969471
5.798891	6.377849	6.377849
6.174578	6.814164	6.814164
6.574604	7.280328	7.280328
7.000546	7.778383	7.778383
7.454083	8.310511	8.310511
7.937004	8.879041	8.879041
8.451209	9.486465	9.486465
8.998731	10.13544	10.13544
9.581721	10.82882	10.82882
10.20248	11.56963	11.56963
10.86346	12.36112	12.36112
11.56726	13.20676	13.20676
12.31666	14.11025	14.11025
13.1146	15.07554	15.07554
13.96425	16.10688	16.10688
14.86893	17.20877	17.20877
15.83223	18.38603	18.38603
16.85794	19.64384	19.64384
17.9501	20.9877	20.9877
19.11301	22.42348	22.42348
20.35127	23.9575	23.9575
21.66974	25.59645	25.59645
23.07364	27.34754	27.34754
24.56849	29.21841	29.21841
26.16018	31.21727	31.21727
27.85499	33.35288	33.35288
29.65961	35.63458	35.63458
31.58113	38.07238	38.07238
33.62715	40.67695	40.67695
35.80571	43.4597	43.4597
38.12542	46.43283	46.43283
40.59542	49.60934	49.60934
43.22543	53.00317	53.00317
46.02583	56.62917	56.62917
49.00766	60.50323	60.50323
52.18267	64.64231	64.64231
55.56338	69.06457	69.06457
59.16311	73.78934	73.78934
62.99605	78.83735	78.83735
67.07731	84.23069	84.23069
71.42297	89.993	89.993

76.05019	96.14951	96.14951
80.97717	102.7272	102.7272
86.22336	109.7549	109.7549
91.80942	117.2633	117.2633
97.75739	125.2854	125.2854
104.0907	133.8563	133.8563
110.8343	143.0136	143.0136
118.0148	152.7973	152.7973
125.6605	163.2503	163.2503
133.8016	174.4184	174.4184
142.47	186.3506	186.3506
151.7001	199.099	199.099
161.5281	212.7196	212.7196
171.9929	227.2719	227.2719
183.1356	242.8199	242.8199
195.0002	259.4314	259.4314
207.6335	277.1794	277.1794
221.0853	296.1415	296.1415
235.4085	316.4008	316.4008
250.6597	338.0461	338.0461
266.8989	361.1722	361.1722
284.1902	385.8804	385.8804
302.6017	412.2789	412.2789
322.2061	440.4833	440.4833
343.0805	470.6172	470.6172
365.3073	502.8126	502.8126
388.9742	537.2105	537.2105
414.1742	573.9617	573.9617
441.0069	613.227	613.227
469.578	655.1785	655.1785
500	699.9999	699.9999

Nota: Los resultados de la tabla anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración Kin Ya Tomizaki (2025).

### C. ECUACIONES UTILIZADAS

Ecuación 1: Desviación estándar muestral

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Dónde:

$\sigma$  = Desviación estándar muestral

$x_i$  = Valor de la medición

$\bar{x}$  = Valor promedio

n = No. de datos

Ecuación 2: Intervalo de confianza

$$I.C. = \bar{x} \pm t_{student} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Dónde:

I.C. = Intervalo de confianza al 95 %

$\bar{x}$  = Valor promedio

$t_{student}$  = Valor de t student para una cola

$\sigma$  = Desviación estándar muestral

n = No. de datos

Ecuación 3: Coeficiente de variación

$$C.V = 100\% * \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

Dónde:

C.V. = Coeficiente de variación

$\sigma$  = Desviación estándar muestral

$\bar{x}$  = Valor promedio

Ecuación 4: Cálculo de incertidumbres para sumas y restas

$$S_y = \sqrt{S_a^2 + S_b^2 + \dots + S_n^2}$$

Donde:

$S_y$  = Incertidumbre del valor calculado por suma o resta  $S_a, b, \dots$ ,

$n$  = Incertidumbre de los valores usados para el cálculo

Ecuación 5: Cálculo de incertidumbres para multiplicaciones y divisiones

$$S_y = y * \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2 + \dots + \left(\frac{S_n}{n}\right)^2}$$

Donde:

$S_y$  = Incertidumbre del valor calculado por multiplicación o división

$y$  = Valor al cual se quiere calcular la incertidumbre

$S_a, b, \dots, n$  = Incertidumbre de los valores usados para el cálculo

$a, b, \dots, n$  = Valores utilizados para el cálculo

Ecuación 6: Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Dónde:

$\bar{x}$  = Valor promedio

$x_1, 2, \dots, n$  = Valor de los diferentes datos obtenidos

$n$  = Cantidad de repeticiones

Ecuación 7: Porcentaje de error

$$\text{Porcentaje de error} = \left( \frac{V_{teorico} - V_{exp}}{V_{teorico}} \right) * 100$$

Donde

$V_{teorico}$  = Valor teorico

$V_{exp}$  = valor experimental

Ecuación 8: Porcentaje de variabilidad

$$\% \text{ de Varianza} = \frac{Adj. ss}{Adj. ss \text{ total}} * 100\%$$

Donde

Adj.ss = suma de cuadrados ajusta

Adj.ss total = Suma de cuadrados ajustada total

Ecuación 9: Diferencia de peso

$$m_{final} = m_{envase} + m_{PMMA}$$

Dónde:

$m_{envase}$  = masa del envase

$m_{PMMA}$  = masa polimetilmetacrilato

Ecuación 10: calor removido en condensador

$$Q_{cond.} = m_{H_2O} * C_{PH_2O} * \Delta T$$

Donde

$Q_{cond}$  = Calor removido en el condensador por el agua

$m_{H_2O}$  = Masa de agua utilizada en condensador de reflujo

$C_{pH_2O}$  = Capacidad calorífica del agua

$\Delta T$  = Cambio de temperatura del agua en el condensador

Ecuación 11: calor aportado por la estufa

$$Q_{estufa} = m_{H_2O} * C_{PH_2O} * \Delta T$$

Donde

$Q_{cond}$  = Calor removido en el condensador por el agua

$m_{H_2O}$  = Masa de agua utilizada en condensador de reflujo

$C_{pH_2O}$  = Capacidad calorífica del agua

$\Delta T$  = Cambio de temperatura del agua en el reactor

Ecuación 12: Porcentaje m/m de reactivo

$Cantidad\ de\ reactivo = Porcentaje * \rho_{reactivo}$

Donde

Porcentaje= Porcentaje requerido de reactivo

$\rho_{reactivo}$ = densidad del reactivo

Ecuación 13: conversión de volumen a masa

$masa = vol.* \rho$

Donde

Vol= volume del reactive

$\rho$ = densidad del reactive

Ecuación 14: Rendimiento Encapsulamiento

$Porcentaje\ de\ encapsulamiento = 100 - \% GC$

Donde

% GC= porcentaje de limoneno en análisis GC

Ecuación 15: Calculo para diluciones

$C_1V_1 = C_2V_2$

Donde

$C_1$ = concentración primera solución

$V_1$ = volumen primera solución

$C_2$ = concentración segunda solución

$V_2$ = volumen segunda solución

Ecuación 16: Calculo esfuerzo cortante

$$\tau = \mu \dot{\gamma} = \frac{du}{dy}$$

Donde:

$\tau$ =esfuerzo cortante

$\dot{\gamma}$ = tasa de esfuerzo cortante

$du$ = diferencial de velocidad

$dy$ = diferencial de distancia

## D. CÁLCULO DE MUESTRA

Calculo 1: Masa de metacrilato de metilo

$$Masa = 10 \text{ ml} * 0.94 \frac{g}{ml} = 9.4 \text{ g MMA}$$

En el cálculo anterior se expone como se determinó la cantidad de metacrilato de metilo (MMA) utilizada para la síntesis de nanopartículas. Para ello se utilizó la ecuación 13 de la sección de ecuaciones, el volumen experimental de monómero y su densidad en g/mL.

Calculo 2: Cantidad de dodecilsulfato sódico utilizado

$$Masa \text{ SDS} = 5 \% m/m * 9.4g = 0.47g$$

En el cálculo anterior se demuestra cómo se realizó el cálculo para cada corrida de síntesis de nanopartículas haciendo uso del resultado del cálculo 1 y de la ecuación 12, sección de ecuaciones. Este cálculo se repitió para todas las corridas experimentales incrementando la concentración de surfactante.

Calculo 3: Cantidad de peróxido de benzoilo utilizado

$$Masa \text{ BPO}: 1\% m/m * 9.4g = 0.094 g$$

En el cálculo anterior se demuestra cómo se realizó el cálculo para la determinación de la cantidad de iniciador utilizado. Para ello se utilizó el resultado del cálculo 1 y de la ecuación 12 sección de resultados.

Calculo 4: Porcentaje de encapsulamiento

$$\text{Porcentaje} = (100 - 1.77)\% = 98.23\%$$

En el cálculo anterior se demuestra cómo se realizó el cálculo de porcentaje de rendimiento de encapsulamiento haciendo uso de la ecuación 14 de la sección anterior y de los resultados expuestos en la sección de resultados, resultados de encapsulación por análisis de cromatografía de gases, donde se expresa el valor de limoneno libre en la muestra. Este cálculo fue repetido para las 4 iteraciones realizadas.

Calculo 5: Cantidad de polimetilmetacrilato obtenido

$$\text{masa PMMA} = 76.6g - 69.49g = 7.105g$$

En el cálculo anterior se demuestra cómo se obtuvo la cantidad de polimetilmetacrilato (PMMA) obtenido, mediante una diferencia de peso con el beaker utilizado.

Calculo 6: Flujo volumétrico de limoneno condensado

$$\dot{V}_{\text{limoneno}} = 22 \frac{\text{gotas}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ ml}}{20 \text{ gotas}} = 1.1 \text{ ml/min}$$

En el cálculo anterior se demuestra cómo se realizó el cálculo para el flujo de condensado de limoneno durante la encapsulación. Este flujo fue disminuyendo a medida que se deba la polimerización.

Calculo 7: Flujo masico de limoneno condensado

$$\dot{m}_{\text{limoneno}} = 1.1 \frac{\text{ml}}{\text{min}} * 0.84 \frac{\text{g}}{\text{ml}} = 0.924 \text{ g/min}$$

En el cálculo anterior se demuestra cómo se realizó la conversión de flujo volumétrico de limoneno a flujo másico, haciendo uso del resultado del cálculo anterior con la respectiva densidad del limoneno.

Calculo 8: Flujo masico de agua por el condensador

$$\dot{V}_{agua} = \frac{6.01 ml}{s} * \frac{60 s}{1 min} * \frac{1 g}{ml} = 360.60 g/min$$

En la muestra de cálculo anterior se demuestra cómo se realizó el cálculo para el flujo de agua por el condensador haciendo uso de una probeta y un cronometro.

Calculo 9: Energía aplicada al reactor

$$Q = 0.53 kg_{H_2O} \left( 4.184 \frac{kJ}{kgC} \right) (85 - 25)^{\circ}C = 132.924 kJ$$

En la muestra de cálculo anterior se demuestra el cálculo realizado para determinar la cantidad de energía de calentamiento que aplica la estufa a la reacción, haciendo uso de la ecuación 11 de la sección de ecuaciones, dónde se utilizó la cantidad de agua total tanto en el reactor como en el recipiente de agua.

Calculo 9: Precio unitario por reactivo

$$Precio\ unitario_{MMA} = \frac{\$56.25}{1 L} * \left( \frac{1L}{1000 ml} \right) = \$0.06/ml$$

En la muestra de cálculo anterior se demuestra cómo se determinó el precio unitario del metacrilato de metilo. Este mismo procedimiento fue realizado para todos los reactivos, haciendo uso de la información proporcionada por Merck Millipore.

Calculo 10: Costo de síntesis

$$Costo_{MMA} = 10ml * \$0.06/ml = \$0.56$$

En la muestra de cálculo anterior se demuestra cómo se realizó el costo de la cantidad de reactivo utilizado en la síntesis partiendo del volumen usado y del costo unitario donde MMA es metacrilato de metilo. Este mismo procedimiento se repitió para los demás reactivos hasta tener el precio total.

Calculo 11: Costo total de síntesis

$$Costo\ total = \$0.56 + \$0.45 + \$0.26 + \$1.38 = \$2.65$$

En el cálculo anterior se demuestra cómo se realizó el cálculo para el costo total de síntesis de encapsulamiento a nivel laboratorio del limoneno. Para ello, se utilizaron el costo de todos los reactivos haciendo uso de los dos cálculos anteriores.

Cálculo 12: Calculo para concentración de polímero en muestra

$$C = \frac{7.105 g_{PMMA}}{85 \text{ ml}} * \frac{1000 \text{ mg}}{g} = 83.52 \text{ mg/mL}$$

En la muestra de cálculo anterior se demuestra cómo se realizó el cálculo para determinar la concentración de nanopartículas de polimetilmetacrilato (PMMA) en la solución de 85 mL totales.

Calculo 13: Calculo para dilución 1:10 con agua ultrapura para análisis por DLS

$$C_2 = \frac{\left(83.52 \frac{\text{mg}}{\text{ml}}\right) * (1 \text{ ml})}{9 \text{ ml}} = 9.28 \text{ mg/ml}$$

En la muestra de cálculo anterior se demuestra el cálculo de concentración para dilución para análisis por Dispersión dinámica de luz (DLS). Se realizó haciendo uso del resultado del cálculo anterior tomando una alícuota de 1 mL y diluir en 9 mL de agua ultrapura.

