



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE UNA EMULSIÓN
ACEITE-AGUA FORMADA CON UNA TURBINA DE TIPO
ROTOR-ESTATOR

EXAMEN GENERAL DE CONOCIMIENTOS
PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA

VERÓNICA LICEA MORENO



TUTOR: EDUARDO BARZANA GARCÍA

AÑO: 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos:

Al Dr. Eduardo Barzana García por su apoyo para realizar este trabajo

Al Dr. Alberto Tecante Coronel por revisar este trabajo

Al Dr. Angel Enrique Chávez por su amistad y ayuda

Al Dr. Edmundo Brito de la Fuente por su apoyo para realizar este trabajo

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo económico

A mi mamá y hermanos por su comprensión apoyo moral y económico

A la UNAM y a la Facultad de Química por todo lo que aprendí

Al comité tutorial por su tiempo en revisar este trabajo

| | |
|---------------|--|
| Presidente | Dr. Alberto Tecante Coronel |
| Secretario | Dr. Angel Enrique Chávez Castellanos |
| 1er. Vocal | Dr. Eduardo Barzana García |
| 2do. Vocal | Dr. Pedro Roquero Tejeda |
| 3er. Vocal | Dra. Sofía Guillermina Burillo Amescua |
| 1er. Suplente | Dra. Lioudmila Fomina |
| 2do. Suplente | Dr. Rafael Herrera Nájera |

Índice general

| | Página |
|--|--------|
| Índice general | I |
| Índice de figuras | II |
| Notación | II |
| Resumen | IV |
| Introducción | 1 |
| 1 Antecedentes | 3 |
| 1.1 Propiedades físicas de las emulsiones | 6 |
| 1.2 Estabilidad de emulsiones | 7 |
| 1.3 Agentes emulsificantes | 8 |
| 1.3.1 Equilibrio hidrófilo-lipófilo | 10 |
| 1.3.2 Lecitina | 11 |
| 1.4 Hidrocoloides como agentes estabilizadores | 12 |
| 1.4 Xantana | 12 |
| 1.5 Tamaño y distribución de la partícula | 14 |
| 1.6 Viscosidad de emulsiones | 15 |
| 1.7 Desemulsificación | 16 |
| 1.8 Mezclado | 19 |
| 1.9 Índice de cremado | 20 |
| 2 Materiales y métodos | 22 |
| 2.1 Materiales | 22 |
| 2.2 Formulación de la emulsión aceite-agua | 22 |
| 2.3 Preparación de la xantana | 22 |
| 2.4 Preparación de la emulsión | 23 |
| 2.5 Determinación del índice de cremado | 24 |
| 2.6 Determinación de la viscosidad | 24 |
| 2.7 Medición del tamaño y distribución de gota | 25 |
| 3 Resultados y discusión | 27 |
| 3.1 Índice de cremado | 27 |
| 3.2 Viscosidad | 28 |
| 3.3 Medición del tamaño de partícula | 34 |
| 4 Conclusiones | 38 |
| 5 Referencias | 41 |

Índice de figuras

| | Páginas |
|--|---------|
| Figura 1.1 Esquema gotas estabilizadas | 11 |
| Figura 1.2 Esquema hidocoloides en la interface | 14 |
| Figura 1.3 Esquema inestabilidad de emulsiones | 17 |
| Figura 1.4 Esquema impacto de una gota con otra | 18 |
| Figura 3.1 Gráfica índice de cremado & velocidad del rotor | 26 |
| Figura 3.2 Curva viscosidad & rapidez de deformación K-45 | 28 |
| Figura 3.3 Curva viscosidad & rapidez de deformación RS-45 | 29 |
| Cuadro 3.1 Valores ley de la potencia | 30 |
| Figura 3.4 Curva comparación a 1200 rpm | 31 |
| Figura 3.5 Curva distribución de tamaños K-45 | 33 |
| Figura 3.6 Curva distribución de tamaños RS-45 | 34 |
| Figura 3.7 Curva comparación de tamaños a 1400 rpm | 35 |

Notación

| | |
|-----|-------------------------|
| o/w | Emulsión aceite en agua |
| w/o | Emulsión agua en aceite |

| | |
|----------------|---|
| HLB | Equilibrio hidrófilo-lipófilo |
| σ | Esfuerzo $[Pa]$ |
| η | Viscosidad no Newtoniana $[Pa \cdot s]$ |
| $\dot{\gamma}$ | Rapidez de deformación $[s^{-1}]$ |
| k | Índice de consistencia $[Pa \cdot s^n]$ |
| n | Índice de flujo |
| V_{Total} | Volumen total $[mL]$ |
| $V_{Cremado}$ | Volumen de cremado $[mL]$ |
| $V_{Separado}$ | Volumen separado $[mL]$ |

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue estudiar la estabilidad de las emulsiones aceite-agua formadas con dos diferentes turbinas rotor-estator con geometrías diferentes para el estator (K-45 y RS-45), para tomar en cuenta este estudio se mantuvo constante la formulación de la emulsión y se vario la velocidad de agitación (800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800 rpm, para cada estator). Se determinaron el tamaño de partícula, el índice de cremado y la viscosidad para cada emulsión.

Las diferencias que se encontraron con respecto a las diferentes velocidades fue la distribución del tamaño de gota, encontrándose que para velocidades de 1400 rpm la emulsión presentaba un tamaño menor de gota indicando una mayor estabilidad. Las emulsiones preparadas a 800 rpm presentaban porcentajes de volumen de tamaño de gota variables dando valores grandes y pequeños, dando como resultado una menor estabilidad, lo mismo pasaba con las emulsiones preparadas a 1800 rpm.

El índice de cremado también mostró una mayor estabilidad en las emulsiones preparadas a 1400 rpm y menor estabilidad en el resto de ellas para ambos estatores. La viscosidad dio valores de índice de consistencia e índice de flujo, estos valores no mostraron ninguna dependencia para la velocidad de emulsificación, la emulsión que resulto con un valor mayor de viscosidad fue la preparada a 1200 rpm.

Introducción

En la actualidad las emulsiones en la industria de alimentos tienen importancia gracias a que forman un gran número de productos comestibles, entre los más conocidos se encuentran la leche, manteca, mayonesas, aderezos de ensaladas, salsas y helados; también hay algunos otros productos en los cuales las emulsiones tienen importancia como en la producción de bebidas, pasteles, mantecas, margarinas, sabores artificiales, levaduras, etc., (Reiffers-Magnani, et al., 2000).

Una característica importante de las emulsiones de aceite en agua es su estabilidad que se ve favorecida por factores como, la temperatura de formación, la cantidad de emulsificante, el tamaño de partículas (pequeñas gotas que forman la fase dispersa), la diferencia de densidades y la viscosidad (Reiffers-Magnani, et al., 2000, Dickinson, 2003).

La formación de emulsión aceite en agua (como en todos los casos en donde se pretenda formar una emulsión) requiere de la introducción de energía al sistema, esta energía es proporcionada por un mezclador de alta velocidad o un homogeneizador, en el presente trabajo se utilizó un mezclador de tipo rotor-estator que favorece el aumento del área superficial (formación de gotas de menor diámetro en el seno del sistema).

La estabilidad de materiales complejos, como son los alimentos depende de distintas variables, incluyendo las propiedades físicas y químicas de sus

componentes individuales. Una meta importante es estudiar los criterios de estabilidad de las emulsiones y su comportamiento, para una aplicación industrial.

Objetivo

Por medio de la medición del índice de cremado, el tamaño y distribución de partículas, así como la determinación de la viscosidad, se estudió la estabilidad de emulsiones aceite-agua preparadas bajo diferentes condiciones mecánicas en un sistema rotor-estator para seleccionar aquellas condiciones que permitan obtener emulsiones más estables.

Hipótesis

Para tener una mayor estabilidad de las emulsiones aceite-agua es necesario tener un tamaño de gota pequeño asegurando un incremento en el área interfacial atribuible a grandes velocidades de preparación.

El conocimiento de las propiedades físicas, así como el tamaño de gota de las emulsiones y la influencia de la velocidad de preparación permitirá evaluar la estabilidad de éstas.

1 Antecedentes

La teoría de las emulsiones se ha desarrollado de una manera azarosa, esta teoría es en parte una consecuencia de la química coloidal clásica y en parte un desarrollo de las artes antiguas, incluidas en la producción de emulsiones comerciales. Hay un gran número de definiciones del término “emulsión”, aquí se muestran algunas (Kyazze, et al., 2003, Becher, 1972):

- a) Una emulsión es una dispersión muy fina de un líquido en otro con el que es inmiscible.
- b) Una emulsión es un sistema que contiene dos fases líquidas, una de las cuales se dispersa en forma de glóbulos en la otra.
- c) Las emulsiones son mezclas mecánicas de líquidos que son inmiscibles en condiciones ordinarias, las cuales pueden ser separadas en capas mediante reposo, calentamiento, enfriamiento, por agitación o por adición de otros productos químicos.
- d) Una emulsión consiste en una dispersión estable de un líquido en otro líquido (Becher, 1972).

Una definición más apropiada para este estudio es:

Una emulsión es un sistema heterogéneo, formado por lo menos de un líquido inmiscible íntimamente disperso en otro en forma de gotas termodinámicamente inestable que requiere de energía para formarse (Tornberg, et al., 1977), con diámetros que exceden de 0.1 μ m. Tal

sistema posee una estabilidad mínima, que puede ser acentuada por aditivos tales como productos emulsificantes sólidos finamente divididos, hidrocoloides y energía suficiente para que tengan un tiempo mínimo de almacenamiento (Kyazze et al., 2003, Becher, 1972).