Calculo 13: Calculo de esfuerzo cortante

$$n = \frac{600}{60} = 10 \text{ rev/s}$$

$$v = \pi * 10 \text{ rev/s} * 0.025 \text{ m} = 0.092 \text{ m/s}$$

$$\tau = 0.001 \text{ Pa} * s * \left(\frac{(0.092 - 0) \text{ m/s}}{(0.04 - 0) \text{ m}}\right) = 15 \text{ Pa}$$

En la muestra de cálculo anterior se demuestra cómo se calculó el esfuerzo cortante del agitador para 600 rpm tomando en cuenta desde el centro del agitador al borde del reactor. Este cálculo fue realizado para todas las corridas

## E. DATOS CALCULADOS

Cuadro 21: Resultados de análisis de tamaño de partícula, primera corrida 5 % m/m SDS

Tamaño de Partícula (nm)	Distribución (%)	Distribución Acumulada (%)
1	0	0
1.068411	0	0
1.141502	0	0
1.219594	0	0
1.303027	0	0
1.392169	0	0
1.487408	0	0
1.589164	0	0
1.69788	0	0
1.814034	0	0
1.938133	0	0
2.070723	0	0
2.212384	0	0
2.363735	0	0
2.52544	0	0
2.698209	0	0
2.882796	0	0
3.080011	0	0
3.290718	0	0
3.515839	0	0
3.756361	0	0
4.013338	0	0
4.287894	0	0
4.581234	0	0
4.89464	0	0
5.229488	0	0
5.587243	0	0
5.969471	0	0
6.377849	0	0
6.814164	0	0
7.280328	0	0
7.778383	0	0
8.310511	0	0
8.879041	0	0
9.486465	0	0
10.13544	0	0

10.82882	0	0
11.56963	0	0
12.36112	0	0
13.20676	0	0
14.11025	0	0
15.07554	0	0
16.10688	0	0
17.20877	0	0
18.38603	0	0
19.64384	0	0
20.9877	0	0
22.42348	0	0
23.9575	0	0
25.59645	0	0
27.34754	0	0
29.21841	9.49553	9.495518
31.21727	12.13439	21.62991
33.35288	13.2241	34.854
35.63458	12.95287	47.80688
38.07238	11.74136	59.54824
40.67695	10.02757	69.57581
43.4597	8.163236	77.73904
46.43283	6.385001	84.12405
49.60934	4.824945	88.94899
53.00317	3.536286	92.48528
56.62917	2.520618	95.00589
60.50323	1.7505	96.75639
64.64231	1.185737	97.94213
69.06457	0.7837632	98.72589
73.78934	0.505468	99.23136
78.83735	0.3178271	99.54919
84.23069	0.194563	99.74375
89.993	0.1157005	99.85945
96.14951	0.06661992	99.92607
102.7272	0.03697004	99.96304
109.7549	0.01964217	99.98269
117.2633	0.009895107	99.99258
125.2854	0.004657977	99.99725
133.8563	0.002001691	99.99924
143.0136	0.000754154	100
152.7973	0	100
163.2503	0	100
174.4184	0	100

186.3506	0	100
199.099	0	100
212.7196	0	100
227.2719	0	100
242.8199	0	100
259.4314	0	100
277.1794	0	100
296.1415	0	100
316.4008	0	100
338.0461	0	100
361.1722	0	100
385.8804	0	100
412.2789	0	100
440.4833	0	100
470.6172	0	100
502.8126	0	100
537.2105	0	100
573.9617	0	100
613.227	0	100
655.1785	0	100
699.9999	0	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaborado por: Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 22: Resultados de análisis de tamaño de partícula, segunda corrida 5 %m/m SDS.

Tamaño de Partícula (nm)	Distribución (%)	Distribución Acumulada (%)
1	0	0
1.068411	0	0
1.141502	0	0
1.219594	0	0
1.303027	0	0
1.392169	0	0
1.487408	0	0
1.589164	0	0
1.69788	0	0
1.814034	0	0
1.938133	0	0

2.070723	0	0
2.212384	0	0
2.363735	0	0
2.52544	0	0
2.698209	0	0
2.882796	0	0
3.080011	0	0
3.290718	0	0
3.515839	0	0
3.756361	0	0
4.013338	0	0
4.287894	0	0
4.581234	0	0
4.89464	0	0
5.229488	0	0
5.587243	0	0
5.969471	0	0
6.377849	0	0
6.814164	0	0
7.280328	0	0
7.778383	0	0
8.310511	0	0
8.879041	0	0
9.486465	0	0
10.13544	0	0
10.82882	0	0
11.56963	0	0
12.36112	0	0
13.20676	0	0
14.11025	0	0
15.07554	0	0
16.10688	0	0
17.20877	0	0
18.38603	0	0
19.64384	0	0
20.9877	0	0
22.42348	0	0
23.9575	0	0
25.59645	0	0
27.34754	0	0
29.21841	0	0
31.21727	0	0
33.35288	9.265469	9.265464

35.63458	12.46074	21.7262
38.07238	13.84809	35.5743
40.67695	13.60406	49.17836
43.4597	12.24033	61.41869
46.43283	10.29983	71.71852
49.60934	8.212847	79.93137
53.00317	6.259403	86.19077
56.62917	4.586148	90.77692
60.50323	3.242514	94.01943
64.64231	2.217391	96.23682
69.06457	1.468325	97.70515
73.78934	0.9415824	98.64673
78.83735	0.5841602	99.23089
84.23069	0.349883	99.58077
89.993	0.2016036	99.78238
96.14951	0.11115	99.89353
102.7272	0.05816117	99.95169
109.7549	0.0285315	99.98022
117.2633	0.01286996	99.9931
125.2854	0.00516795	99.99826
133.8563	0.00173993	100
143.0136	0	100
152.7973	0	100
163.2503	0	100
174.4184	0	100
186.3506	0	100
199.099	0	100
212.7196	0	100
227.2719	0	100
242.8199	0	100
259.4314	0	100
277.1794	0	100
296.1415	0	100
316.4008	0	100
338.0461	0	100
361.1722	0	100
385.8804	0	100
412.2789	0	100
440.4833	0	100
470.6172	0	100
502.8126	0	100
537.2105	0	100
573.9617	0	100

613.227	0	100
655.1785	0	100
699.9999	0	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaborado por: Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 23: Resultados de análisis de tamaño de partícula, tercer triplicado 5 %m/m SDS.

Tamaño de Partícula (nm)	Distribución (%)	Distribución Acumulada (%)
1	0	0
1.069853	0	0
1.144585	0	0
1.224538	0	0
1.310076	0	0
1.401589	0	0
1.499494	0	0
1.604238	0	0
1.716299	0	0
1.836188	0	0
1.964451	0	0
2.101675	0	0
2.248483	0	0
2.405546	0	0
2.573581	0	0
2.753354	0	0
2.945684	0	0
3.151449	0	0
3.371588	0	0
3.607103	0	0
3.859071	0	0
4.128639	0	0
4.417037	0	0
4.72558	0	0
5.055676	0	0
5.408831	0	0
5.786655	0	0
6.19087	0	0
6.623322	0	0

7.085982	0	0
7.580959	0	0
8.110513	0	0
8.677057	0	0
9.283176	0	0
9.931635	0	0
10.62539	0	0
11.36761	0	0
12.16167	0	0
13.0112	0	0
13.92007	0	0
14.89243	0	0
15.93271	0	0
17.04566	0	0
18.23635	0	0
19.51022	0	0
20.87307	0	0
22.33112	0	0
23.89101	0	0
25.55987	0	0
27.34531	7.657601	7.657603
29.25546	10.93453	18.59213
31.29905	12.70006	31.29218
33.48539	12.95879	44.25098
35.82444	12.08235	56.33332
38.32689	10.53126	66.86459
41.00414	8.705539	75.57012
43.86841	6.890475	82.46059
46.93275	5.256545	87.71714
50.21115	3.882904	91.60004
53.71855	2.786317	94.38636
57.47096	1.946683	96.33305
61.48548	1.32611	97.65916
65.78043	0.8815019	98.54066
70.3754	0.5718819	99.11254
75.29134	0.3619559	99.47449
80.55067	0.2232687	99.69776
86.17738	0.1339902	99.83175
92.19714	0.07803041	99.90978
98.63739	0.04393194	99.95371
105.5275	0.02378598	99.9775
112.8989	0.01229106	99.98979
120.7853	0.00599442	99.99579

129.2225	0.00271267	99.9985
138.2491	0.00110797	99.99961
147.9062	0.00038882	100
158.2379	0	100
169.2913	0	100
181.1169	0	100
193.7684	0	100
207.3037	0	100
221.7845	0	100
237.2769	0	100
253.8514	0	100
271.5837	0	100
290.5547	0	100
310.8508	0	100
332.5647	0	100
355.7953	0	100
380.6488	0	100
407.2383	0	100
435.6851	0	100
466.119	0	100
498.6789	0	100
533.5132	0	100
570.7807	0	100
610.6515	0	100
653.3074	0	100
698.9429	0	100
747.7662	0	100
800	0	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaborado por: Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 24: Resumen de análisis de tamaño de partícula, triplicado 5 %m/m SDS.

Tamaño de Partícula (nm)	Distribución Acumulada (%)
1.00	0
1.07	0
1.14	0
1.22	0

1.31	0
1.40	0
1.49	0
1.59	0
1.70	0
1.82	0
1.95	0
2.08	0
2.22	0
2.38	0
2.54	0
2.72	0
2.90	0
3.10	0
3.32	0
3.55	0
3.79	0
4.05	0
4.33	0
4.63	0
4.95	0
5.29	0
5.65	0
6.04	0
6.46	0
6.90	0
7.38	0
7.89	0
8.43	0
9.01	0
9.63	0
10.30	0
11.01	0
11.77	0
12.58	0
13.44	0
14.37	0
15.36	0
16.42	0
17.55	0
18.76	0
20.05	0
21.44	0

22.91	0
24.49	0
26.18	2.55253433
27.98	6.19737667
29.91	13.5958993
31.97	21.9602967
34.18	33.4842613
36.53	45.46589
39.05	56.8975533
41.74	67.0715867
44.62	75.6249567
47.69	82.48087
50.98	87.7555733
54.49	91.6697
58.25	94.4806567
62.26	96.4388267
66.55	97.76383
71.14	98.6351767
76.04	99.19195
81.28	99.5372767
86.89	99.7447667
92.87	99.86518
99.28	99.9323667
106.12	99.9681733
113.43	99.9862333
121.25	99.9947267
129.61	99.9983733
138.54	99.9997467
148.09	100
158.30	100
169.21	100
180.87	100
193.33	100
206.66	100
220.91	100
236.13	100
252.41	100
269.81	100
288.40	100
308.28	100
329.53	100
352.25	100
376.53	100

402.48	100
430.23	100
459.88	100
491.58	100
525.47	100
561.69	100
600.41	100
641.80	100
686.04	100
733.33	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración propia (2025).

Cuadro 25: Resultados de análisis de tamaño de partícula, primer triplicado 10 %m/m SDS

Tamaño de partícula (SDS)	Porcentaje de distribución (%)	Porcentaje acumulado (%)
1	0	0
1.068411	0	0
1.141502	0	0
1.219594	0	0
1.303027	0	0
1.392169	0	0
1.487408	0	0
1.589164	0	0
1.69788	0	0
1.814034	0	0
1.938133	0	0
2.070723	0	0
2.212384	0	0
2.363735	0	0
2.52544	0	0
2.698209	0	0
2.882796	0	0
3.080011	0	0
3.290718	0	0
3.515839	0	0
3.756361	0	0
4.013338	0	0
4.287894	0	0

4.581234	0	0
4.89464	0	0
5.229488	0	0
5.587243	0	0
5.969471	0	0
6.377849	0	0
6.814164	0	0
7.280328	0	0
7.778383	0	0
8.310511	0	0
8.879041	0	0
9.486465	0	0
10.13544	0	0
10.82882	0	0
11.56963	0	0
12.36112	0	0
13.20676	0	0
14.11025	13.21418	13.21416
15.07554	13.9892	27.20336
16.10688	13.55658	40.75994
17.20877	12.30933	53.06927
18.38603	10.62859	63.69786
19.64384	8.814831	72.5127
20.9877	7.071519	79.58421
22.42348	5.51582	85.10004
23.9575	4.199377	89.29942
25.59645	3.129836	92.42925
27.34754	2.288854	94.71811
29.21841	1.645348	96.36346
31.21727	1.164281	97.52774
33.35288	0.8119045	98.33965
35.63458	0.5584443	98.89809
38.07238	0.3791175	99.27721
40.67695	0.2541569	99.53136
43.4597	0.1683104	99.69968
46.43283	0.110125	99.8098
49.60934	0.07119524	99.881
53.00317	0.04547489	99.92647
56.62917	0.02869143	99.95516
60.50323	0.01787436	99.97304
64.64231	0.01098937	99.98402
69.06457	0.00666283	99.99068
73.78934	0.003979906	99.99467

78.83735	0.002339248	99.99701
84.23069	0.001350767	99.99836
89.993	0.000764722	99.99912
96.14951	0.00042336	99.99954
102.7272	0.000228411	99.99977
109.7549	0.000119554	99.99989
117.2633	6.033865E-05	99.99995
125.2854	2.911411E-05	99.99998
133.8563	1.326544E-05	100
143.0136	0	100
152.7973	0	100
163.2503	0	100
174.4184	0	100
186.3506	0	100
199.099	0	100
212.7196	0	100
227.2719	0	100
242.8199	0	100
259.4314	0	100
277.1794	0	100
296.1415	0	100
316.4008	0	100
338.0461	0	100
361.1722	0	100
385.8804	0	100
412.2789	0	100
440.4833	0	100
470.6172	0	100
502.8126	0	100
537.2105	0	100
573.9617	0	100
613.227	0	100
655.1785	0	100
699.9999	0	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaborado por: Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 26: Resultados de análisis de tamaño de partícula, segunda corrida 10 %m/m SDS

Tamaño de partícula (SDS)	Porcentaje de distribución (%)	Porcentaje acumulado (%)
1	0	0
1.068411	0	0
1.141502	0	0
1.219594	0	0
1.303027	0	0
1.392169	0	0
1.487408	0	0
1.589164	0	0
1.69788	0	0
1.814034	0	0
1.938133	0	0
2.070723	0	0
2.212384	0	0
2.363735	0	0
2.52544	0	0
2.698209	0	0
2.882796	0	0
3.080011	0	0
3.290718	0	0
3.515839	0	0
3.756361	0	0
4.013338	0	0
4.287894	0	0
4.581234	0	0
4.89464	0	0
5.229488	0	0
5.587243	0	0
5.969471	0	0
6.377849	0	0
6.814164	0	0
7.280328	0	0
7.778383	0	0
8.310511	0	0
8.879041	0	0
9.486465	0	0
10.13544	0	0
10.82882	0	0
11.56963	0	0
12.36112	0	0

13.20676	13.38947	13.38948
14.11025	14.0762	27.46568
15.07554	13.56649	41.03218
16.10688	12.2665	53.29867
17.20877	10.55898	63.85765
18.38603	8.739511	72.59716
19.64384	7.004354	79.60152
20.9877	5.463857	85.06538
22.42348	4.164475	89.22985
23.9575	3.110573	92.34042
25.59645	2.282154	94.62258
27.34754	1.647658	96.27024
29.21841	1.172298	97.44254
31.21727	0.8229255	98.26546
33.35288	0.5704747	98.83593
35.63458	0.3908255	99.22675
38.07238	0.2647566	99.49151
40.67695	0.1774247	99.66893
43.4597	0.1176566	99.78658
46.43283	0.07722133	99.86381
49.60934	0.05016647	99.91397
53.00317	0.03225793	99.94623
56.62917	0.02052828	99.96676
60.50323	0.01292589	99.97968
64.64231	0.008050225	99.98773
69.06457	0.004956617	99.99269
73.78934	0.003015225	99.9957
78.83735	0.001810757	99.99751
84.23069	0.001072419	99.99859
89.993	0.000625573	99.99921
96.14951	0.000358842	99.99957
102.7272	0.000202003	99.99977
109.7549	0.000111306	99.99989
117.2633	5.983253E-05	99.99995
125.2854	3.123925E-05	99.99998
133.8563	1.574856E-05	99.99999
143.0136	7.603216E-06	100
152.7973	0	100
163.2503	0	100

174.4184	0	100
186.3506	0	100
199.099	0	100
212.7196	0	100
227.2719	0	100
242.8199	0	100
259.4314	0	100
277.1794	0	100
296.1415	0	100
316.4008	0	100
338.0461	0	100
361.1722	0	100
385.8804	0	100
412.2789	0	100
440.4833	0	100
470.6172	0	100
502.8126	0	100
537.2105	0	100
573.9617	0	100
613.227	0	100
655.1785	0	100
699.9999	0	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaborado por: Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 27: Resultados de análisis de tamaño de partícula, tercera corrida 10 %m/m SDS

Tamaño de partícula (SDS)	Porcentaje de distribución (%)	Porcentaje acumulado (%)
1	0	0
1.066749	0	0
1.137953	0	0
1.21391	0	0
1.294937	0	0
1.381372	0	0
1.473577	0	0
1.571936	0	0
1.676861	0	0
1.788789	0	0

1.908189	0	0
2.035558	0	0
2.171429	0	0
2.316369	0	0
2.470984	0	0
2.635919	0	0
2.811863	0	0
2.999551	0	0
3.199768	0	0
3.413348	0	0
3.641185	0	0
3.884229	0	0
4.143497	0	0
4.42007	0	0
4.715104	0	0
5.029831	0	0
5.365566	0	0
5.72371	0	0
6.105761	0	0
6.513312	0	0
6.948068	0	0
7.411842	0	0
7.906573	0	0
8.434327	0	0
8.997308	0	0
9.597867	0	0
10.23851	0	0
10.92192	0	0
11.65094	0	0
12.42863	0	0
13.25822	12.92425	12.92425
14.14319	13.54735	26.47159
15.08723	13.12306	39.59466
16.09429	11.9817	51.57635
17.16856	10.4449	62.02125
18.31454	8.771069	70.79232
19.53701	7.140531	77.93285
20.84108	5.662225	83.59508
22.2322	4.3891	87.98418
23.71617	3.335016	91.31919
25.2992	2.489419	93.80861
26.98789	1.828628	95.63724
28.78929	1.323673	96.96091

30.71094	0.9452469	97.90615
32.76086	0.6665091	98.57266
34.9476	0.4643769	99.03704
37.28031	0.3198752	99.35692
39.76872	0.2179311	99.57485
42.42324	0.146899	99.72175
45.25493	0.09798609	99.81973
48.27564	0.06468382	99.88441
51.49798	0.04225802	99.92667
54.93541	0.02731843	99.95399
58.60228	0.01747193	99.97147
62.5139	0.01105145	99.98252
66.68662	0.006910187	99.98943
71.13787	0.004268609	99.9937
75.88623	0.002602966	99.9963
80.95154	0.001565327	99.99786
86.35496	0.000927157	99.99879
92.11903	0.000540046	99.99934
98.26786	0.000308727	99.99964
104.8271	0.000172776	99.99982
111.8242	9.434836E-05	99.99991
119.2883	5.005652E-05	99.99996
127.2507	2.565363E-05	99.99998
135.7445	1.259863E-05	100
144.8053	0	100
154.4708	0	100
164.7816	0	100
175.7805	0	100
187.5136	0	100
200.0299	0	100
213.3817	0	100
227.6246	0	100
242.8183	0	100
259.0261	0	100
276.3158	0	100
294.7595	0	100
314.4343	0	100
335.4224	0	100
357.8114	0	100

381.6949	0	100
407.1725	0	100
434.3508	0	100
463.3431	0	100
494.2707	0	100
527.2626	0	100
562.4568	0	100
600	0	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaborado por: Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 28: Promedio de análisis de triplicado de 10 % m/m SDS

Tamaño de partícula (SDS)	Porcentaje acumulado (%)
1	0
1.067857	0
1.140319	0
1.2176993	0
1.3003303	0
1.38857	0
1.4827977	0
1.5834213	0
1.6908737	0
1.805619	0
1.9281517	0
2.0590013	0
2.1987323	0
2.3479463	0
2.507288	0
2.6774457	0
2.8591517	0
3.053191	0
3.2604013	0
3.4816753	0
3.717969	0
3.9703017	0
4.2397617	0
4.5275127	0

4.8347947	0
5.1629357	0
5.5133507	0
5.8875507	0
6.287153	0
6.71388	0
7.1695747	0
7.6562027	0
8.175865	0
8.730803	0
9.3234127	0
9.956249	0
10.63205	0
11.353727	0
12.124393	0
12.947383	4.46316
13.82624	17.86803
14.764757	31.56904333
15.766997	44.55109
16.837277	56.16775667
17.980207	66.10542333
19.20074	74.30218
20.504137	80.86081333
21.896013	85.97499
23.3824	89.87467333
24.96969	92.79034
26.66476	94.93232
28.474903	96.48108
30.407943	97.58470333
32.472233	98.36057667
34.676673	98.89916667
37.030787	99.26858667
39.544737	99.51907
42.229373	99.68703667
45.0963	99.79845333
48.15787	99.87156667
51.427327	99.91903667
54.918773	99.94953
58.64729	99.96890333
62.628967	99.98107333
66.881013	99.98863
71.421767	99.99326667
76.270857	99.99607333

81.449203	99.99775
86.97918	99.99873
92.88466	99.9993
99.191143	99.99962667
105.92589	99.99980667
113.1179	99.99990667
120.79833	99.99995667
129.0003	99.99998333
137.7593	99.99999333
147.11303	100
157.10197	100
167.7692	100
179.16093	100
191.32617	100
204.3176	100
218.19123	100
233.00717	100
248.82913	100
265.7257	100
283.7697	100
303.03913	100
323.61723	100
345.5929	100
369.06107	100
394.12307	100
420.88717	100
449.46897	100
479.992	100
512.58803	100
547.39803	100
584.5722	100
624.27127	100
666.6666	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración propia (2025).

Cuadro 29: Resultados primer análisis de partícula 20 % m/m SDS.

Tamaño de partícula (SDS)	Porcentaje de distribución (%)	Porcentaje acumulado (%)
---------------------------	--------------------------------	--------------------------

1	0	0
1.068411	0	0
1.141502	0	0
1.219594	0	0
1.303027	0	0
1.392169	0	0
1.487408	0	0
1.589164	0	0
1.69788	0	0
1.814034	0	0
1.938133	0	0
2.070723	0	0
2.212384	0	0
2.363735	0	0
2.52544	0	0
2.698209	0	0
2.882796	0	0
3.080011	0	0
3.290718	0	0
3.515839	0	0
3.756361	0	0
4.013338	0	0
4.287894	0	0
4.581234	0	0
4.89464	0	0
5.229488	0	0
5.587243	0	0
5.969471	0	0
6.377849	0	0
6.814164	0	0
7.280328	0	0
7.778383	0	0
8.310511	0	0
8.879041	0	0
9.486465	0	0
10.13544	0	0
10.82882	0	0
11.56963	0	0
12.36112	0	0
13.20676	0	0
14.11025	0	0
15.07554	12.46915	12.46914
16.10688	13.45747	25.92661

17.20877	13.24845	39.17506
18.38603	12.1962	51.37126
19.64384	10.6637	62.03496
20.9877	8.948457	70.98341
22.42348	7.259845	78.24326
23.9575	5.724829	83.96809
25.59645	4.405426	88.37351
27.34754	3.318403	91.69192
29.21841	2.452551	94.14447
31.21727	1.781827	95.9263
33.35288	1.274426	97.20073
35.63458	0.8984136	98.09914
38.07238	0.6248199	98.72396
40.67695	0.4290097	99.15297
43.4597	0.2909747	99.44395
46.43283	0.1950279	99.63898
49.60934	0.1292142	99.76819
53.00317	0.084637	99.85283
56.62917	0.05480981	99.90764
60.50323	0.03508833	99.94273
64.64231	0.02220128	99.96493
69.06457	0.01387867	99.97881
73.78934	0.008567476	99.98737
78.83735	0.005219105	99.99259
84.23069	0.003134673	99.99573
89.993	0.001854165	99.99758
96.14951	0.001078542	99.99866
102.7272	0.000615828	99.99928
109.7549	0.000344345	99.99962
117.2633	0.000187983	99.99981
125.2854	9.979186E-05	99.99991
133.8563	5.12382E-05	99.99996
143.0136	2.525814E-05	99.99998
152.7973	1.182844E-05	100
163.2503	0	100
174.4184	0	100
186.3506	0	100
199.099	0	100
212.7196	0	100
227.2719	0	100
242.8199	0	100
259.4314	0	100
277.1794	0	100

296.1415	0	100
316.4008	0	100
338.0461	0	100
361.1722	0	100
385.8804	0	100
412.2789	0	100
440.4833	0	100
470.6172	0	100
502.8126	0	100
537.2105	0	100
573.9617	0	100
613.227	0	100
655.1785	0	100
699.9999	0	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaborado por: Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 30: Resultados segundo análisis de partícula 20 % m/m SDS

Tamaño de partícula (SDS)	Porcentaje de distribución (%)	Porcentaje acumulado (%)
1	0	0
1.068411	0	0
1.141502	0	0
1.219594	0	0
1.303027	0	0
1.392169	0	0
1.487408	0	0
1.589164	0	0
1.69788	0	0
1.814034	0	0
1.938133	0	0
2.070723	0	0
2.212384	0	0
2.363735	0	0
2.52544	0	0
2.698209	0	0
2.882796	0	0
3.080011	0	0

3.290718	0	0
3.515839	0	0
3.756361	0	0
4.013338	0	0
4.287894	0	0
4.581234	0	0
4.89464	0	0
5.229488	0	0
5.587243	0	0
5.969471	0	0
6.377849	0	0
6.814164	0	0
7.280328	0	0
7.778383	0	0
8.310511	0	0
8.879041	0	0
9.486465	0	0
10.13544	0	0
10.82882	0	0
11.56963	0	0
12.36112	0	0
13.20676	0	0
14.11025	13.92436	13.92436
15.07554	14.1858	28.11016
16.10688	13.44366	41.55382
17.20877	12.05793	53.61175
18.38603	10.35394	63.96569
19.64384	8.580116	72.54581
20.9877	6.90167	79.44748
22.42348	5.412116	84.8596
23.9575	4.151124	89.01072
25.59645	3.12223	92.13295
27.34754	2.307509	94.44046
29.21841	1.678425	96.11889
31.21727	1.203101	97.32199
33.35288	0.850736	98.17273
35.63458	0.5939404	98.76667
38.07238	0.4096692	99.17634
40.67695	0.2793121	99.45565
43.4597	0.1883131	99.64397
46.43283	0.1255808	99.76955
49.60934	0.08284955	99.85239
53.00317	0.05407631	99.90647

56.62917	0.03491855	99.94139
60.50323	0.02230354	99.96369
64.64231	0.01408797	99.97778
69.06457	0.008796571	99.98658
73.78934	0.005426819	99.992
78.83735	0.003305593	99.99531
84.23069	0.001986321	99.99729
89.993	0.001176168	99.99847
96.14951	0.000685344	99.99915
102.7272	0.000392292	99.99954
109.7549	0.000220094	99.99976
117.2633	0.00012069	99.99989
125.2854	6.444341E-05	99.99995
133.8563	3.334213E-05	99.99998
143.0136	1.660321E-05	99.99999
152.7973	7.882435E-06	100
163.2503	0	100
174.4184	0	100
186.3506	0	100
199.099	0	100
212.7196	0	100
227.2719	0	100
242.8199	0	100
259.4314	0	100
277.1794	0	100
296.1415	0	100
316.4008	0	100
338.0461	0	100
361.1722	0	100
385.8804	0	100
412.2789	0	100
440.4833	0	100
470.6172	0	100
502.8126	0	100
537.2105	0	100
573.9617	0	100
613.227	0	100
655.1785	0	100
699.9999	0	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaborado por: Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 31: Resultados tercer análisis de partícula 20 % m/m SDS

Tamaño de partícula (SDS)	Porcentaje de distribución (%)	Porcentaje acumulado (%)
1	0	0
1.072267	0	0
1.149757	0	0
1.232847	0	0
1.321941	0	0
1.417474	0	0
1.519911	0	0
1.629751	0	0
1.747528	0	0
1.873817	0	0
2.009233	0	0
2.154435	0	0
2.31013	0	0
2.477077	0	0
2.656088	0	0
2.848036	0	0
3.053856	0	0
3.274549	0	0
3.511192	0	0
3.764936	0	0
4.037017	0	0
4.328762	0	0
4.641589	0	0
4.977024	0	0
5.336699	0	0
5.722368	0	0
6.135908	0	0
6.579333	0	0
7.054803	0	0
7.564634	0	0
8.111309	0	0
8.69749	0	0
9.326034	0	0