Al referirnos a las emulsiones es necesario poder distinguir claramente cada una de las dos fases presentes. La fase que está en forma de gotas finamente divididas se llama fase dispersa o interna, la fase que forma la matriz en que se suspenden estas gotas se llama continua o externa.

Existen dos tipos de emulsiones, la existencia de dos tipos conocidos fue señalada por Ostwald. La diferencia consiste en notar cuál es el componente de la fase continua y cuál la fase dispersa. Tenemos los dos casos, una emulsión aceite en agua, en donde la fase dispersa es el aceite que se encuentra en pequeñas gotas, y la fase continua es el agua, estas emulsiones se conocen como o/w. Generalmente las emulsiones aceite en agua tienen una consistencia cremosa. Las emulsiones de agua en aceite son conocidas como w/o y aquí la fase dispersa es el agua y la continua es el aceite, este tipo de emulsiones tienen al tocarlas se sienten grasosas. La conductividad eléctrica es mucho mayor en emulsiones o/w que w/o. En este trabajo se habla de las emulsiones aceite-agua (Becher, 1972).

El tipo de emulsiones que se encuentran en los alimentos es casi siempre de una solución acuosa y una oleosa. La formación de la emulsión requiere de energía, esta energía es proporcionada por un mezclador de alta velocidad o un homogeneizador (que pueden tener diferentes geometrías). En algunas ocasiones

se forman fases múltiples, no importando el tipo de emulsión que se trate, agua en aceite o aceite en agua, como por ejemplo la mantequilla y margarina. Este fenómeno ocurre por la concentración de la fase dispersa, si ésta es muy alta puede favorecer a las fases múltiples o a la inversión de fases (Maskan, et al., 2000).

Las emulsiones se comportan de manera semejante a la fase continua, una emulsión de aceite en agua se sentirá acuosa y se dispersará con más facilidad en agua y viceversa. Por regla general entre más pequeña sea la gota que se formó, la emulsión es más estable, esto quiere decir que al disminuir el tamaño de la gota el área superficial es mayor, aunque para poder formar una gota más pequeña se necesita mayor energía o una geometría que favorezca la disminución de tamaños de gota.

Hay límites para el tamaño de la gota en la industria de los alimentos; este diámetro es de 300 nm. Y las partículas más grandes pueden ser hasta de 2 o 3 milímetros para que aún se puedan ver como estables. Aunque el tamaño de la gota presenta diferentes diámetros y en general lo que se observa es una distribución de ellos, son los que determinan la viscosidad de la emulsión.

Las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables, esto es, requieren energía para su formación y para garantizar la estabilidad de éstas es necesario agregarles un agente emulsificantes, este agente tiene propiedades que permiten que las gotas formadas como fase dispersa no regresen a su estado original, pues este fenómeno tiende a la reversibilidad, además de que se le pueden agregar otros aditivos para asegurar y mantener la estabilidad, como se menciona es una propiedad muy importante en cualquier tipo de emulsiones.

Si se prepara una emulsión homogeneizando dos líquidos puros inmiscibles o parcialmente miscibles, la separación de fases será rápida comparada con una que cuenta aditivos que la ayudaran a mantenerse estable, especialmente si la concentración de la fase dispersa es alta. Para obtener emulsiones razonablemente estables hay que tener un tercer componente, un agente emulsionante. Las sustancias que son más efectivas como agentes emulsificantes se pueden clasificar como: sustancias con actividad superficial, materiales de origen natural, polvos finos de sólidos.

1.1 Propiedades físicas de las emulsiones

Una característica importantes de las emulsiones es su utilidad y el aspecto que ofrecen al consumidor (la industria o un consumidor final). Las propiedades de estas son: color, textura, viscosidad, estabilidad, también es importante señalar la afinidad que tienen para diluirse ya sea en agua o aceite según el tipo de emulsión del que se trate (Garti, Leser, 2001).

Probablemente la propiedad física más importante de una emulsión es la estabilidad. Las propiedades de una emulsión frecuentemente dependen, en gran parte, de su composición y de su modo de preparación. Estas propiedades físicas son las que rigen la estabilidad del sistema.

- a) Propiedades de la fase continua
- b) Tamaño de partícula (fase dispersa, gotas)
- c) Propiedades de la fase dispersa
- d) Propiedades del emulsificante

e) Viscosidad

Entre muchas otras propiedades que son importantes para una buena emulsión como el pH (Garti, et al., 2001).

1.2 Estabilidad de emulsiones

Muchos productos alimenticios que se encuentran en forma de emulsiones son estabilizados generalmente con proteínas actuando como emulsificantes. Los parámetros de la homogeneización, así como la composición de la mezcla determinan las características fisicoquímicas de las emulsiones. En la mayoría de las emulsiones alimentarias hay una gran cantidad de ingredientes que están presentes, que difieren de sus proporciones relativas.

La estabilidad de una emulsión depende de los siguientes factores: el tamaño de partícula, la diferencia de densidad de ambas fases, la viscosidad de la fase continua, partículas cargadas, la naturaleza, la eficacia y la cantidad del emulsificante, las condiciones de almacenamiento como son los cambios de temperatura que se puedan presentar, la agitación y vibración, la dilución o evaporación durante el almacenamiento (las emulsiones alimentarias no tienen tiempos largos de almacenamiento) o el mismo uso.

Puesto que las partículas de una emulsión están suspendidas libremente en un líquido dado, obedecen a la ley de Stokes si no están cargadas eléctricamente (Reiffers-Magnani, et al., 2000). Para muchos fines industriales la definición de estabilidad incluye forzosamente la no coalescencia de las partículas de la

emulsión y la no sedimentación. La incorporación de aire en una emulsión puede tener como consecuencia la reducción notable de la estabilidad.

El tamaño y la distribución de las partículas son gobernados por el emulsificante, el medio de agitación y la distribución de tamaños de la gota, si el tamaño de la partícula es reducido esto se nota en el color que toma la emulsión y su aspecto. Si queremos aumentar la estabilidad de la emulsión hay que tomar en cuenta:

- a) Un aumento en el emulsificante
- b) Mejorar el equilibrio hidrófilo-lipófilo del emulsificante
- c) Mejor agitación

1.3 Agentes emulsificantes

Los agentes emulsificantes son materiales que favorecen la estabilidad de una emulsión, la mayoría de ellos son adsorbidos en la interface líquido-líquido, formando una película que juega un papel muy importante en la estabilidad de la emulsión.

En general los emulsificantes están constituidos de una parte soluble en agua (hidrofílica) y una parte soluble en un material oleoso (lipófilo); estos compuestos tienden a reducir la tensión superficial y la interfacial (como se vera más adelante).

La función de un agente emulsificante es facilitar la formación de emulsiones y promover la estabilidad de las mismas. Estos agentes forman una película adsorbida alrededor de las gotas dispersas que contribuyen a evitar la

floculación y la coalescencia. El mecanismo de estabilización es complejo y puede variar de un sistema a otro. Sin embargo, en general, los factores que controlan la floculación y la coalescencia de las gotas dependen de las propiedades mecánicas de la película interfacial que forma el emulsificante alrededor de ésta. Los factores que favorecen la estabilidad de una emulsión dependen de la naturaleza del agente emulsionante y de la elección apropiada de las condiciones de formulación y manufactura. Algunos son:

a) Tensión interfacial baja. La adsorción de un emulsionante en una interfase aceite-agua produce una disminución de energía interfacial, con lo cual se facilita el desarrollo y favorece la estabilidad de las grandes áreas interfaciales asociada con las emulsiones; este abatimiento de la tensión interfacial disminuye el requerimiento de energía superficial, con lo que facilita la dispersión de un líquido en otro (este no es el único mecanismo de estabilizar emulsiones, las sustancias tales como gomas y sólidos muy pulverizados también tienen efectos estabilizadores importante, aunque a estos no se les reconoce claramente una naturaleza anfifílica).

b) Una película interfacial mecánicamente fuerte. Esta película da una protección mecánica que es adsorbida alrededor de la gota, más que de la reducción de la tensión interfacial, como se muestra en la figura 1.1.

c) Ser capaz de formar una barrera física y eléctrica alrededor de la gota que evite o retarde un fenómeno de desestabilización.

Los sólidos pulverizados para los que el ángulo de contacto está entre 0° y 180° tienden a acumularse en la interfase aceite-agua, donde le dan estabilidad a las emulsiones.

Los emulsificantes también estabilizan en el aspecto mecánico. La coalescencia implica la floculación de las gotas seguida de una exclusión de la sustancia de la película protectora de la región de contacto entre las gotas y esto último es más fácil con una película expandida que con una empaquetada de modo compacto (Fennema, 2003, Sánchez, et al., 2001).

Los emulsificantes pueden clasificarse de acuerdo con su porción hidrófila en

- a) Aniónicos
- b) Catiónicos
- c) No iónicos
- d) Anfólicos
- e) Insolubles en agua

La eficiencia de los emulsificantes se puede ver de dos formas diferentes, la parte económica y la eficiencia del agente, generalmente no van de la mano pero lo ideal es tener un emulsificante barato y eficiente, la cantidad empleada depende de las características de la emulsión a elaborar y ésta puede ir de uno a diez y en algunos casos hasta 15% del total de la emulsión. Clayton* dio el concepto de agente emulsificante equilibrado, implicando las propiedades tensoactivas de la molécula, es decir de su carácter hidrófilo o lipófilo. Se puede concluir que en una serie homóloga dada hay un punto de oscilación en que las características hidrófilas y lipófilas están tan equilibradas que se consigue una aplicación óptima para lo requerido.