10	0	0
10.72267	0	0
11.49757	0	0
12.32847	0	0
13.21941	0	0
14.17474	0	0
15.19911	0	0
16.29751	16.93568	16.93568
17.47528	16.10503	33.04071
18.73818	14.38527	47.42599
20.09233	12.24129	59.66728
21.54435	10.02039	69.68767
23.1013	7.944757	77.63242
24.77077	6.132258	83.76468
26.56088	4.625689	88.39037
28.48036	3.42015	91.81052
30.53856	2.48456	94.29507
32.74549	1.776684	96.07175
35.11192	1.25254	97.3243
37.64936	0.8716424	98.19594
40.37017	0.5993738	98.79531
43.28762	0.4076054	99.20292
46.41589	0.2743287	99.47725
49.77024	0.1828282	99.66008
53.36699	0.1207151	99.78079
57.22368	0.07899372	99.85979
61.35908	0.05124659	99.91103
65.79332	0.03296677	99.944
70.54803	0.02103257	99.96503
75.64634	0.01330916	99.97834
81.11308	0.008353329	99.98669
86.9749	0.005199941	99.9919
93.26035	0.003210088	99.99511
100	0.001964873	99.99708
107.2267	0.00119216	99.99827
114.9757	0.000716743	99.99899
123.2847	0.0004268	99.99941
132.1941	0.000251578	99.99966
141.7474	0.00014669	99.99981
151.9911	8.453483E-05	99.99989
162.9751	4.809676E-05	99.99994
174.7529	2.698194E-05	99.99997
187.3818	1.49006E-05	99.99998

200.9233	8.084041E-06	99.99999
215.4435	4.297689E-06	100
231.013	2.231493E-06	100
247.7077	1.126795E-06	100
265.6088	0	100
284.8036	0	100
305.3856	0	100
327.455	0	100
351.1192	0	100
376.4936	0	100
403.7018	0	100
432.8762	0	100
464.1589	0	100
497.7024	0	100
533.6699	0	100
572.2368	0	100
613.5908	0	100
657.9332	0	100
705.4803	0	100
756.4634	0	100
811.1309	0	100
869.7491	0	100
932.6035	0	100
1000	0	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaborado por: Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 32: Resumen de análisis de triplicado de análisis de tamaño de partícula 20 % m/m SDS

Tamaño de partícula (SDS)	Porcentaje acumulado (%)
1.0	0
1.1	0
1.1	0
1.2	0
1.3	0
1.4	0
1.5	0
1.6	0

1.7	0
1.8	0
2.0	0
2.1	0
2.2	0
2.4	0
2.6	0
2.7	0
2.9	0
3.1	0
3.4	0
3.6	0
3.8	0
4.1	0
4.4	0
4.7	0
5.0	0
5.4	0
5.8	0
6.2	0
6.6	0
7.1	0
7.6	0
8.1	0
8.6	0
9.3	0
9.9	0
10.6	0
11.3	0
12.1	0
13.0	0
13.9	0
14.8	10.28668
15.9	24.540033
17.0	38.30214
18.2	50.81803
19.4	61.6748733
20.8	70.73773
22.2	78.06519
23.8	83.8310767
25.5	88.26311
27.2	91.60051
29.1	94.0680433

31.2	95.8625533
33.4	97.1480767
35.7	98.0562567
38.2	98.6895767
40.9	99.12585
43.7	99.4229
46.8	99.6229033
50.0	99.7561067
53.5	99.84387
57.3	99.9011
61.3	99.93802
65.6	99.9615867
70.1	99.9764667
75.0	99.9857633
80.3	99.9914933
85.9	99.9949933
91.9	99.9970967
98.3	99.9983467
105.2	99.9990733
112.5	99.9994933
120.4	99.99973
128.8	99.9998633
137.8	99.9999333
147.5	99.99997
157.8	99.9999833
168.8	99.9999967
180.6	100
193.3	100
206.8	100
221.3	100
236.7	100
253.3	100
271.0	100
290.0	100
310.3	100
332.0	100
355.2	100
380.1	100
406.7	100
435.1	100
465.6	100
498.2	100
533.1	100

570.4	100
610.3	100
653.0	100
698.7	100
747.7	100
800.0	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración propia (2025).

Cuadro 33: Resultado de análisis de primera corrida tamaño de partícula 30 % m/m SDS

Tamaño de partícula (SDS)	Porcentaje de distribución (%)	Porcentaje acumulado (%)
0.9999995	0	0
1.064786	0	0
1.133769	0	0
1.207221	0	0
1.285432	0	0
1.36871	0	0
1.457383	0	0
1.551801	0	0
1.652336	0	0
1.759385	0	0
1.873368	0	0
1.994736	0	0
2.123967	0	0
2.26157	0	0
2.408088	0	0
2.564098	0	0
2.730216	0	0
2.907096	0	0
3.095435	0	0
3.295976	0	0
3.509509	0	0
3.736876	0	0
3.978973	0	0
4.236754	0	0
4.511237	0	0
4.803502	0	0
5.114701	0	0

5.446063	0	0
5.798891	0	0
6.174578	0	0
6.574604	0	0
7.000546	0	0
7.454083	0	0
7.937004	0	0
8.451209	0	0
8.998731	0	0
9.581721	0	0
10.20248	0	0
10.86346	0	0
11.56726	0	0
12.31666	0	0
13.1146	0	0
13.96425	10.32497	10.32499
14.86893	11.85883	22.18382
15.83223	12.28965	34.47347
16.85794	11.82558	46.29905
17.9501	10.75432	57.05336
19.11301	9.351988	66.40535
20.35127	7.839876	74.24522
21.66974	6.3728	80.61803
23.07364	5.044717	85.66274
24.56849	3.901529	89.56427
26.16018	2.955269	92.51954
27.85499	2.196574	94.71611
29.65961	1.604393	96.3205
31.58113	1.152835	97.47334
33.62715	0.8155747	98.28891
35.80571	0.5683829	98.85729
38.12542	0.3903388	99.24763
40.59542	0.2641919	99.51182
43.22543	0.1762136	99.68803
46.02583	0.1157915	99.80383
49.00766	0.07492206	99.87875
52.18267	0.04769906	99.92645
55.56338	0.02984838	99.95629
59.16311	0.01833304	99.97462
62.99605	0.01103193	99.98566
67.07731	0.006488216	99.99214
71.42297	0.003717735	99.99586
76.05019	0.002066697	99.99792

80.97717	0.001108239	99.99903
86.22336	0.000568704	99.9996
91.80942	0.000276084	99.99988
97.75739	0.000124608	100
104.0907	0	100
110.8343	0	100
118.0148	0	100
125.6605	0	100
133.8016	0	100
142.47	0	100
151.7001	0	100
161.5281	0	100
171.9929	0	100
183.1356	0	100
195.0002	0	100
207.6335	0	100
221.0853	0	100
235.4085	0	100
250.6597	0	100
266.8989	0	100
284.1902	0	100
302.6017	0	100
322.2061	0	100
343.0805	0	100
365.3073	0	100
388.9742	0	100
414.1742	0	100
441.0069	0	100
469.578	0	100
500	0	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaborado por: Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 34: Resultado de segunda corrida de análisis de tamaño de partícula 30 % m/m SDS

Tamaño de partícula (SDS)	Porcentaje de distribución (%)	Porcentaje acumulado (%)
1	0	0
1.068411	0	0

1.141502	0	0
1.219594	0	0
1.303027	0	0
1.392169	0	0
1.487408	0	0
1.589164	0	0
1.69788	0	0
1.814034	0	0
1.938133	0	0
2.070723	0	0
2.212384	0	0
2.363735	0	0
2.52544	0	0
2.698209	0	0
2.882796	0	0
3.080011	0	0
3.290718	0	0
3.515839	0	0
3.756361	0	0
4.013338	0	0
4.287894	0	0
4.581234	0	0
4.89464	0	0
5.229488	0	0
5.587243	0	0
5.969471	0	0
6.377849	0	0
6.814164	0	0
7.280328	0	0
7.778383	0	0
8.310511	0	0
8.879041	0	0
9.486465	0	0
10.13544	0	0
10.82882	0	0
11.56963	0	0
12.36112	0	0
13.20676	0	0
14.11025	13.09755	13.09756
15.07554	13.9566	27.05416
16.10688	13.56927	40.62343
17.20877	12.33897	52.96239
18.38603	10.65878	63.62118

19.64384	8.838427	72.4596
20.9877	7.087091	79.54669
22.42348	5.524711	85.0714
23.9575	4.203786	89.27519
25.59645	3.131808	92.407
27.34754	2.289872	94.69687
29.21841	1.646296	96.34316
31.21727	1.165561	97.50872
33.35288	0.8135992	98.32232
35.63458	0.5604622	98.88278
38.07238	0.3812989	99.26408
40.67695	0.2563408	99.52042
43.4597	0.1703676	99.69079
46.43283	0.1119695	99.80276
49.60934	0.07278269	99.87554
53.00317	0.04679424	99.92233
56.62917	0.02975511	99.95209
60.50323	0.01870903	99.97079
64.64231	0.01162841	99.98242
69.06457	0.00714109	99.98956
73.78934	0.004330217	99.9939
78.83735	0.002590581	99.99649
84.23069	0.001527456	99.99802
89.993	0.000886424	99.9989
96.14951	0.00050545	99.9994
102.7272	0.000282578	99.99969
109.7549	0.000154459	99.99984
117.2633	8.224897E-05	99.99992
125.2854	4.246176E-05	99.99997
133.8563	2.111421E-05	99.99999
143.0136	1.002012E-05	100
152.7973	0	100
163.2503	0	100
174.4184	0	100
186.3506	0	100
199.099	0	100
212.7196	0	100
227.2719	0	100
242.8199	0	100
259.4314	0	100
277.1794	0	100
296.1415	0	100
316.4008	0	100

338.0461	0	100
361.1722	0	100
385.8804	0	100
412.2789	0	100
440.4833	0	100
470.6172	0	100
502.8126	0	100
537.2105	0	100
573.9617	0	100
613.227	0	100
655.1785	0	100
699.9999	0	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaborado por: Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 35: Resultado de tercera corrida de análisis de tamaño de partícula 30 % m/m SDS

Tamaño de partícula (SDS)	Porcentaje de distribución (%)	Porcentaje acumulado (%)
1	0	0
1.068411	0	0
1.141502	0	0
1.219594	0	0
1.303027	0	0
1.392169	0	0
1.487408	0	0
1.589164	0	0
1.69788	0	0
1.814034	0	0
1.938133	0	0
2.070723	0	0
2.212384	0	0
2.363735	0	0
2.52544	0	0
2.698209	0	0
2.882796	0	0
3.080011	0	0
3.290718	0	0
3.515839	0	0

3.756361	0	0
4.013338	0	0
4.287894	0	0
4.581234	0	0
4.89464	0	0
5.229488	0	0
5.587243	0	0
5.969471	0	0
6.377849	0	0
6.814164	0	0
7.280328	0	0
7.778383	0	0
8.310511	0	0
8.879041	0	0
9.486465	0	0
10.13544	0	0
10.82882	0	0
11.56963	0	0
12.36112	0	0
13.20676	0	0
14.11025	12.80286	12.80288
15.07554	13.80914	26.61203
16.10688	13.53248	40.14451
17.20877	12.3706	52.51511
18.38603	10.72414	63.23925
19.64384	8.913875	72.15312
20.9877	7.158859	79.31198
22.42348	5.586243	84.89822
23.9575	4.2531	89.15132
25.59645	3.169444	92.32076
27.34754	2.317524	94.63829
29.21841	1.665987	96.30428
31.21727	1.17921	97.48348
33.35288	0.8228328	98.30631
35.63458	0.566567	98.87288
38.07238	0.3852452	99.25813
40.67695	0.258833	99.51696
43.4597	0.1719022	99.68887
46.43283	0.1128875	99.80175
49.60934	0.07331298	99.87506
53.00317	0.04708685	99.92215
56.62917	0.02990632	99.95206
60.50323	0.01877915	99.97083

64.64231	0.01165426	99.98249
69.06457	0.007144453	99.98963
73.78934	0.004323497	99.99396
78.83735	0.002580475	99.99654
84.23069	0.001517305	99.99805
89.993	0.000877671	99.99893
96.14951	0.000498523	99.99943
102.7272	0.00027741	99.9997
109.7549	0.000150777	99.99986
117.2633	7.972709E-05	99.99993
125.2854	4.079815E-05	99.99997
133.8563	2.005746E-05	99.99999
143.0136	9.375693E-06	100
152.7973	0	100
163.2503	0	100
174.4184	0	100
186.3506	0	100
199.099	0	100
212.7196	0	100
227.2719	0	100
242.8199	0	100
259.4314	0	100
277.1794	0	100
296.1415	0	100
316.4008	0	100
338.0461	0	100
361.1722	0	100
385.8804	0	100
412.2789	0	100
440.4833	0	100
470.6172	0	100
502.8126	0	100
537.2105	0	100
573.9617	0	100
613.227	0	100
655.1785	0	100
699.9999	0	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaborado por: Kin Ya Tomizaki (2025).

Cuadro 36: Resumen de corridas de análisis de tamaño de partícula 30 % m/m SDS

Tamaño de partícula (SDS)	Porcentaje acumulado (%)
1	0
1	0
1	0
1	0
1	0
1	0
1	0
2	0
2	0
2	0
2	0
2	0
2	0
2	0
2	0
3	0
3	0
3	0
3	0
3	0
4	0
4	0
4	0
4	0
5	0
5	0
5	0
6	0
6	0
7	0
7	0
8	0

8	0
9	0
9	0
10	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	8.63348
14	17.88873
15	30.36431
16	42.5537733
18	53.7779667
19	63.6372567
20	71.9706767
21	78.7916567
23	84.22391
24	88.4485967
26	91.6659667
28	94.07057
30	95.8372467
32	97.1149133
34	98.0253867
36	98.6651833
38	99.1087633
41	99.4123167
44	99.61738
47	99.75414
50	99.84417
53	99.90266
57	99.9401233
60	99.9637867
65	99.9784933
69	99.9874933
74	99.9928967
79	99.99607
84	99.9978967
89	99.9989167
95	99.9994733
102	99.9997667
109	99.99991
116	99.99998
124	99.9999933

132	100
141	100
151	100
161	100
172	100
183	100
196	100
209	100
223	100
238	100
254	100
271	100
289	100
309	100
330	100
352	100
376	100
401	100
428	100
457	100
488	100
521	100
556	100
593	100
633	100

Nota: Los resultados de la gráfica anterior fueron obtenidos a partir del análisis del analizador de potencial zeta y tamaño de partícula ELSZ-1000ZS (DLS) en la Universidad de Ryokoku, Japón. Elaboración propia (2025).

Cuadro 37: Cantidades experimentales calculadas para las corridas experimentales para la polimerización del metacrilato de metilo

Concentración SDS m/m ( $\pm 0.007$ )	SDS ( $\pm 0.005g$ )	BPO ( $\pm 0.005g$ )	MMA ( $\pm 0.005g$ )
5 %	0.47	0.094	10
10 %	0.94	0.094	10
20 %	1.88	0.094	10
30 %	2.82	0.094	10

Nota: En el cuadro anterior se demuestran los resultados de los cálculos realizados para utilizar en las corridas experimentales. Donde SDS es dodecilsulfato, BPO de peróxido de benzoilo, MMA es metacrilato de metilo. Elaboración propia (2025).

Cuadro 38: Cantidades encapsuladas de limoneno del cuadruplicado

Corrida	Porcentaje Encapsulación
1	100%
2	100%
3	98.23%
4	99.33%

Nota: En el cuadro anterior se demuestra el porcentaje de limoneno encapsulado, a partir de los resultados de cromatografía de gases del laboratorio de análisis instrumental avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Cuadro 39: Cantidad de polimetilmetacrilato obtenido por corrida experimental para la síntesis de nanopartículas.

Corrida	PMMA obtenido ( $\pm 0.007$ )g	Rendimiento
1	7.105	75 %
2	6.926	73%
3	7.596	80%
4	7.893	83%

Nota: En el cuadro anterior se demuestran los resultados de rendimiento de la polimerización del metacrilato de metilo en las cuatro corridas experimentales. Donde PMMA es polimetacrilato de metilo. Elaboración propia (2025).

Cuadro 40: Precio unitario de los reactivos utilizados para la encapsulación de limoneno en polimetilmetacrilato.

Quimico	Precio (USD)	Unidad de costo	Precio unitario (USD)
MMA	56.25	1 L	0.06
BPO	51.22	250 g	0.20
SDS	92.74	250 g	0.37
Limoneno	86.07	1 L	0.09
Agua destilada	68.78	4L	0.02

Nota: En el cuadro anterior se exponen los precios de los reactivos obtenidos de la página de Merck Millipore para la presentación utilizada en la experimentación. Elaboración propia (2025).

Cuadro 41: Resultados de costeo simple

Reactivo	Precio unitario (USD)	Cantidad usada en la experimentación	Precio total (USD)
MMA	0.06/mL	10 mL	0.56

BPO	0.20/g	0.02 g	0.00
SDS	0.37/g	1.2 g	0.45
Limonoeno	0.02/mL	3 mL	0.26
Agua destilada	0.02/mL	80 mL	1.38

Nota: En el cuadro anterior se demuestran los resultados obtenidos de los cálculos del costeo para la síntesis de encapsulación. Los precios fueron obtenidos de la página de Merck Millipore.

Cuadro 42: intervalo de confianza para cada corrida de tamaño de partícula

Porcentaje de surfactante m/m	Intervalo inferior	Intervalo superior
5 %	34.28	47.08
10 %	18.27	22.97
20 %	20.64	25.35
30 %	12.53	25.52

Nota: En el cuadro anterior se exponen los intervalos de confianza para la síntesis de polimetilmetacrilato. Elaboración propia (2025).

Cuadro 43: Resumen de balance de masa

Entradas	Salidas
80 mL agua destilada	80 mL agua destilada
0.09 g BPO	0.09 g BPO
1.88 g SDS	1.88
9.4 g MMA	7.71 g PMMA
	2.295 g MMA
2.52 g Limonoeno	2.47 g limonoeno encapsulado
	0.05 g limonoeno libre

Nota: En el cuadro anterior se demuestra el resumen del balance de masa de la sección balance de masa. Elaboración propia (2025).

Cuadro 44: Porcentaje de variabilidad análisis factorial

Factor	Porcentaje de variabilidad
Temperatura (°C)	89.7%
Agitación (rpm)	8.4%
Error	1.9%
Total	100%

Nota: En el cuadro anterior se demuestra el resumen de porcentaje de variabilidad del análisis factorial. Elaboración propia (2025).

Cuadro 45: Porcentaje de variabilidad análisis de tamaño de partícula

Factor	Porcentaje de variabilidad
Cocentración SDS	77.3%
Error	22.7%
Total	100%

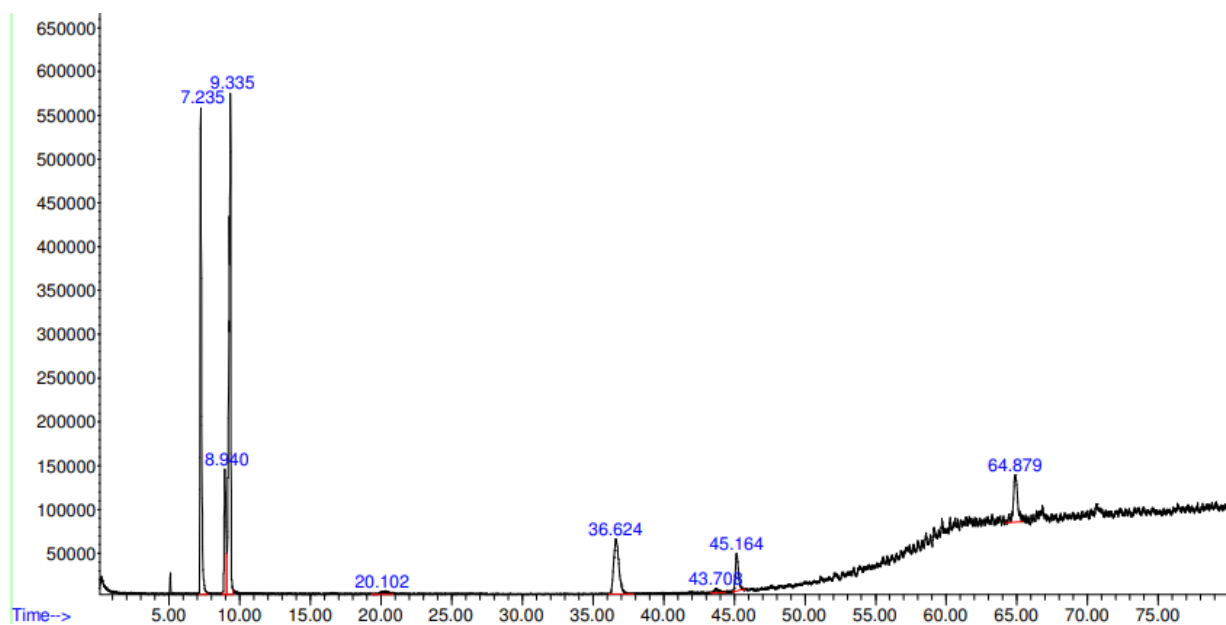
Nota: En el cuadro anterior se demuestra el resumen de porcentaje de variabilidad del análisis de tamaño de partícula utilizando los resultados del análisis de la Universidad de Ryuokoku, Japón. Elaboración propia (2025).

Cuadro 46: Resultados de esfuerzo cortante a diferentes velocidades de agitación.

Velocidad de agitación (rpm)	Esfuerzo cortante (Pa)
600	0.020
700	0.023
800	0.026
900	0.029

Nota: En el cuadro anterior se demuestran los resultados obtenidos a partir del calculo 16 de la sección de muestra de cálculos donde se utilizó la distancia y velocidad del agitador para realizar el cálculo. Elaboración propia (2025).

Figura 26: Resultados de cromatograma de gases primera encapsulación



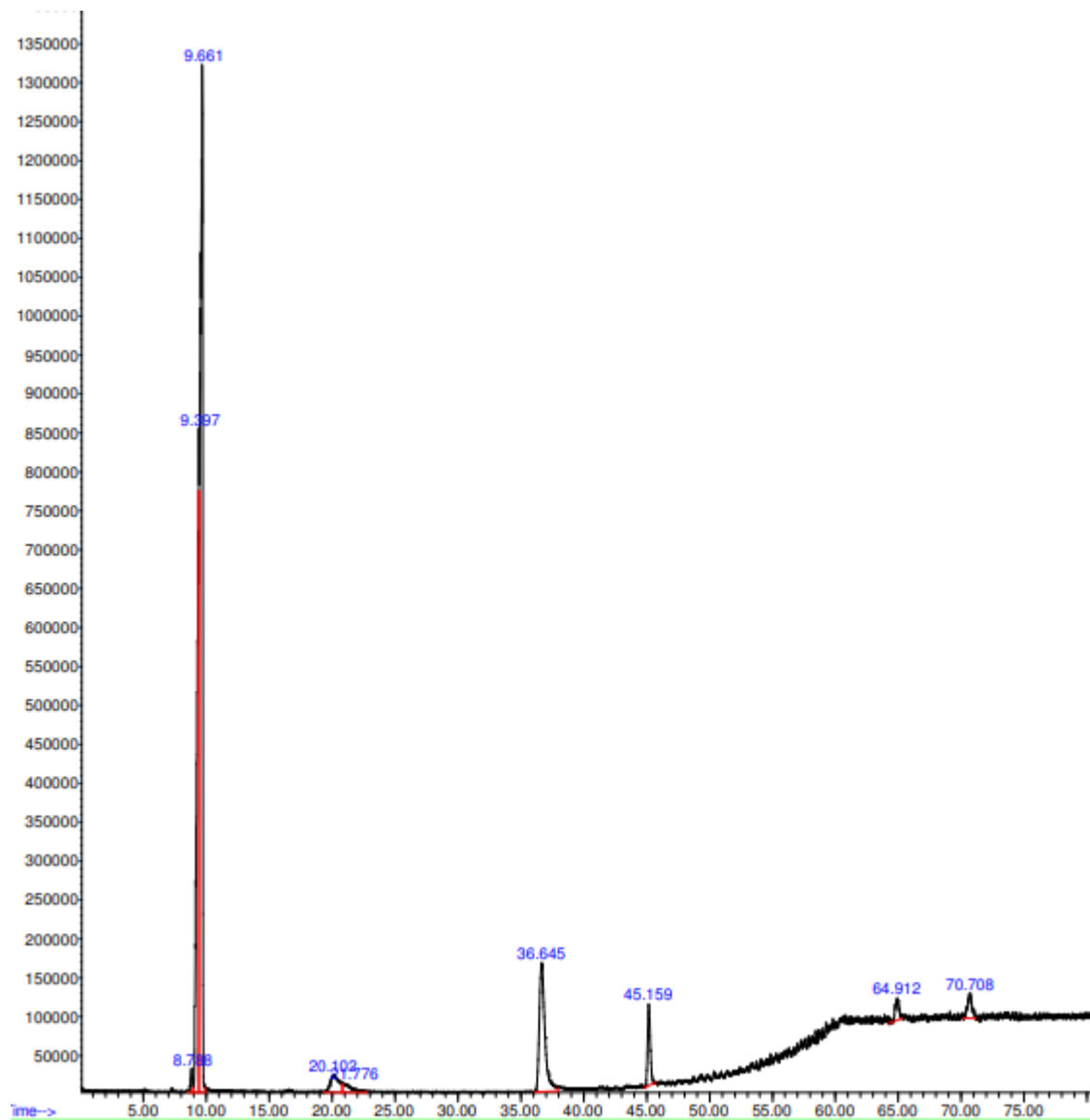
Nota: El gráfico de la Figura anterior fue realizado a partir de la primera muestra de encapsulación de limoneno en la matriz de polimetilmetacrilato. La muestra fue analizada en el equipo de cromatografía de gases del laboratorio de análisis instrumental avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Figura 27: Resultados de análisis de cromatografía de gases para primera encapsulación

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	7.233	25.23	C:\Database\NIST05a.L			
			Methylene Chloride	1498	000075-09-2	95
			Methylene Chloride	1497	000075-09-2	95
			Methylene Chloride	1500	000075-09-2	91
2	8.939	9.06	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8712	000067-66-3	96
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	95
			Ethane, 1,2,2-trichloro-1,1-difluoro-	35125	000354-21-2	78
3	9.335	38.43	C:\Database\NIST05a.L			
			Ammonia	6	007664-41-7	2
			Water	7	007732-18-5	2
4	20.102	1.10	C:\Database\NIST05a.L			
			Heptane, 1-fluoro-	8642	000661-11-0	38
			1-Hexene, 3,5-dimethyl-	6523	007423-69-0	25
			1-Octene, 3,7-dimethyl-	17381	004984-01-4	16
5	36.622	12.04	C:\Database\NIST05a.L			
			Dodecane, 1-chloro-	59591	000112-52-7	91
			Dodecane, 1-chloro-	59589	000112-52-7	83
			1-Chloroundecane	49785	002473-03-2	83
6	43.709	0.81	C:\Database\NIST05a.L			
			2-Heptanol, 6-methyl-	13260	004730-22-7	35
			2-Octanol, (S)-	13219	006169-06-8	27
			(S)-(+)-5-Methyl-1-heptanol	13307	057803-73-3	27
7	45.165	4.86	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Dodecanol	47448	000112-53-8	91
			Cyclodecane	17323	000293-96-9	90
			1-Undecanol	37772	000112-42-5	87
8	64.878	8.49	C:\Database\NIST05a.L			
			Oxalic acid, decyl neopentyl ester	124785	1000309-73-4	47
			Butanoic acid, 3-methylbutyl ester	28970	000106-27-4	47
			3-Methoxyhex-1-ene	7268	108811-41-2	47

Nota: Los resultados anteriores anterior fue realizado a partir de la primera muestra de encapsulación de limoneno en la matriz de polimetilmetacrilato. La muestra fue analizada en el equipo de cromatografía de gases del laboratorio de análisis instrumental avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Figura 28: Cromatograma de cromatografía de gases segunda corrida de encapsulación