1.3.1 Equilibrio hidrófilo-lipófilo HLB

Una característica importante de los surfactantes de bajo peso molecular es el concepto de HLB que representa el equilibrio hidrófilo-lipófilo, este concepto tiene que ver con la eficiencia del emulsificante y se dio de manera empírica signándole un valor a cada emulsificante dependiendo de la estructura de la molécula y del índice de saponificación entre otras propiedades se le asigna una cantidad. Un valor de 7 significa que la sustancia tiene aproximadamente igual solubilidad en agua que en aceite. Los valores menores a 7 implican mayor solubilidad en aceites. Los valores de HLB oscilan entre 1 y 40, los valores mayores a 7 son mejores para emulsiones

* Ver referencia Becher, 1972

o/w y los que tienen valores menores a 7 para emulsiones w/o.

En general, las cadenas alifáticas largas rinden valores de HLB bajos y los grupos más polares o de gran tamaño dan valores altos de HLB, este numero disminuye cuando se aumenta la temperatura. Cada agente emulsificante tiene su propio valor, en el caso de la lecitina su valor de HLB es elevado Fennema, 2003, Becher, 1972).

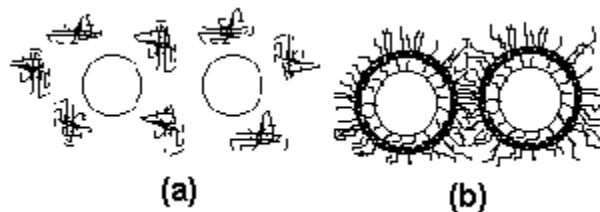


Figura 1.1 Esquema que ilustra las gotas estabilizadas en la interfase aceite-agua (a) muestra las macromoléculas sin adsorber el emulsificante como parte de la fase continua, (b) emulsificante adsorbido en la interfase aceite-agua.

1.3.2 Lecitina

La lecitina a nivel comercial proviene casi en su totalidad del frijol de soya, el cual contiene una porción aproximada de 2 a 3% de fosfolípidos. La lecitina tiene un sabor y olor característico, es soluble en solventes hidrocarbonados aromáticos ó alifáticos, es insoluble en agua pero se hidrata de un modo típico formando una emulsión amarillenta. La función de la lecitina como agente emulsificante depende de la composición de fosfolípidos y tipo de ácido graso presente, esto permite que se encuentren en la interfase y dan como resultado una disminución de la tensión interfacial. La parte no polar o cadena hidrocarbonada tiende a disolverse en el aceite o grasa y la porción polar constituida por el grupo fosfato o amino se disuelve en agua. En muchos sistemas alimentarios la lecitina no actúa como emulsificante aislado, sino se combina con otros aditivos para obtener ventajas funcionales como estabilidad o características sensoriales. Además de que produce baja tensión superficial, es un antioxidante y promueve la formación de pequeños cristales, es uno de los emulsificantes más activos, su único problema es su sabor que limita su uso (Garti, et al., 2001, Brekker, 1997).

1.4 Hidrocoloides como agentes estabilizadores

Los hidrocoloides también conocidos como gomas de origen vegetal se han empleado para estabilizar emulsiones desde tiempos remotos. Su eficacia es mayor en emulsiones aceite-agua, los autores Serallach y Jones** han demostrado que los materiales de esta clase se concentran con frecuencia en la

interfase para formar fuertes películas interfaciales, entre ellas se encuentran la goma arábica, guar, xantana, entre otras (Dickinson, 2003).

Los hidrocoloides en la industria de alimentos son ampliamente utilizados para controlar la textura y el sabor entre otros factores. El término hidrocoloide abarca a todos los polisacáridos que son extraídos de las plantas. Los polisacáridos están relacionados con dos factores que afectan a las emulsiones, como son el incremento de la viscosidad de la fase dispersa y la adsorción superficial (Dickinson, 2003, Rodríguez, et al., 2002).

1.4.1 Xantana

La goma xantana es un polisacárido exocelular producido por la bacteria *Xanthomonas campestris* en un medio de fermentación que contiene glucosa o en

** Ver referencia Dickinson, 2003.

hojas de plantas de las familias de las coles (Dickinson, 2003).

Los estudios en xantana muestran que el hidrocoloide contiene D-glucosa, D-manosa y ácido D-galacturónico. También contiene cerca de 4.7% de grupos acetilo, localizados en la posición 6 de la manosa interna y 3.0-3.5% de ácido pirúvico, presente como grupos diacetal, localizados en las posiciones 4, 6 sobre la manosa terminal (Garti, Leser, 2001, Fennema, 2003).

La masa molecular de la xantana varía considerablemente debido a las diferencias entre las muestras y los métodos para determinarla; investigaciones al respecto reportaron una distribución de masas moleculares que varía en un intervalo de 0.26×10^6 a 24×10^6 (Tinland, 1989).

Referente a la flexibilidad de la cadena polimérica, se ha sugerido que sufre transiciones que van desde una cadena tipo varilla rígida a semiflexible y eventualmente a un comportamiento de espiral aleatorio. Tales transiciones dependen de la fuerza iónica por el carácter de polielectrolito de la xantana (Garti, et al., 2001, Severian, 1998).

La xantana es un agente espesante (aumenta la viscosidad) muy utilizado en la industria de alimentos debido a sus características como: solubilidad en agua fría o caliente, alta viscosidad a bajas concentraciones, es compatible con las sales y sin duda su rigidez estructural y la naturaleza extendida de sus moléculas (Fennema, 2003, Huang, et al., 2001).

La xantana generalmente se agrega a las emulsiones alimentarias para incrementar la viscosidad y por lo tanto la estabilidad; algunos estudios demuestran que el lento cremado de las emulsiones se debe a la presencia de xantana (Hemar, 2000, Hemar et al., 2001).

En la figura 1.2 podemos observar que dependiendo de la concentración del hidrocoloide la emulsión tendrá diferentes comportamientos (Dickinson, 2003).

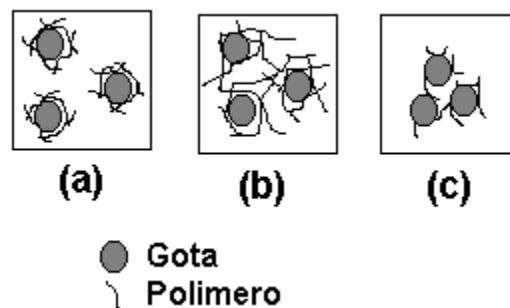


Figura 1.2 Esquema que representa tres efectos de adsorción de hidrocoloide en la interface con emulsiones de gotas esféricas, la concentración y la naturaleza de la interacción del hidrocoloide y el aceite (a) sistema estabilizado, (b) sistema gel debido a la alta concentración de hidrocoloide, totalmente inmóvil, (c) sistema con poca concentración de hidrocoloide que en poco tiempo llegara a la coalescerá.

1.5 Tamaño y distribución de partícula

En la definición dada con anterioridad se estableció que la fase dispersa se encuentra en gotas de un diámetro mayor a $0.1 \mu\text{m}$. En realidad, muy pocas emulsiones tienen diámetros menores de $0.25 \mu\text{m}$, y la mayoría son aproximadamente 100 veces mayores. El hecho de que se susciten variaciones en el tamaño de las partículas, implica que aun en una emulsión sencilla los diámetros de las gotas pueden estar lejos de ser uniformes. La distribución de tamaño de las gotas, en su mayoría de diámetros pequeños, aparentemente representa una situación de estabilidad, sin embargo esta situación puede ser temporal en la mayoría de los casos, pues conforme va pasando el tiempo la distribución tiende a tamaños de partícula mayores y esto provoca una inestabilidad en la emulsión (Reiffers-Magnani, et al., 2000, Kyazze, et al., 2003).

Las colisiones entre gotas pueden producir floculación, que a su vez pueden conducir a la coalescencia con formación de gotas o glóbulos mayores. Finalmente, la fase dispersa se convierte en una fase continua separada del medio de dispersión por una sola interfase. El tiempo necesario para que tenga lugar esta separación de fases puede ser desde unos segundos a varios años, según la formulación de la emulsión y las condiciones de preparación (Huang, et al., 2001).

1.6 Viscosidad de emulsiones

La viscosidad forma parte de la reología que es la ciencia de la deformación y el flujo de la materia bajo influencia de fuerzas externas. Es decir la reología

estudia la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación debido al movimiento (rapidez de deformación o velocidad de cizalla). Como una respuesta a este movimiento nos encontramos con la viscosidad que es una función del material que representa la facilidad o dificultad de un fluido a deformarse bajo condiciones específicas de esfuerzo; por este motivo la viscosidad representa un criterio indispensable cuando un material se encuentra en movimiento.

La viscosidad y la estabilidad de las emulsiones están estrechamente relacionadas, dependiendo de los parámetros estructurales (Mascan, et al., 2000).

Una emulsión es estable desde el punto de vista cinético, cuando el número, la distribución del tamaño de gota y el arreglo de la gota no tengan ningún cambio perceptible en la viscosidad de la emulsión por encima de una escala de tiempo durante su almacenamiento (Kyazze, Starov, 2003).

Desde un punto de vista teórico la determinación de la viscosidad es capaz de dar suficiente información acerca de la estructura de la emulsión, pues a mayor viscosidad podemos suponer que el área interfacial es mayor, lo que nos lleva a pensar que el tamaño de gota es pequeño comparado con un valor de viscosidad pequeño, y así relacionarlo con la estabilidad de la emulsión (Kyazze, Starov, 2003).

En general las emulsiones alimentarias tienen comportamiento reológicos no lineales.