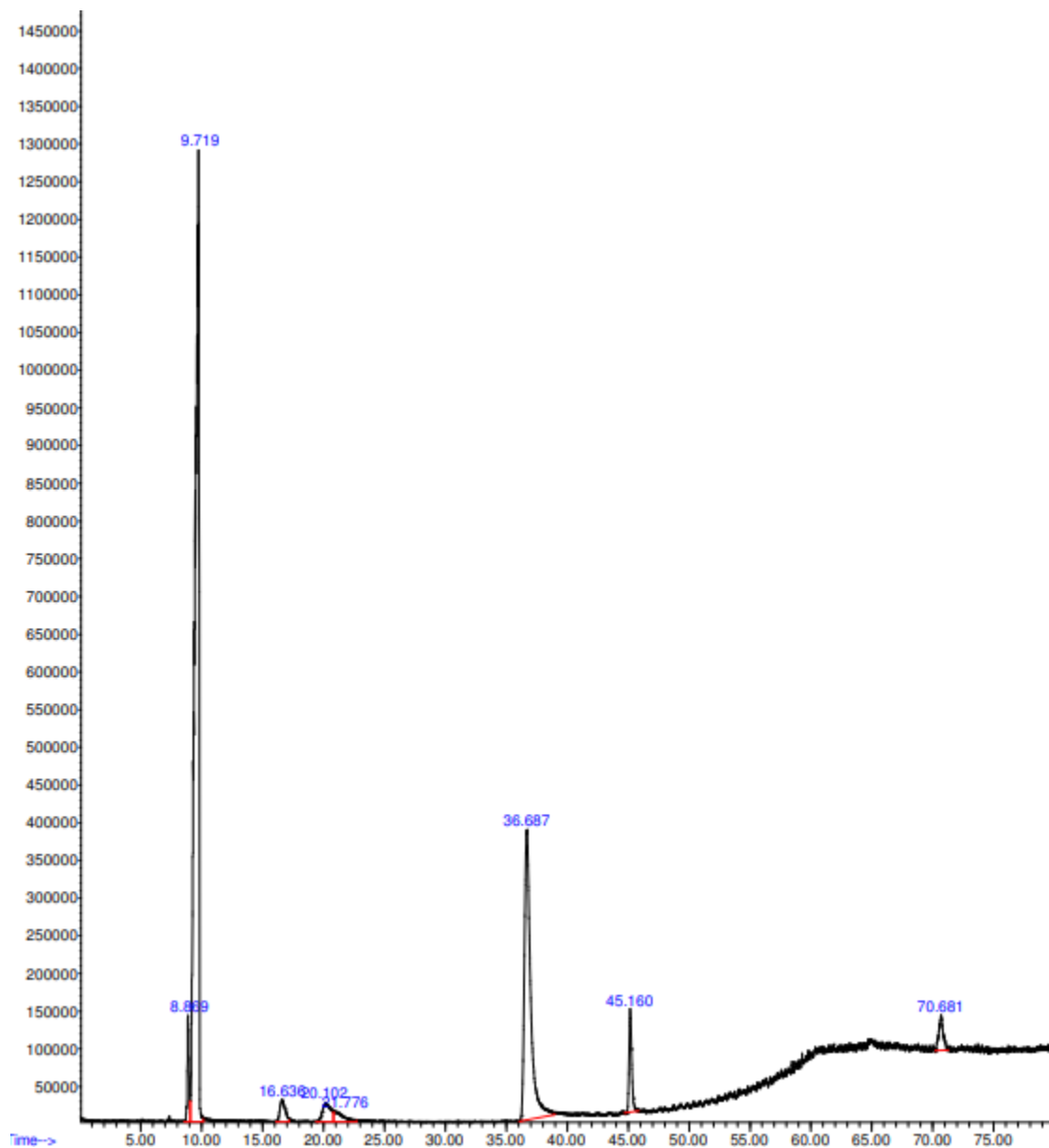
Nota: El gráfico de la Figura anterior fue realizado a partir de la segunda muestra de encapsulación de limoneno en la matriz de polimetilmetacrilato. La muestra fue analizada en el equipo de cromatografía de gases del laboratorio de análisis instrumental avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Figura 29: Resultados de análisis de cromatografía de gases, segunda encapsulación

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	8.789	0.80	C:\Database\NIST05a.L			
			Trichloromethane	8712	000067-66-3	94
			Trichloromethane	8714	000067-66-3	90
			Trichloromethane	8713	000067-66-3	90
2	9.399	25.10	C:\Database\NIST05a.L			
			Ammonia	6	007664-41-7	2
			Water	7	007732-18-5	2
3	9.663	47.97	C:\Database\NIST05a.L			
			Ammonia	6	007664-41-7	2
			Water	7	007732-18-5	1
4	20.102	2.93	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Dodecene	34945	000112-41-4	95
			Cyclopropane, 1-methyl-2-octyl-	35061	037617-26-8	95
			Cyclododecane	34949	000294-62-2	91
5	21.776	1.49	C:\Database\NIST05a.L			
			1-Fluorooctane	14026	000463-11-6	32
			1-Hexene, 3,5-dimethyl-	6523	007423-69-0	9
			1,5-Pentanediol, 3-methyl-	8569	004457-71-0	9
6	36.645	13.93	C:\Database\NIST05a.L			
			Dodecane, 1-chloro-	59591	000112-52-7	87
			1-Chloroundecane	49785	002473-03-2	78
			Decane, 1-chloro-	40035	001002-69-3	72
7	45.160	4.15	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclododecane	34949	000294-62-2	97
			Cyclododecane	34947	000294-62-2	96
			Cyclopropane, nonyl-	34976	074663-85-7	95
8	64.910	1.52	C:\Database\NIST05a.L			
			Oxirane, 2,2'-[1,4-butanediylbis(o	58099	002425-79-8	47
			xymethylene)]bis-			
			Butanoic acid, 2-methylpropyl este	20174	000539-90-2	43
			Z-1-Methoxy-2-hexene	7290	1000279-60-9	43
9	70.710	2.10	C:\Database\NIST05a.L			
			Octaethylene glycol	161142	1000289-34-2	49
			Octaethylene glycol monododecyl et	186450	003055-98-9	43
			her			
			1,4,7,10,13,16-Hexaoxacyclooctadec	100940	017455-13-9	38
			ane			

Nota: Los resultados anteriores anterior fue realizado a partir de la segunda muestra de encapsulación de limoneno en la matriz de polimetilmetacrilato. La muestra fue analizada en el equipo de cromatografía de gases del laboratorio de análisis instrumental avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Figura 30: Resultados de cromatograma de cromatografía de gases tercera encapsulación



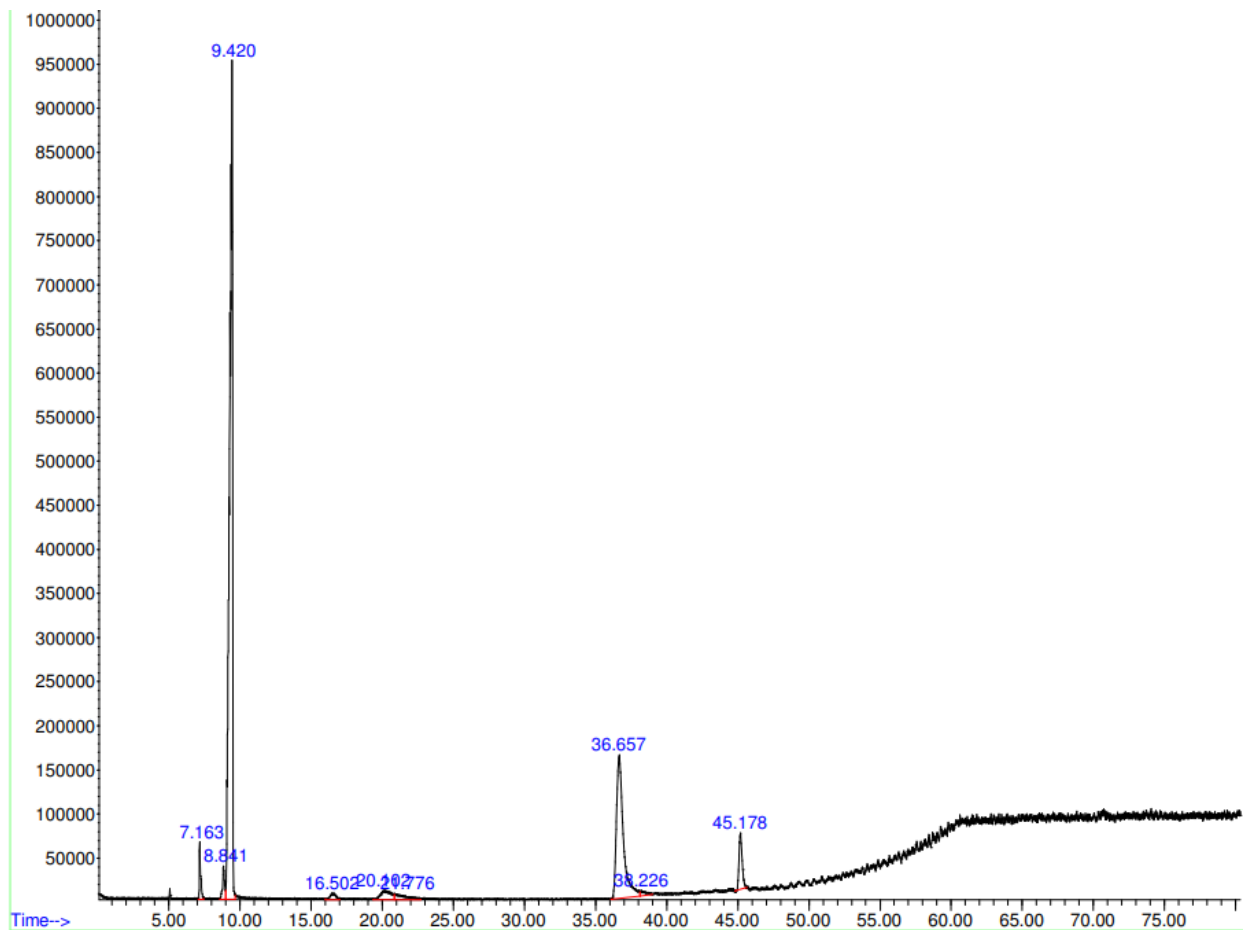
Nota: El gráfico de la Figura anterior fue realizado a partir de la tercera muestra de encapsulación de limoneno en la matriz de polimetilmetacrilato. La muestra fue analizada en el equipo de cromatografía de gases del laboratorio de análisis instrumental avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Figura 31: Resumen de cromatografía de gases tercera corrida

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	8.871	2.67	C:\Database\NIST05a.L Trichloromethane Trichloromethane Ethane, 1,2,2-trichloro-1,1-difluoro-	8712 8713 35125	000067-66-3 000067-66-3 000354-21-2	96 95 78
2	9.717	57.75	C:\Database\NIST05a.L Ammonia Water	6 7	007664-41-7 007732-18-5	2 2
3	16.635	1.77	C:\Database\NIST05a.L D-Limonene D-Limonene D-Limonene	15162 15165 15164	005989-27-5 005989-27-5 005989-27-5	97 95 94
4	20.102	2.41	C:\Database\NIST05a.L Cyclododecane 2-Dodecene, (Z)- 1-Dodecene	34948 34969 34944	000294-62-2 007206-26-0 000112-41-4	90 87 80
5	21.775	1.57	C:\Database\NIST05a.L Isooctanol Isooctanol 1-Heptanol, 6-methyl-	13210 13211 13240	026952-21-6 026952-21-6 001653-40-3	50 47 47
6	36.686	27.52	C:\Database\NIST05a.L Dodecane, 1-chloro- 1-Chloroundecane Dodecane, 1-chloro-	59591 49785 59589	000112-52-7 002473-03-2 000112-52-7	98 78 76
7	45.160	4.10	C:\Database\NIST05a.L 1-Decene 1-Dodecanol 1-Dodecene	17321 47448 34946	000872-05-9 000112-53-8 000112-41-4	95 95 94
8	70.682	2.21	C:\Database\NIST05a.L 3,3-Dimethylpiperidin-6-one[2,1-e]-4-methylimidazole 3-Fluorobenzoic acid, 4-hexadecyl ester 5-t-Butyl-4-methylimidazole	41358 158992 16865	1000129-16-4 1000283-01-7 146979-50-2	35 27 25

Nota: Los resultados anteriores anterior fue realizado a partir de la cuarta muestra de encapsulación de limoneno en la matriz de polimetilmetacrilato. La muestra fue analizada en el equipo de cromatografía de gases del laboratorio de análisis instrumental avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Figura 32: Cromatograma cuarta corrida de encapsulación



Nota: El gráfico de la Figura anterior fue realizado a partir de la cuarta muestra de encapsulación de limoneno en la matriz de polimetilmetacrilato. La muestra fue analizada en el equipo de cromatografía de gases del laboratorio de análisis instrumental avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Figura 33: Resumen de análisis cuarta corrida de encapsulación

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	7.161	2.05	C:\Database\NIST05a.L Methylene Chloride Methylene Chloride Methylene Chloride	1498 1497 1500	000075-09-2 000075-09-2 000075-09-2	94 94 91
2	8.844	1.80	C:\Database\NIST05a.L Trichloromethane Trichloromethane Ethane, 1,2,2-trichloro-1,1-difluoro-	8712 8714 35125	000067-66-3 000067-66-3 000354-21-2	97 95 78
3	9.421	60.41	C:\Database\NIST05a.L Ammonia Water	6 7	007664-41-7 007732-18-5	2 2
4	16.504	0.92	C:\Database\NIST05a.L D-Limonene Cyclohexene, 1-methyl-4-(1-methyl- thenyl)-, (S)- D-Limonene	15165 15359 15164	005989-27-5 005989-54-8 005989-27-5	90 80 80
5	20.101	2.41	C:\Database\NIST05a.L Cyclopropane, octyl- 1-Heptanol, 6-methyl- 1-Pentene, 3,3-dimethyl-	25932 13261 3298	001472-09-9 001653-40-3 003404-73-7	83 47 43
6	21.775	1.67	C:\Database\NIST05a.L 1-Hexanol, 3-methyl- 1-Butanol, 2-methyl- 2-Heptenal, (E)-	8110 2080 6299	013231-81-7 000137-32-6 018829-55-5	9 9 9
7	36.659	25.53	C:\Database\NIST05a.L Dodecane, 1-chloro- 1-Chloroundecane Dodecane, 1-chloro-	59591 49785 59589	000112-52-7 002473-03-2 000112-52-7	91 78 78
8	38.228	0.69	C:\Database\NIST05a.L Octane, 1-chloro- Octane, 1-chloro- Octane, 1-chloro-	22225 22220 22227	000111-85-3 000111-85-3 000111-85-3	38 32 12
9	45.178	4.51	C:\Database\NIST05a.L 1-Dodecanol 1-Undecanol Cyclopropane, nonyl-	47448 37772 34976	000112-53-8 000112-42-5 074663-85-7	91 91 90

Nota: Los resultados anteriores anterior fue realizado a partir de la cuarta muestra de encapsulación de limoneno en la matriz de polimetilmetacrilato. La muestra fue analizada en el equipo de cromatografía de gases del laboratorio de análisis instrumental avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

## F. ANÁLISIS DE ERROR

Calculo 12: Media aritmética para tamaño de partícula

$$\bar{x} = \frac{(38.1 + 44.7 + 39.7)}{3} = 40.83 \text{ nm}$$

Se llevo a cabo este procedimiento para establecer el tamaño de partícula promedio para la primera corrida de análisis por DLS. Este mismo cálculo fue repetido para todas las corridas experimentales haciendo uso de la ecuación 6 de la sección de resultados.