1.7 Desemulsificación

La **desemulsificación** es el fenómeno físico en el cual hay una ruptura de la emulsión y considera:

- a) Formación de natas
- b) Inversión
- c) Desemulsificación

La formación de natas no es una ruptura de la emulsión es la separación de ésta en dos fases pero en que la fase dispersa se encuentra en ambos lados, una es más rica en la fase dispersa y la otra tiene menor cantidad. Como resultado de este fenómeno tendremos que la emulsión con mayor cantidad de fase dispersa que sube a la superficie, sin embargo es posible que esta misma fase vaya al fondo, la formación de natas no es una ruptura de la emulsión sólo es la presencia de gotas de mayor tamaño que eventualmente llevarán a un rompimiento de la emulsión.

La inversión de fases se debe primordialmente a la cantidad de fase dispersa que se encuentra presente, entre mayor sea ésta y bajo ciertas condiciones la fase dispersa tomará el papel de la fase continua y viceversa.

La **desemulsificación** es el proceso por el cual se lleva a cabo la ruptura de la emulsión, lo cual no es deseable; este fenómeno comienza con la floculación que es el proceso por el cual dos gotas se unen o adhieren después de haber chocado, no hay cambio del área superficial, continúan con su identidad, pero pierden su independencia cinética, ya que estos agregados se mueven como si fueran una unidad simple, este proceso es reversible (Dickinson, 2003) y puede ser contrarrestado con la agitación mecánica, como se muestra en la figura 1.3. La floculación de las gotas es el primer paso para la coalescencia.

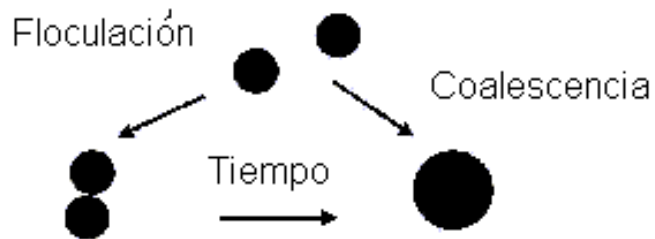


Figura 1.3 Representación esquemática de la inestabilidad de una emulsión.

El fenómeno de la coalescencia en las emulsiones y sistemas dispersos ha sido de estudio por varios años, llevándose a cabo en la interfase del líquido en donde contribuyen varias propiedades físicas. Esta unión ocurre debido a la colisión de gotas como resultado del movimiento Browniano, convectivo o de flotación (Nandi, et al., 2003, Fennema, 2003). Cuando chocan un par de gotas, las etapas que conducen a la fusión se resumen en tres pasos:

- 1) La película de la interfase se deforma por la aplicación de fuerzas y la tensión interfacial, esta deformación depende de la tensión interfacial entre los líquidos, la presión capilar dentro de las gotas y la fuerza aplicada a ellas.
- 2) Las fuerzas que actúan sobre las gotas provocan su deformación haciendo que la película de la interfase se adelgace y provoque un rompimiento haciendo que drene el líquido del interior esto sucede a valores críticos en donde actúan fuerzas de van der Waals provocando una ruptura dentro de otra gota.

3) La inestabilidad de la capilaridad provoca el adelgazamiento de la película interfacial llevando a la gota a la coalescencia (Nandi, et al., 2003).

Anderangi y Wasan*** (1995) observaron que la fusión de las gotas se debía al aumento de la viscosidad interfacial en el sistema (***) ver referencia Nandi, 2003).

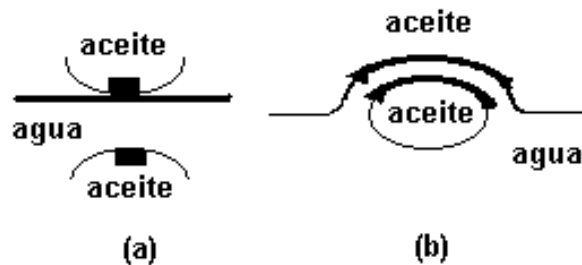


Figura 1.4 (a) Reseña del impacto de gotas de aceite en la interfase aceite-agua. (b) gota de aceite deformada antes de la colisión de las gotas de aceite en la interfase, dando como resultado un gradiente en la tensión interfacial.

En la figura 1.4 (a) podemos observar el impacto que tienen las interfaces aceite-agua y en la (b) el aumento del área interfacial antes de la colisión de las interfaces y este incremento en el área da lugar a un gradiente de tensión interfacial, y la deformación de la gota.

La fuerza debida a la doble capa eléctrica es importante solamente cuándo la película es acuosa y la concentración iónica dentro de la película es baja. En ciertas situaciones físicas, cuando la concentración de sales en el seno de la emulsión es alta, el gradiente de tensión interfacial será desplazado por la fuerza de flotación que presiona a la gota a la interfase, esto quiere decir que la gota será llevada en dirección contraria de la fuerza de flotación, lo que en realidad esto significa es que la interfase se inmoviliza evitando el deslizamiento entre las fases (Nandi, et al., 2003).

1. 8 Mezclado

El mezclado es una operación física que tiene como objeto hacer que el fluido sea homogéneo, es decir, se produzca un intercambio de materiales para producir una mezcla final, eliminando gradientes de concentración, temperatura y otras propiedades. El mezclado genera un caos o desorden que permite un intercambio de material en el sistema a homogeneizar. En particular dispersa un líquido inmiscible o parcialmente miscible en otro, rompiendo y distribuyendo las gotas que se forman en el proceso de emulsificación.

La emulsificación se lleva a cabo con agitadores mecánicos, este fenómeno físico conlleva al rompimiento de gotas y a la unión de las mismas. La combinación de estos dos fenómenos nos da como resultado un determinado tamaño de gota o una distribución de tamaños, pudiendo ser un criterio para medir la eficiencia del proceso de emulsificación por lo tanto estabilidad de la emulsión.

El proceso de emulsificación se lleva a cabo por agitadores de baja, media o alta velocidad dependiendo de las propiedades de la fase continua y la fase dispersa. Los agitadores de baja velocidad se utilizan para producir emulsiones de alta viscosidad, su geometría permite que se toquen la mayoría de las partes del tanque agitado. los mezcladores de velocidad media son utilizados para fluidos de viscosidad baja, debido a que producen flujos de cizalla y de elongación, este tipo de mezcladores o impulsores son utilizados en la preparación de emulsiones por su buena transferencia de masa y promueven la formación de gotas.

Los impulsores de alta velocidad se utilizan para la preparación de emulsiones de baja viscosidad con el fin de proporcionar un tamaño de gota adecuado que permita que estas tengan una mayor estabilidad, algunos equipos son los homogeneizadores, las turbinas rotor-estator, entre otros.

Para cada necesidad de mezclado se encuentra una gran variedad de geometrías, estas diferentes geometrías de agitación surgen de la necesidad de cumplir el objetivo de mezclar, tomando en cuenta que la mayoría de estas geometrías se elaboran artesanalmente sin fijarse en las pérdidas de energía que trae cada una de ellas.

1.9 Índice de cremado

El índice de cremado es un método utilizado en la industria de los alimentos y en general en la industria de las emulsiones para medir la estabilidad de estas, en el cremado hay un nuevo arreglo de las gotas de la fase dispersa, que se agrupan en la parte superior del recipiente donde se encuentra la emulsión, dando un aspecto cremoso y en la inferior un aspecto acuoso, en la parte superior se tendría la emulsión con una mayor concentración de gotas de aceite, el cremado es un fenómeno físico que sufre una emulsión al ser expuesta a un tiempo de centrifugado, con elevación de temperatura.

El centrifugado y el cambio de temperatura es una medida del tiempo de vida que tiene una emulsión, es decir su estabilidad. La floculación y la coalescencia se ven favorecidos por el tiempo, a mayor tiempo de anaquel las gotas adquirirán

un mayor tamaño, al ser mas grandes por densidad tenderán a subir provocando una diferencia en la distribución de las gotas.

Esta separación es medida, y conforme sea mayor la separación de las dos fases esto querrá decir que la emulsión es muy poco estable, si esta separación es imperceptible o poca entonces la emulsión tendrá una mayor estabilidad (Tornberg et al., 1977).

2 Materiales y métodos

2.1 Materiales

La xantana utilizada (Keltrol T de Kelco-Nutrasweet; San Diego, EU), el aceite de maíz es comestible (Girasol), lecitina de soya, azida de sodio grado reactivo (Merck) como agente antimicrobiano. Se utilizó agua desionizada durante toda la experimentación.

2.2 Formulación de la emulsión aceite-agua

| | |
|------------------|-------|
| Xantana | 0.05% |
| NaN ₃ | 0.01% |
| H ₂ O | 85.9% |
| Aceite de maíz | 10.0% |
| Lecitina de soya | 4.0% |

2.3 Preparación de la xantana

Previo a la hidratación de xantana se agregó al agua desionizada 0.01% de NaN₃ (0.2 g) como un agente antimicrobiano. Se dispersó 1 g de xantana en 2000 mL de agua desionizada a temperatura ambiente (20-23 °C) con agitación magnética hasta lograr la total dispersión, inmediatamente después se llevo la solución a una temperatura de 80 °C durante 1 hora, continuando con la agitación magnética, se dejó enfriar.

2.4 Preparación de la emulsión con una turbina de emulsión tipo rotor-estator.

Todas las emulsiones se prepararon con una turbina tipo rotor-estator Rayneri a diferentes velocidades de agitación, donde la formulación de la emulsión fue constante, el equipo consistió en un estator y un tanque de mezclado. Para la preparación de las emulsiones se utilizaron dos diferentes estatores K-45 y RS-45 (las especificaciones de la geometría se ven más adelante), utilizando el mismo rotor, la preparación de las emulsiones se llevo a diferentes velocidades para ambas geometrías.

Se pesaron 68 g de lecitina de soya y se disolvieron en 180 mL de aceite de maíz a una temperatura de 60 °C, como fase oleosa. Se calentaron 1586 mL de solución de xantana hasta llegar a una temperatura de 40 °C, se agregó la fase oleosa a la solución de xantana, y se agitó por 40 minutos con un mezclador del tipo rotor-estator. Este proceso se repitió en la preparación de la emulsión aceite-agua a diferentes velocidades de cizalla a 800, 1000, 1200, 1400, 1600 y 1800 rpm y con los dos diferentes estatores K-45 y RS-45.

Especificaciones de la turbina de emulsión tipo rotor-estator

| Estator | Diámetro externo | Diámetro interno | Espesor | Altura | Numero de ranuras | Abertura de la ranura | Altura de la ranura |
|---------|------------------|------------------|---------|--------|-------------------|-----------------------|---------------------|
| K-45 | 5 cm | 4.5 cm | 2.5 mm | 2 cm | 19 | 1.2 cm | 0.9 cm |
| RS-45 | 5 cm | 4.5 cm | 2.5 mm | 3 cm | 23 | 4 mm | 2.2 cm |

Rotor

| Diámetro | Altura | Espesor | Gap Rotor-Estator |
|----------|--------|---------|-------------------|
| 4.4 cm | 2.2 cm | 3 mm | 1 mm |

2.5 Determinación del índice de cremado

Se colocaron 12 mL de la emulsión en un tubo de ensaye y se calentó a 40 °C, se centrifugó a una velocidad de 3000 rpm durante 75 minutos (este tiempo fue estimado después de realizar varias pruebas y ver que a mayor tiempo de centrifugado la separación de la fases dispersa y continua ya no aumentaba). La determinación del índice de cremado es la división del volumen de cremado ($V_{cremado}$) entre el volumen original (12 mL, V_{Total}) por 100 como se muestra en la ecuación (2.2), y el volumen de cremado es el volumen total (V_{Total}) menos el volumen separado ($V_{separado}$), el volumen separado es el resultado de la centrifugación después de los 75 minutos es decir la separación que hay entre la fase dispersa y la continua de la emulsión. Estas mediciones se realizaron periódicamente para saber cómo varió el índice de cremado con el tiempo de preparación de la emulsión (Tornberg, 1978, Tornberg, Hermansson, 1977).

$$V_{cremado} = V_{Total} - V_{separado} \quad (2.1)$$

$$\%I_{cremado} = \frac{V_{cremado}}{V_{Total}} \times 100 \quad (2.2)$$

2.6 Determinación de la viscosidad

Se realizaron pruebas de cizalla simple a 25 °C en un reómetro de deformación controlada (Haake Rotovisco RV20, CV20N) con una geometría de cilindros concéntricos (cilindro interno: diámetro =13.91 mm; longitud = 32.3 mm; cilindro externo: diámetro = 15.0 mm) en todas las mediciones. Se consideró la geometría de cilindros concéntricos debido a las características de la emulsión. Estas mediciones se realizaron periódicamente para observar el cambio en la viscosidad con respecto al tiempo de preparación de la emulsión. Los parámetros obtenidos fueron los siguientes:

Esfuerzo cortante y viscosidad en función de la deformación.

La viscosidad se calcula por la ley de la potencia que dice:

$$\sigma = \kappa \dot{\gamma}^n \quad (2.3)$$

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.4)$$

$$k = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}^n} \quad (2.5)$$

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad (2.6)$$

en la ecuación (2.3) se muestra la ecuación de un fluido que se comporta tipo ley de la potencia, la ecuación (2.4) muestra como se determina la viscosidad, de la ecuación (2.3) se despeja k que es el coeficiente de consistencia, y se sustituye en la ecuación (2.4), para obtener la ecuación (2.6) en donde tenemos la dependencia que existe entre la viscosidad el esfuerzo y la rapidez de deformación.

2.7 Medición del tamaño de gota y distribución de tamaños

La medición del tamaño de gota y la distribución fue determinado para todas las muestras por Malvern MasterSizer MSE (Malvern Instruments Ltd, Malvern, Worcestershire, UK). De este equipo se obtuvo la distribución de tamaño de gota, así como los diámetros de las gotas que predominaban en las diferentes emulsiones. Estas mediciones se realizaron recién preparada la emulsión y periódicamente, con el fin de observar como cambiaba la distribución del tamaño de la gota con respecto al tiempo.

3 Resultados y discusión

3.1 Índice de cremado

En la figura 3.1 se muestran los resultados del índice de cremado, relacionados con las diferentes velocidades de preparación de las emulsiones. Se puede observar que las emulsiones preparadas a velocidades de cizalla de 1800 rpm tienen el menor índice de cremado esto quiere decir que hay una mayor separación al centrifugar entre las dos fases (dispersa y continua). Las emulsiones preparadas a velocidades menores (800 rpm) también muestran índice de cremado bajo, sin embargo a la velocidad de 1400 rpm es la que muestra mayores porcentajes en índice de cremado. Esto quiere decir que a mayor índice de cremado se tendrá una emulsión con mayor estabilidad. Ya que a hay una menor separación entre las fases al centrifugar la emulsión. Por lo que podemos decir que el índice de cremado es una función de la velocidad de preparación de las emulsiones.

Contrariamente a lo que se podría pensar que al aumentar la velocidad de preparación de las emulsiones estas tendrían un mayor índice de cremado (es decir una separación menor en las fases).

Haciendo una comparación entre los dos estatores (K-45 y RS-45), también tenemos una diferencia notable en el índice de cremado para la velocidad de preparación de 1400 rpm hasta de 19%, y en la de 1800 rpm una de 25%, es decir hay una diferencia notable entre las emulsiones formadas con el estator K-45 y el RS-45. Esta diferencia de valores es atribuible a la geometría de cada estator, teniendo en el K-45 un número menor de ranuras, por lo tanto mayor abertura en

cada una de estas, afecta directamente en el tamaño de gota que se obtiene al prepararse la emulsión (Tornberg, Hermansson, 1977). Sin embargo no es el único factor que afecta el tamaño de la gota, también tienen influencia la velocidad de preparación (energía introducida al sistema), el emulsificante y el hidrocoloide.

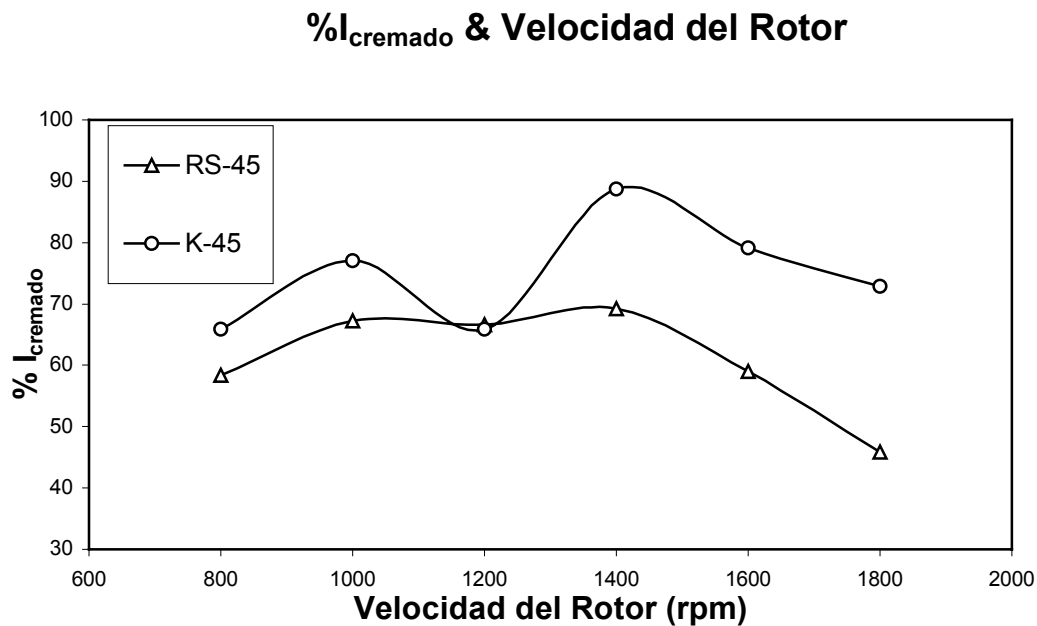


Figura 3.1 %I_{cremado} & Velocidad del Rotor

1.2 Viscosidad

En una emulsión que contiene una mezcla de hidrocoloide y pequeñas moléculas de emulsificante, es natural que se vean reflejadas interacciones hidrocoloide-emulsificante en las mediciones reológicas y en la estabilidad de la emulsión (Dickinson, 2003).

En la figura 3.2 se muestran los resultados de viscosidad contra velocidad de deformación para todas las emulsiones preparadas con el estator K-45 a

diferentes rpm. Se observa que a pequeñas velocidades de deformación la viscosidad tiene valores altos, y para velocidades de deformación grandes la viscosidad disminuye, esto se debe a que la viscosidad es una función de la velocidad de deformación mostrando un comportamiento pseudoplástico.

Los valores altos de viscosidad a deformaciones pequeñas es atribuible a la formación de agregados o a la presencia de enlaces hidrógeno y al entrecruzamiento del polímero (xantana), esto es posible gracias a las gotas de aceite, de alguna manera la estructura se ve afectada por los agregados que se forman en la emulsión (Hemar, et al., 2001).

En la grafica de la figura 3.2 se puede observar que la velocidad de 1200 rpm es la que presenta una mayor viscosidad a velocidades bajas de deformación y la que presenta una menor viscosidad es la emulsión preparada a 1000 rpm. Aunque se ve que el comportamiento para todas las curvas es el mismo.

Las pequeñas diferencias que se observan en la reología de las emulsiones de la figura 3.2, tomando en cuenta que todas tienen la misma formulación se debe a las diferentes velocidades de agitación con que fueron preparadas.