Calculo 13: Desviación estándar de tamaño de partícula

$$\sigma = \sqrt{\frac{(29.1 - 38.1 \text{ nm})^2 + \dots + (143.01 - 38.1 \text{ nm})^2}{25 - 1}} = 9.6$$

Haciendo uso de la ecuación 1 de la sección de resultados se realizó en calculo para la desviación estándar de tamaño de partícula para la corrida con 5 %m/m de SDS. Este cálculo se repitió para todas las corridas.

Calculo 14: Intervalo de confianza para el tamaño de partícula

$$I.C._{superior} = 40.83 + 2.35 * \frac{9.8}{\sqrt{4}} = 48.08$$

$$I.C._{inferior} = 40.83 - 2.35 * \frac{9.8}{\sqrt{4}} = 38.28$$

El cálculo anterior fue para determinar el intervalo de confianza de tamaño de partícula para la primera corrida. Este mismo cálculo fue repetido para todas las iteraciones correspondientes usando la ecuación 2, sección de resultados.

Calculo 15: Rendimiento de reacción

$$\text{Porcentaje de error} = \frac{7.105}{9.4} * 100 = 75 \%$$

En la muestra de cálculo anterior se demuestra cómo se realizó el porcentaje de rendimiento obtenido de la polimerización del metacrilato de metilo. Este procedimiento fue repetido para todas las corridas encapsulación.

Calculo 17: coeficiente de variación

$$C.V. = 100\% * \frac{9.6}{38.1} = 25 \%$$

En el cálculo anterior se demuestra cómo se realizó el cálculo para el coeficiente de variación del tamaño de partícula. Para ello se empleó la ecuación 3 de la sección de ecuaciones

Calculo 18: Calculo de incertidumbre para sumas y restas

$$Sy = \sqrt{0.005^2 + 0.005^2} = \pm 0.007$$

En la muestra de cálculo anterior se demuestra la incertidumbre para calcular la diferencia de masa de la obtención de cantidad de PMMA obtenido. Este cálculo fue realizado para todas las corridas respectivas haciendo uso de las ecuaciones 4, sección de ecuaciones.

Calculo 19: Incertidumbre para multiplicaciones y divisiones

$$Sy = 360.6 \text{ ml/min} * \sqrt{\left(\frac{0.05 \text{ ml}}{450 \text{ ml}}\right)^2 + \left(\frac{0.0005 \text{ s}}{14}\right)^2} = \pm 0.04$$

En la muestra de cálculo anterior se demuestra cómo se obtuvo la incertidumbre para el flujo de agua del balance de masa haciendo uso de la ecuación 5 de la sección de ecuaciones.

Calculo 20: Porcentaje de variabilidad

$$Variabilidad = \frac{1198.1}{1549.8} * 100 = 77.3\%$$

En el cálculo anterior se demuestra cómo se realizó el cálculo del porcentaje de variabilidad para el surfactante. Este mismo resultado fue repetido para los dos análisis ANOVA.

## G. DATOS DE PLACA

Cuadro 46: Datos de placa de cromatografía de gases

Equipo	Especificaciones
Marca del detector de masas	Agilent
Modelo del cromatógrafo	6850
Modelo del detector de masas	5975VLMMSD con triple detector de eje

Programa de procesamiento de datos	Chemstation Version de E.02.00.493. Biblioteca Nist para obtención de la identificación versión 2.0
Modelo columna	DB-WAX
Dimensiones	Largo: 60 metros Diámetro interno: 0.25 mm Film: 0.25 $\mu$ m

En el cuadro anterior se demuestran las especificaciones del equipo de cromatografía de gases utilizado para el análisis de encapsulación de limoneno del equipo del laboratorio de análisis instrumental avanzado de la Universidad del Valle. Elaboración (2025).

Cuadro 47: Datos de placa estufa

Rubro	Especificaciones
Marca	Vevor
Capacidad calentamiento	320 C
Capacidad agitación	2,000 rpm
Modelo	VEVOR SH-2

En el cuadro anterior se demuestran las especificaciones técnicas de la estufa utilizada para el calentamiento de la microemulsión en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Cuadro 48: Datos de placa de balanza analítica

Rubro	Especificaciones
Marca	Ohaus
Capacidad	200 g
Incertidumbre	$\pm 0.0005g$

En el cuadro anterior se demuestran las especificaciones técnicas de la estufa utilizada para el calentamiento de la microemulsión en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Cuadro 49: Datos de especificaciones técnicas del Analizador de Potencial Zeta y Tamaño de Partícula ELSZ-1000ZS

Especificación	Parámetro
Método	Potencial de flujo zeta
Rango de medición Zeta (tamaño)	(0.3 nm-300 $\mu$ m)
Rango de medición Zeta (carga)	-3000 mV a +3000 mV
Rango de temperatura	(0-90) $^{\circ}$ C
Rango de medición	(0.1-1.0) mg/mL

En el cuadro anterior se demuestra las características técnicas del equipo de medición de tamaño de partícula Dispersión dinámica de luz (DLS) de la Universidad de Ryukoku, Japón. Elaboración propia (2025).

## H. ESPECIFICACIONES DE REACTIVOS

Ilustración 1: Especificaciones del surfactante utilizado, dodecilsulfato sódico

**FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Versión 7.9

Fecha de revisión 29.07.2025

Fecha de impresión 28.08.2025

GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

**SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa****1.1 Identificadores del producto**

Nombre del producto : Sodium dodecyl sulfate

Referencia : 75746

Marca : Sigma

REACH No. : 01-2119489461-32-XXXX

No. CAS : 151-21-3

**1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados**

Usos identificados : Reactivos para laboratorio, Fabricación de sustancias

**1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad**Compañía : Sigma-Aldrich Inc.  
3050 SPRUCE ST  
ST. LOUIS MO 63103  
UNITED STATES

Teléfono : +1 314 771-5765

Fax : +1 800 325-5052

**1.4 Teléfono de emergencia**Teléfono de Urgencia : 800-424-9300 CHEMTREC (USA) +1-703-  
527-3887 CHEMTREC (International) 24  
Hours/day; 7 Days/week**SECCIÓN 2. Identificación de los peligros****2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla**

Toxicidad aguda, (Categoría 4) H302: Nocivo en caso de ingestión.

Irritación cutáneas, (Categoría 2) H315: Provoca irritación cutánea.

Lesiones oculares graves,  
(Categoría 1) H318: Provoca lesiones oculares graves.Peligro a largo plazo (crónico)  
para el medio ambiente acuático,  
(Categoría 3) H412: Nocivo para los organismos  
acuáticos, con efectos nocivos duraderos.


Sigma- 75746

Pagina 1 de 14

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and  
Canada

Nota: En la ilustración anterior se demuestra las características e identificación del surfactante.  
Elaborado por: Merck Millipore (2025).

Ilustración 2: Especificaciones del D-L Limoneno utilizado

 www.sigmaaldrich.com

---

**FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD** Versión 8.5  
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006 Fecha de revisión 04.07.2024  
Fecha de Impresión 28.08.2025  
GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

---

**SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa**

**1.1 Identificadores del producto**

Nombre del producto : DL-LIMONENO (MEZCLA DE FORMAS D- Y L-, CA.1:1) PARA SINTESIS

Referencia : 8.14546  
Artículo número : 814546  
Marca : Millipore  
No. Índice : 601-029-00-7  
REACH No. : Un número de registro no está disponible para esta sustancia, ya que la sustancia o sus usos están exentos del registro o el tonelaje anual no requiere registro.  
No. CAS : 138-86-3

**1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconejados**

Usos identificados : Producto químico para síntesis

**1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad**

Compañía : Sigma-Aldrich Inc.  
3050 SPRUCE ST  
ST. LOUIS MO 63103  
UNITED STATES

Teléfono : +1 314 771-5765  
Fax : +1 800 325-5052

**1.4 Teléfono de emergencia**

Teléfono de Urgencia : 800-424-9300 CHEMTREC (USA) +1-703-527-3887 CHEMTREC (International) 24 Hours/day; 7 Days/week


---

**SECCIÓN 2. Identificación de los peligros**

**2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla**  
Líquidos inflamables, (Categoría 3) H226: Líquidos y vapores inflamables.


Millipore- 8.14546 Página 1 de 13

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada



Nota: En la ilustración anterior se demuestra las características e identificación de D-L limoneno utilizado. Elaborado por: Merck Millipore (2024).

Ilustración 3: Especificaciones del monómero utilizado, metilmetacrilato

www.sigmaaldrich.com

---

**FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**  
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Versión 8.11  
Fecha de revisión 03.07.2024  
Fecha de impresión 28.08.2025  
GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

---

**SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa**

**1.1 Identificadores del producto**

Nombre del producto : **METILO METACRILATO (ESTABILIZADO) PARA SINTESIS**

Referencia : 8.00590  
Artículo número : 800590  
Marca : Millipore  
No. Índice : 607-035-00-6  
REACH No. : Un número de registro no está disponible para esta sustancia, ya que la sustancia o sus usos están exentos del registro o el tonelaje anual no requiere registro.  
No. CAS : 80-62-6

**1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados**

Usos identificados : Producto químico para síntesis

**1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad**

Compañía : Sigma-Aldrich Inc.  
3050 SPRUCE ST  
ST. LOUIS MO 63103  
UNITED STATES

Teléfono : +1 314 771-5765  
Fax : +1 800 325-5052

**1.4 Teléfono de emergencia**

Teléfono de Urgencia : 800-424-9300 CHEMTREC (USA) +1-703-527-3887 CHEMTREC (International) 24 Hours/day; 7 Days/week


---

**SECCIÓN 2. Identificación de los peligros**

**2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla**  
Líquidos inflamables, (Categoría 2) H225: Líquido y vapores muy inflamables.


Millipore- 8.00590 Página 1 de 14

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada



Nota: En la ilustración anterior se demuestra las características e identificación de metacrilato de metilo estabilizado para síntesis utilizado. Elaborado por: Merck Millipore (2024).

## Ilustración 4: Especificaciones del iniciador, peróxido de benzoilo

www.sigmaaldrich.com

---

### FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Versión 8.9  
Fecha de revisión 05.08.2025  
Fecha de Impresión 28.08.2025  
GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

---

#### SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

**1.1 Identificadores del producto**

Nombre del producto : **BENZOILO PEROXIDO (CON 25% DE AGUA) PARA SINTESIS**

Referencia : 8.01641  
Artículo número : 801641  
Marca : Sigma-Aldrich  
No. Índice : 617-008-00-0  
REACH No. : 01-2119511472-50-XXXX  
No. CAS : 94-36-0

**1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados**

Usos identificados : Producto químico para síntesis

**1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad**

Compañía : Sigma-Aldrich Inc.  
3050 SPRUCE ST  
ST. LOUIS MO 63103  
UNITED STATES

Teléfono : +1 314 771-5765  
Fax : +1 800 325-5052

**1.4 Teléfono de emergencia**

Teléfono de Urgencia : 800-424-9300 CHEMTREC (USA) +1-703-527-3887 CHEMTREC (International) 24 Hours/day; 7 Days/week

---

#### SECCIÓN 2. Identificación de los peligros


**2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla**

Peróxidos orgánicos, (Tipo C)	H242: Peligro de incendio en caso de calentamiento.
Irritación ocular, (Categoría 2)	H319: Provoca irritación ocular grave.
Sensibilización cutánea, (Sub-categoría 1A)	H317: Puede provocar una reacción alérgica en la piel.

Sigma-Aldrich- 8.01641

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada

Página 1 de 13



Nota: En la ilustración anterior se demuestra las características e identificación de metacrilato de metilo estabilizado para síntesis utilizado. Elaborado por: Merck Millipore (2024).