En la figura 3.3 muestran los resultados de viscosidad contra velocidad de deformación para un estator RS-45, teniendo de igual forma un comportamiento pseudoplástico, se observa que la emulsión preparada a 1200 rpm muestra la mayor viscosidad a bajas deformaciones, y la de 1000 rpm muestra menor viscosidad a las mismas deformaciones.

Sin embargo este no es un criterio único para decir que la emulsión preparada a 1200 rpm son las que presentan una mayor estabilidad, sino que presenta interacciones xantana-lecitina que permiten suponer que hay un

entrecruzamiento entre estas moléculas y eso afecta a la reología de la emulsión. El fenómeno de pseudoplásticidad se presenta en la mayoría de las emulsiones alimentarias.

Viscosidad & Velocidad de deformación para un estator K-45

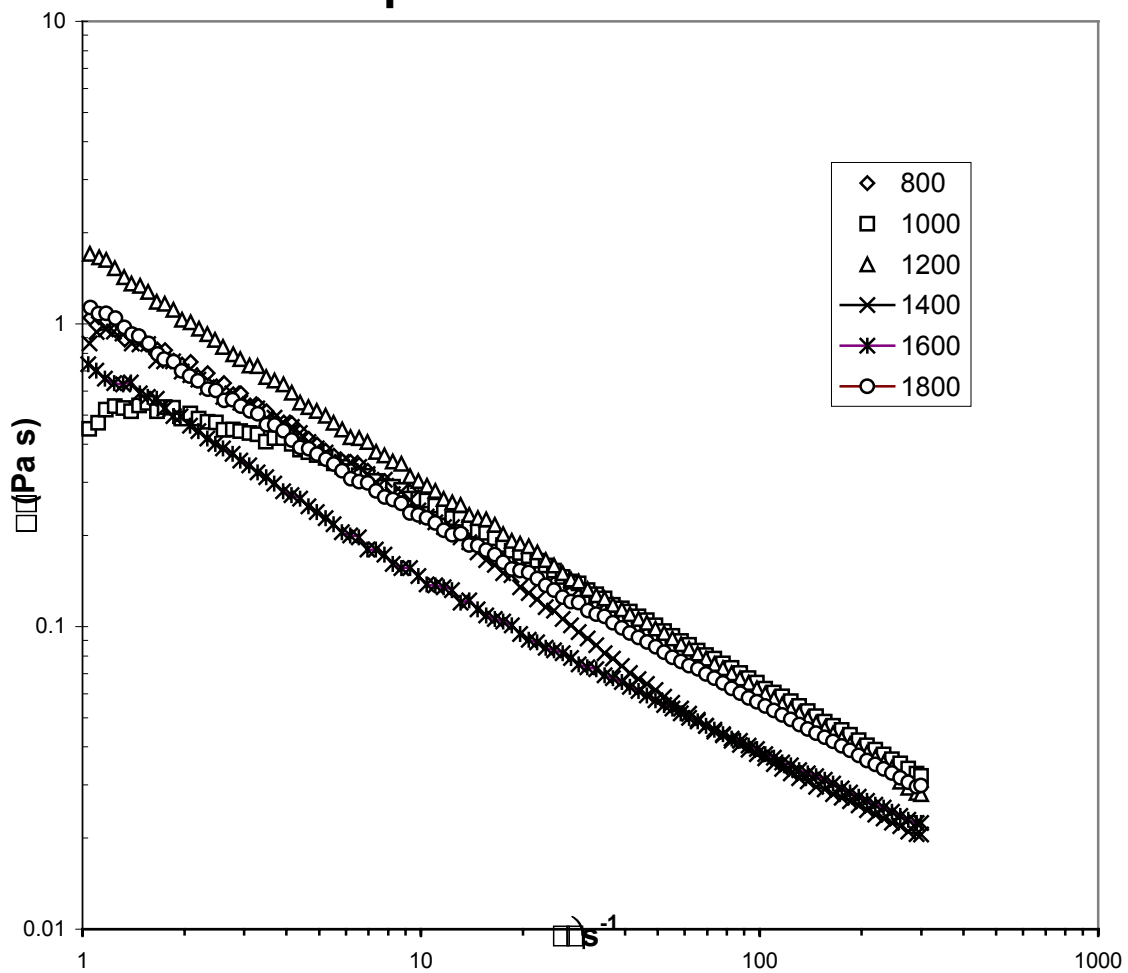


Figura 3.2 Curvas de Viscosidad & Rapidez de deformación para el estator K-45

Viscosidad & Velocidad de deformación para un estator RS-45

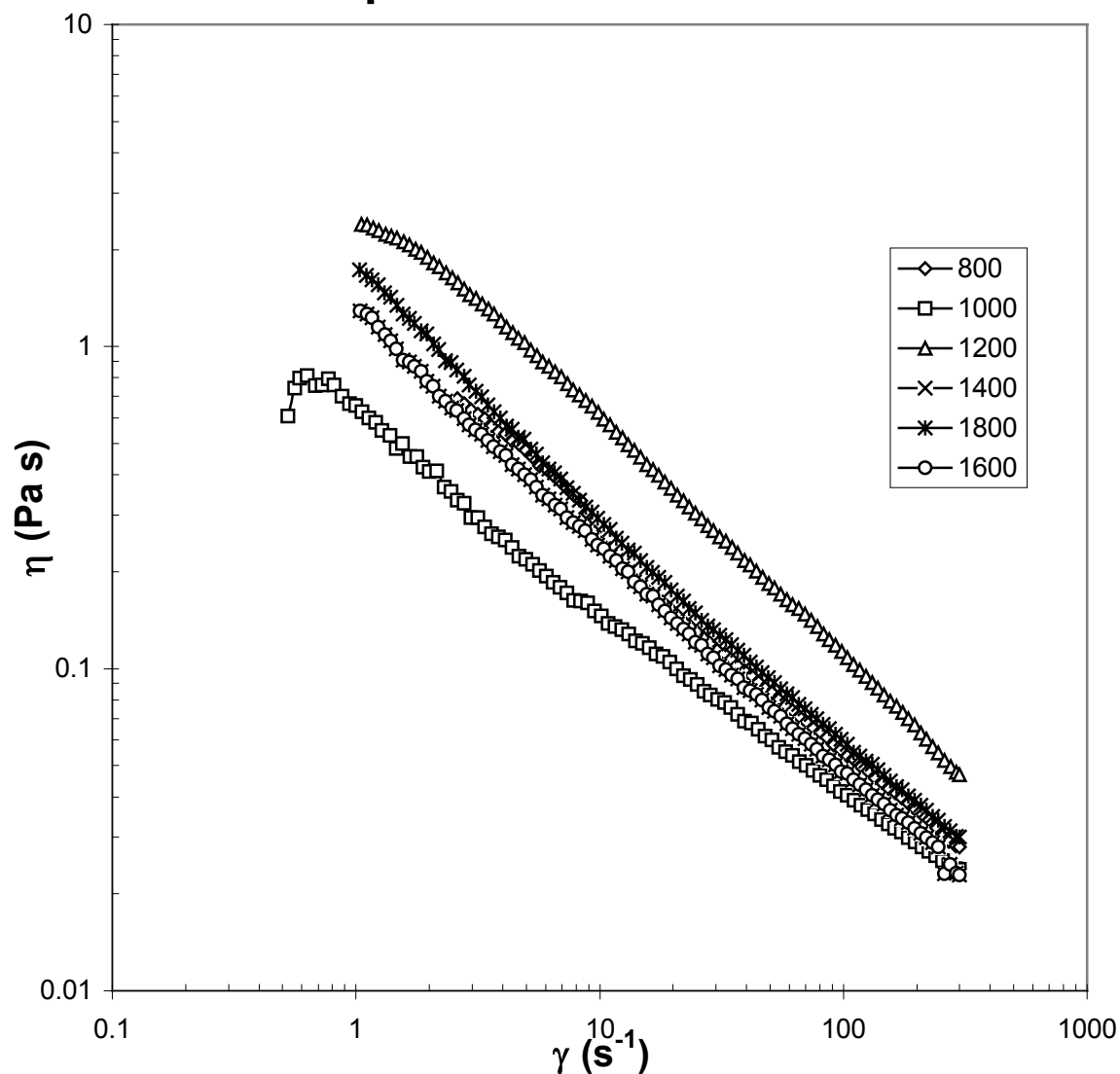


Figura 3.3 Curvas Viscosidad & Velocidad de deformación para un estator RS-45

En el cuadro 3.1 se muestran los resultados obtenidos del modelo ley de la potencia, que describe la relación que existe entre la viscosidad y la velocidad de deformación. Se muestran los índices de consistencia y el de comportamiento de

flujo, con los resultados experimentales se obtiene la correlación de estos que va de 0.997 hasta 0.970. Estos valores muestran un comportamiento pseudoplástico para las emulsiones preparadas con los dos estatores (K-45 y RS-45). El índice de comportamiento de flujo (n) promedio, no muestra ninguna diferencia es el mismo valor. Sin embargo el índice de consistencia (k) muestra una diferencia del 23% entre ambos estatores, en los valores particulares para cada velocidad en el K-45 el índice de consistencia tiene un aumento pero al llegar a 1400 rpm baja nuevamente. En el caso del estator RS-45 el valor del índice de consistencia no muestra ninguna relación. Lo que se puede concluir que estos parámetros no son función de la velocidad de preparación de las emulsiones y tampoco de la geometría que se utilice (Mascan, Gögüs, 2000, Dickinson, 2003).

| Estator | Velocidad [rpm] | k [$Pa \cdot s^n$] | n | r^2 | k promedio [$Pa \cdot s^n$] | n promedio |
|---------|-----------------|------------------------|------|-------|---------------------------------|--------------|
| K-45 | 800 | 0.64 | 0.47 | 0.994 | 1.037 | 0.410 |
| | 1000 | 1.09 | 0.38 | 0.997 | | |
| | 1200 | 1.40 | 0.38 | 0.970 | | |
| | 1400 | 1.05 | 0.41 | 0.978 | | |
| RS-45 | 800 | 1.09 | 0.40 | 0.972 | 0.802 | 0.410 |
| | 1000 | 0.40 | 0.53 | 0.984 | | |
| | 1200 | 1.13 | 0.35 | 0.983 | | |
| | 1400 | 0.90 | 0.39 | 0.970 | | |

Cuadro 3.1 Valores obtenidos del modelo ley de la potencia

Viscosidad & Velocidad de deformación a 1200 rpm

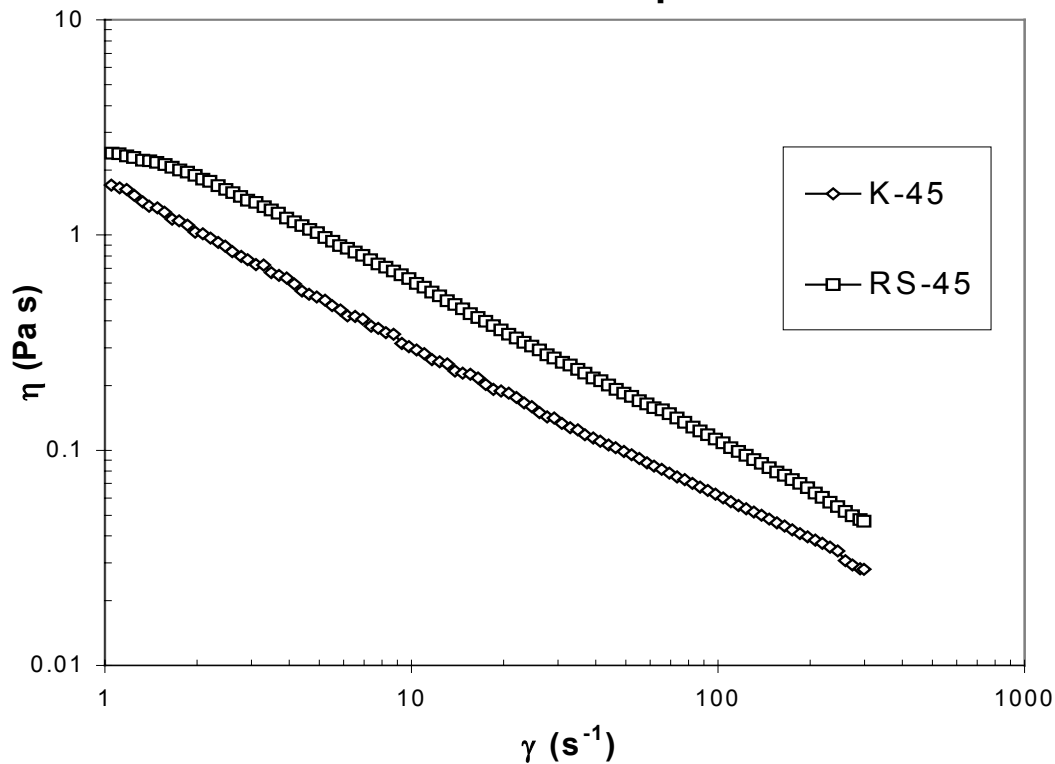


Figura 3.4 Curvas donde hay una comparación entre las emulsiones preparadas a 1200 rpm para ambos estatores

En la figura 3.4 se muestra una grafica que compara la velocidad de agitación de 1200 rpm con respecto a los dos estatores y la diferencia que existe entre las dos, en la emulsión preparada con el estator RS-45 el valor de la viscosidad a una rapidez de deformación de 1 s^{-1} es mayor por una unidad, no es una diferencia considerable, sin embargo con los datos que se muestran a continuación podemos suponer que el diámetro de las gotas es menor que en la formada con el estator K-45.

3.3 Medición del tamaño de partícula

La oscilación en el tamaño de partículas implica que en emulsiones sencillas los diámetros de las gotas están lejos de ser uniformes, y que a lo largo del tiempo se resume en una inestabilidad de la emulsión.

En la figura 3.5 se muestra la distribución del tamaño de partícula, se observa en todas una distribución bimodal, la emulsión preparada a 800 rpm donde se observa una distribución de tamaños en la primera campana de 0.1 μm hasta 0.25 μm , en la siguiente campana los valores van de 4 μm a 40 μm , la emulsión preparada a 1800 rpm tiene diámetros que van de 0.5 μm a 80 μm , pero tiene un alto porcentaje de partículas grandes, que en un tiempo determinado harán que la emulsión flocule y a su vez llegue a la coalescencia, es decir a la ruptura de la emulsión que es lo que se trata de evitar. La emulsión formada a 1400 rpm tiene una región uniforme en cuanto a los diámetros de la gota (0.5 μm a 30 μm). Este mismo análisis se puede llevar a la figura 3.6 en donde nuevamente los tamaños de partícula se ven afectados por la velocidad de preparación de la emulsión, en el caso del estator RS-45 muestra tamaños de gota menores que el K-45 para algunas velocidades.

%Volumen & Tamaño de partícula para un estator K-45

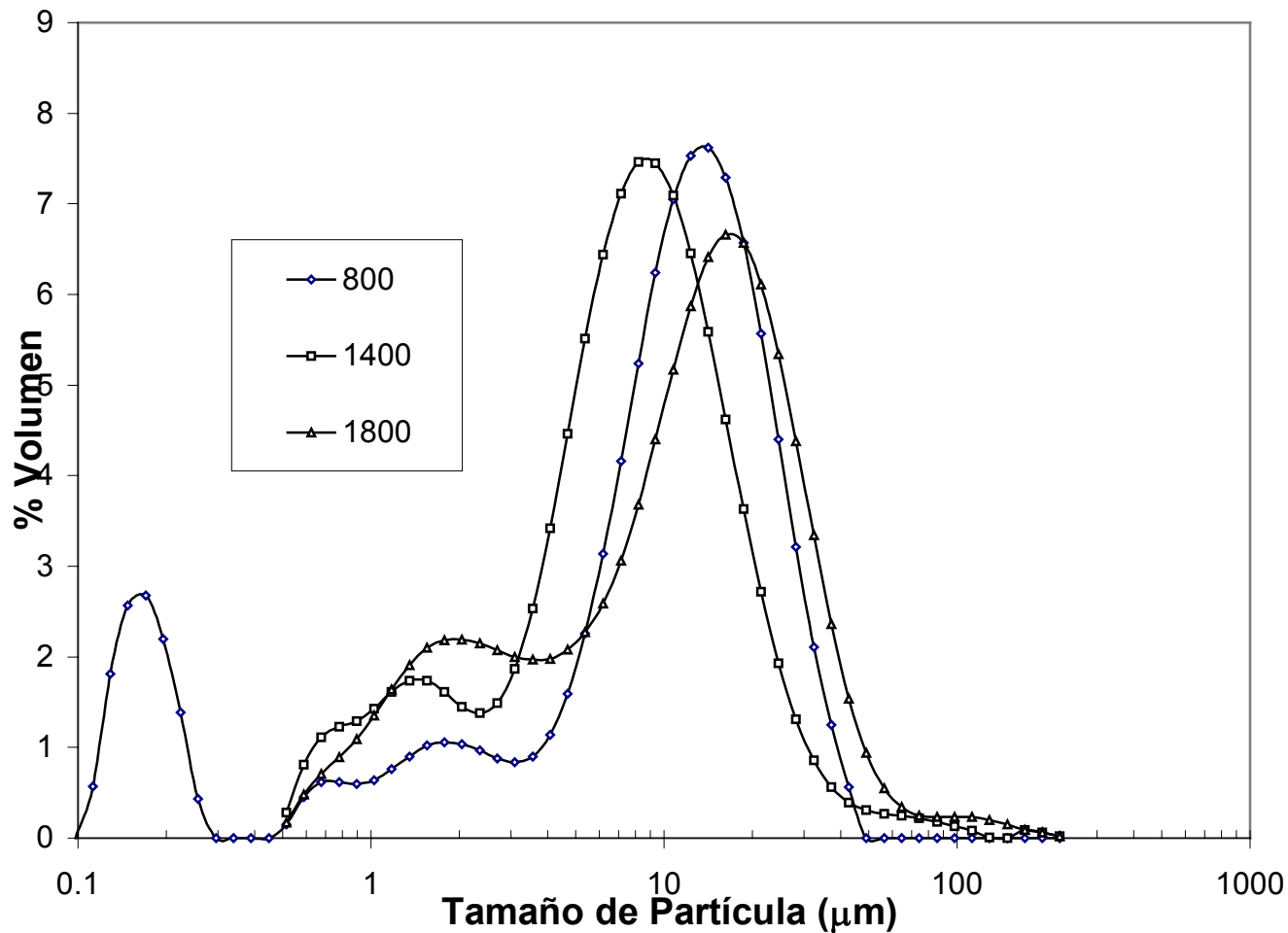


Figura 3.5 Curva de distribución de tamaño de gota para un estator K-45 (datos tomados a 30 de formada la emulsión)