## I. ILUSTRACIONES

Ilustración 5: Muestra de emulsión agua y aceite



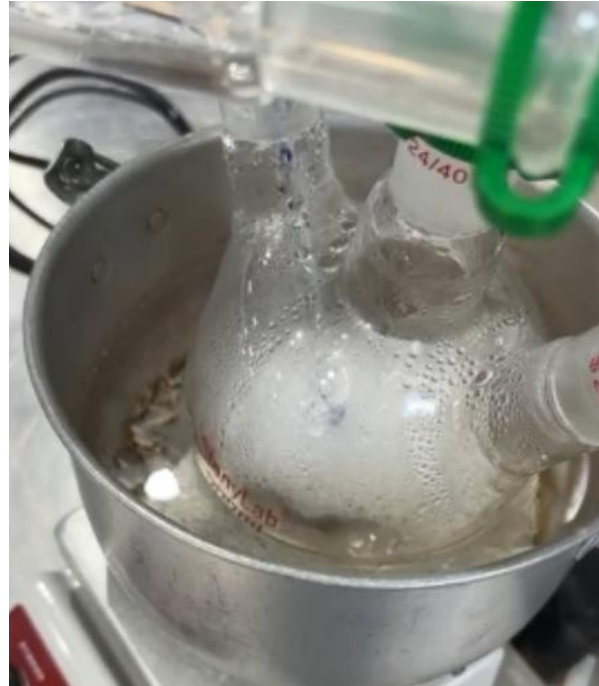
Nota: En la ilustración anterior se expone una de las emulsiones agua-aceite realizadas para el análisis factorial para determinar el tiempo de estabilidad de emulsión variando temperatura y velocidades de agitación. Esta imagen fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Ilustración 6: Primer intento de síntesis de nanopartículas



Nota: En la ilustración anterior se demuestra el primer intento de síntesis de nanopartículas, dónde a juzgar por el color, se obtuvieron micropartículas. Esta imagen fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Ilustración 7: Primera polimerización para polimerizar el metacrilato de metilo



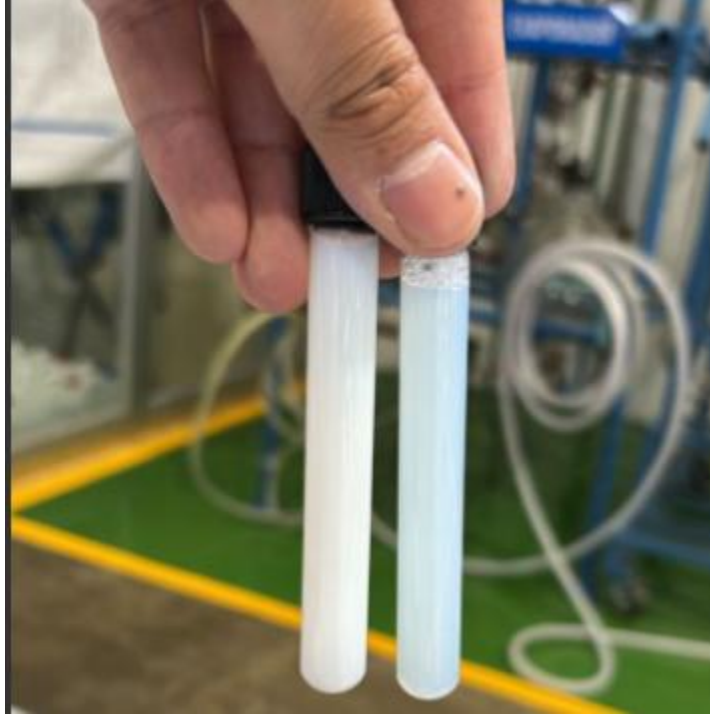
Nota: En la ilustración anterior se demuestra el proceso de reacción de la primera síntesis de polimetilmetacrilato. Esta imagen fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Ilustración 8: Diseño experimental dónde se llevó a cabo la experimentación



Nota: En la Figura anterior se demuestra el diseño experimental utilizado para llevar a cabo la experimentación para sintetizar polimetilmetacrilato y realizar la encapsulación. Esta imagen fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Ilustración 9: Segundo y tercer intento de sintetizar nanopartículas



Nota: En la ilustración anterior se demuestran mejoras visuales de disminución del tamaño de partícula, sin llegar a ser nanopartículas. Esta imagen fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Ilustración 10: Secado de muestra de polimetilmetacrilato



Nota: En la ilustración se puede evidenciar el polimetilmetacrilato obtenido al secar la muestra. Esta imagen fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Ilustración 11: Primera síntesis de nanopartículas exitosa



Nota: En la ilustración anterior se exponen la primera síntesis exitosa de nanopartículas después de ajustar las concentraciones correspondientes. Esta imagen fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Ilustración 12: Comparación nanopartículas y micropartículas



Nota: En la Figura anterior se comparan micropartículas (izquierda) y nanopartículas (derecha). Esta imagen fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Ilustración 13: Muestras preparadas para enviar a Japón para análisis



Nota: En la fotografía anterior se demuestran las muestras de nanopartículas preparadas para enviar a analizar a la Universidad de Ryukoku, Japón. Esta imagen fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Ilustración 14: Recepción de muestras en la Universidad de Ryukoku Japón.



Nota: En la ilustración anterior se expone la recepción de las muestras para analizar en la Universidad de Ryukoku en Japón. Elaboración propia (2025).

Ilustración 16: Muestra seca obtenida de 10 mL de polimetilmetacrilato.



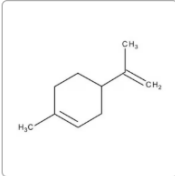
Nota: en la ilustración anterior se expone una muestra de 10 mL seca. Esta imagen fue tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Elaboración propia (2025).

Ilustración 17: Muestras de encapsulación de limoneno en partículas de polimetilmetacrilato



Nota: En la ilustración anterior se evidencia la cotización obtenida de la página de Merck Millipore para el reactivo utilizado. Elaboración propia (2025).

Ilustración 19: Cotización de costo de limoneno



**DL-Limonene**

**Sinónimos:** DL-Limonene

**Fórmula empírica (notación de Hill):** C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>

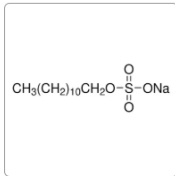
**CAS No.:** **138-86-3**      **Peso molecular:** 136.23

[Todas las fotos \(1\)](#)

Comparar	Referencia del producto	Descripción	SDS	Precios
<input type="checkbox"/>	<b>8.14546</b>	(mixture of D- and L-form ~1:1) for synthesis	<a href="#">↓</a>	<a href="#">Ocultar</a>
<a href="#">Iniciar sesión</a> para Ver la Fijación de precios por contrato y de la organización				
SKU	Tamaño de envase	Disponibilidad	Precio	
8145461000	1 L	<input checked="" type="checkbox"/> Fecha estimada de envío 03 de septiembre de 2025	USD 86.13	<a href="#">i</a>

Nota: En la ilustración anterior se evidencia la cotización obtenida de la página de Merck Millipore para el reactivo utilizado. Elaboración propia (2025).

Ilustración 20: Cotización de costo del dodecilsulfato sódico



**Dodecilsulfatosódico**

**Sinónimos:** Dodecilsulfatosódico, Dodecil sulfato de sodio, Dodecil sulfato sodium salt, Lauril sulfato sodium salt, Laurilsulfato de sodio, SDS

**Fórmula lineal:** CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>11</sub>OSO<sub>3</sub>Na

**CAS No.:** **151-21-3**      **Peso molecular:** 288.38

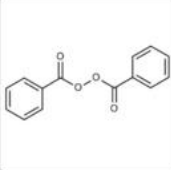
**EC No.:** **205-788-1**      **Beilstein No.:** 3599286

[Todas las fotos \(25\)](#)

Comparar	Referencia del producto	Descripción	SDS	Precios
<input type="checkbox"/>	<b>8.17034</b>	EMPROVE® ESSENTIAL, Ph. Eur.	<a href="#">↓</a>	<a href="#">Expandir</a> <span>▾</span>
<input type="checkbox"/>	<b>L3771</b>	BioReagent, suitable for electrophoresis, Molecular Biology, ≥ 98.5% (GC)	<a href="#">↓</a>	<a href="#">Expandir</a> <span>▾</span>
<input type="checkbox"/>	<b>75746</b>	≥ 99.0% (GC), dust-free pellets	<a href="#">↓</a>	<a href="#">Ocultar</a>
<a href="#">Iniciar sesión</a> para Ver la Fijación de precios por contrato y de la organización				
SKU	Tamaño de envase	Disponibilidad	Precio	
75746-250G	250 g	<input checked="" type="checkbox"/> Disponible para envío el 02 de septiembre de 2025	<a href="#">Detalles...</a>	USD 92.80 <a href="#">i</a>

Nota: En la ilustración anterior se evidencia la cotización obtenida de la página de Merck Millipore para el reactivo utilizado. Elaboración propia (2025).

Ilustración 21: Cotización de costo del peróxido de benzoilo



### Peróxido de benzoilo

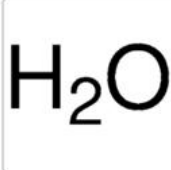
**Sinónimos:** Benzoyl peroxide  
**Fórmula empírica (notación de Hill):** C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>O<sub>4</sub>  
**CAS No.:** 94-36-0      **Peso molecular:** 242.23

[Todas las fotos \(1\)](#)

Comparar	Referencia del producto	Descripción	SDS	Precios
<input type="checkbox"/>	<b>8.01641</b>	(with 25% H <sub>2</sub> O) for synthesis	<a href="#">↓</a>	<a href="#">Ocultar</a>
<b>Iniciar sesión para Ver la Fijación de precios por contrato y de la organización</b>				
SKU	Tamaño de envase	Disponibilidad		Precio
8016410010	10 g	✓ Fecha estimada de envío 02 de septiembre de 2026 Desde MILWAUKEE		USD 27.15 <a href="#">i</a>
8016410100	100 g	✓ Fecha estimada de envío 02 de septiembre de 2026 Desde MILWAUKEE		USD 31.01 <a href="#">i</a>
8016410250	250 g	✓ Fecha estimada de envío 02 de septiembre de 2026 Desde MILWAUKEE		USD 51.26 <a href="#">i</a>

Nota: En la ilustración anterior se evidencia la cotización obtenida de la página de Merck Millipore para el reactivo utilizado. Elaboración propia (2025).

Ilustración 22: Cotización de costo del agua destilada.



### Agua

**Sinónimos:** Water  
**Fórmula lineal:** H<sub>2</sub>O  
**CAS No.:** 7732-18-5      **Peso molecular:** 18.02  
**Beilstein No.:** 2050024

[Todas las fotos \(6\)](#)

Comparar	Referencia del producto	Descripción	SDS	Precios
<input type="checkbox"/>	<b>6442</b>	Deionized Distilled, ASTM Type II, HARLECO® Purified water for laboratory use	<a href="#">↓</a>	<a href="#">Ocultar</a>
<b>Iniciar sesión para Ver la Fijación de precios por contrato y de la organización</b>				
SKU	Tamaño de envase	Disponibilidad		Precio
6442-85	4 L	✓ Fecha estimada de envío 03 de septiembre de 2025		USD 68.81 <a href="#">i</a>
6442-88	20 L	✓ Fecha estimada de envío 03 de septiembre de 2025		USD 142.77 <a href="#">i</a>

Nota: En la ilustración anterior se evidencia la cotización obtenida de la página de Merck Millipore para el reactivo utilizado. Elaboración propia (2025).

### Ilustración 23: Cotización agua ultrapura

> <b>Ultrapure Water</b> for PFAS Analysis Manufacturer : FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation CAS RN® : 7732-18-5						
Comparison	Product Number	Package Size		Price	Availability	Purchase
<input type="checkbox"/>	216-01361	1L	List Price	33.00 USD	In stock in Japan	Distributor
<input type="checkbox"/>	212-01363	3L	List Price	91.00 USD	In stock in Japan	Distributor

Nota: En la ilustración anterior se evidencia la cotización obtenida de la página de FujiFilm Wako Pure Chemicals Corporation para el reactivo utilizado. Elaboración propia (2025).

## J. GLOSARIO

- **DLS (Dispersión dinámica de luz):** Método de caracterización que permite determinar el tamaño promedio y la distribución de nanopartículas en suspensión mediante el análisis de la dispersión de la luz.
- **Encapsulación de compuestos volátiles:** Estrategia que permite retener sustancias con alta volatilidad y baja estabilidad, como el limoneno, para evitar su degradación y mejorar su aplicabilidad.
- **Encapsulamiento:** Técnica utilizada para atrapar un compuesto dentro de una matriz o cápsula con el fin de protegerlo de factores externos y controlar su liberación.
- **Entropía:** Magnitud termodinámica que mide el grado de desorden de un sistema; en procesos de autoensamblaje como la formación de micelas o nanopartículas, la entropía juega un papel fundamental en la estabilidad del sistema.
- **Espectroscopia/Espectrofotometría de gases:** Técnica analítica utilizada para determinar la presencia y concentración de compuestos volátiles, aplicada en este estudio para cuantificar el limoneno encapsulado.
- **Limoneno:** Monoterpeno presente en aceites esenciales de cítricos, caracterizado por su aroma cítrico y sus propiedades antimicrobianas, antioxidantes y potenciales aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética.
- **Micelas:** Agregados supramoleculares formados por surfactantes en solución acuosa, donde las colas hidrofóbicas se orientan hacia el interior y las cabezas hidrofílicas hacia el exterior, desempeñando un papel clave en la formación de microemulsiones.
- **Microemulsión:** Sistema termodinámicamente estable compuesto por agua, aceite, surfactante y, en algunos casos, co-surfactante, utilizado como medio de síntesis para obtener nanopartículas de tamaño uniforme.

- **Micropartículas:** Partículas con dimensiones comprendidas entre 1 y 1000 micrómetros, de mayor tamaño que las nanopartículas, utilizadas en aplicaciones de liberación controlada y encapsulamiento de compuestos bioactivos.
- **Nanopartículas:** Partículas con dimensiones en el rango de 1 a 100 nanómetros, que presentan propiedades fisicoquímicas diferentes a las de la misma sustancia a escala macroscópica.
- **Polimerización en microemulsión:** Proceso químico en el cual monómeros se polimerizan dentro de las gotas de una microemulsión, dando origen a nanopartículas con control en su tamaño y morfología.
- **Polimetilmetacrilato (PMMA):** Polímero sintético, termoplástico y biocompatible, empleado en la formación de nanopartículas debido a su estabilidad, resistencia química y transparencia.
- **Presión de Laplace:** Diferencia de presión entre el interior y el exterior de una gota o burbuja causada por la tensión superficial; determina la estabilidad de gotas y nanopartículas en emulsiones y microemulsiones.
- **Rendimiento de encapsulación:** Porcentaje del compuesto bioactivo que logra ser atrapado dentro de las nanopartículas en relación con la cantidad inicial utilizada en el proceso de síntesis.
- **Surfactante:** Sustancia que reduce la tensión superficial entre dos fases (agua y aceite, por ejemplo), favoreciendo la formación y estabilidad de microemulsiones; en este trabajo se emplea dodecil sulfato de sodio (SDS).