%Volumen & Tamaño de partícula para un estator RS-45

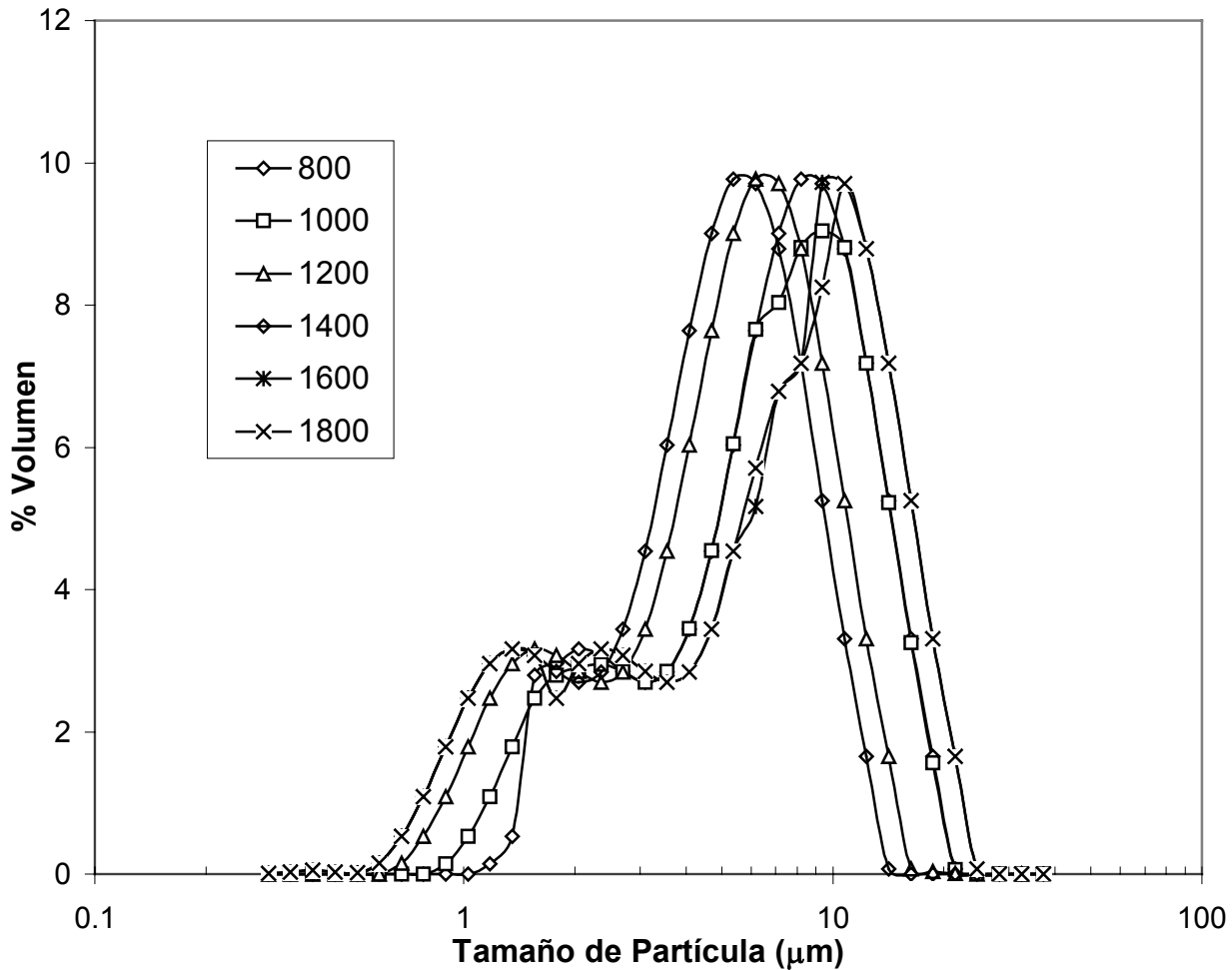


Figura 3.6 Curvas de distribución de tamaño de gota para un estator RS-45 (datos tomados a un día de formada la emulsión)

En la figura 3.7 se hace una comparación entre las emulsiones preparadas a 1400 rpm con los estatores K-45 y RS-45, se puede observar que la emulsión preparada con el K-45 tiene una distribución menor en el tamaño de partícula y que nuevamente se ven representadas dos campanas, es decir una distribución bimodal para ambas emulsiones. Esta distribución bimodal puede ser

consecuencia de la velocidad de preparación de las emulsiones o de la geometría de los estatores que promueven la ruptura del aceite por las ranuras. También puede deberse que la lectura no se hace inmediatamente de formada la emulsión sino que se le da un día de reposo y esto puede favorecer a que algunas gotas floculen (Dickinson, et al., 2003).

% Volumen & Tamaño de partícula de una emulsión preparada a 1400 rpm

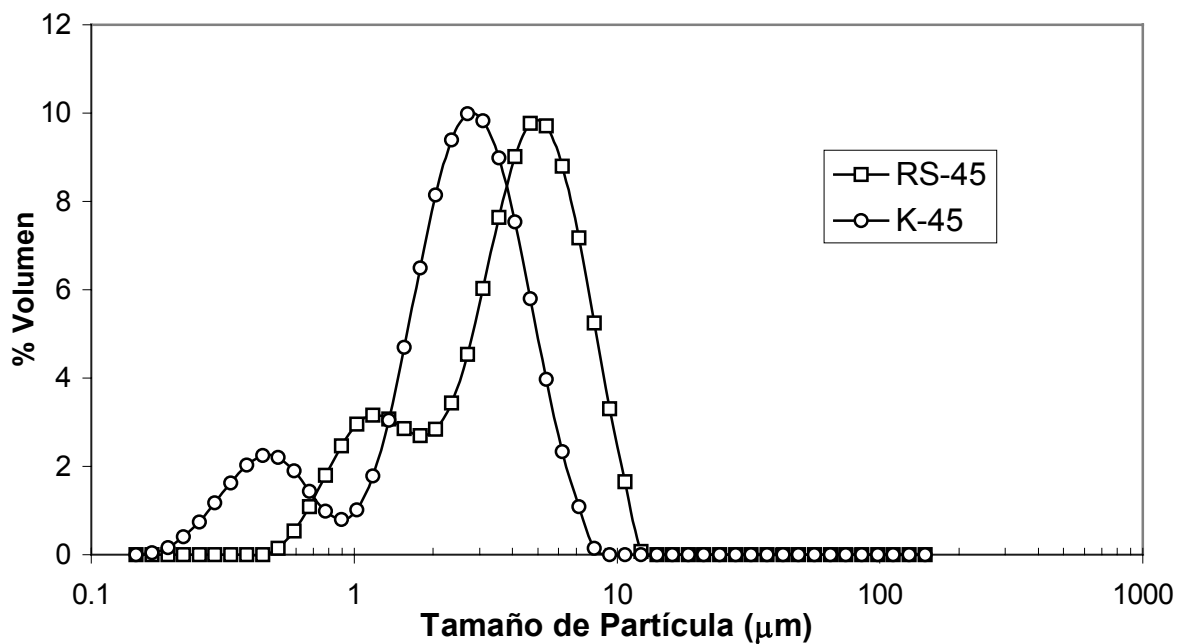


Figura 3.7 %Volumen & Tamaño de partícula, preparada con dos diferentes estatores a 1400 rpm (datos tomados a un día de formada la emulsión)

4 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos se puede decir que las emulsiones aceite-agua en la industria de los alimentos se comportan como fluidos pseudoplásticos, la estabilidad de éstas depende de varios factores ya mencionados, además de tomar en cuenta factores como la temperatura de preparación, la geometría de agitación, la concentración de la fase dispersa, así como el emulsificante y algún agente estabilizador como la xantana en este estudio, se puede llegar a obtener emulsiones con mayor tiempo de vida (es decir más estables), esto es sin que ocurra la ruptura de ésta por los factores mencionados.

Las emulsiones fueron sometidas a tres pruebas diferentes con la intención de saber cual de estas tenía una mayor estabilidad, y haciendo un estudio de cuales son los posibles factores que hacen que la emulsión sea estable.

En el índice de cremado, se encontró que hay velocidades de preparación en las cuales las emulsiones presentan una mayor estabilidad, en la prueba del índice de cremado (que es utilizado como un criterio en la industria de los alimentos por ser una medida rápida y confiable de la estabilidad de las emulsiones) se encontró que las emulsiones mas estables fueron las de 1400 rpm para ambos estatores, sin embargo entre estas hay hasta un 20% de diferencia, lo que podría suponerse que para este estudio la emulsión preparada con el estator K-45 con es la de mayor estabilidad.

Determinación de la viscosidad. Se encontró que este tipo de emulsiones se comportan como fluidos pseudoplásticos es decir la viscosidad depende de la

deformación a la que se vea expuesta, se utilizó el modelo ley de la potencia, donde se obtuvieron los siguientes parámetros, índice de comportamiento de flujo (n), índice de consistencia (k). En el índice de comportamiento de flujo no hubo diferencias observadas entre emulsiones formadas con el mismo estator a diferentes velocidad, no con el otro estator. En cambio para el índice de consistencia no se encontró ninguna relación, ni con las velocidades de formación, ni con la geometría de cada estator, a nivel microscópico no hay cambios apreciables en la viscosidad. La correlación para ambos estatores fue de 0.99 a 0.97, que para ambos casos se considera buena.

En las pruebas reológicas se encontró que la emulsión formada a 1200 rpm con los dos estatores diferentes, es la que muestra mayor viscosidad a bajas deformaciones, por lo que podemos suponer que hay una mayor área interfacial, esto es que la distribución del tamaño de gotas es de diámetros uniformes y pequeños, sin embargo no se puede olvidar la influencia que tienen la xantana y la lecitina una como agente estabilizador y la otra como emulsificante que promueven la estabilidad de las emulsiones.

En la medición del tamaño y distribución de partícula se encontró que las emulsiones preparadas a 1400 rpm muestran tamaños de gota menores del orden de 0.2 μm a 9 μm preparada con el estator K-45, y la preparada con el RS-45 de 0.5 μm a 11 μm . Este criterio de estabilidad aunado a los dos anteriores nos llevan a concluir que las emulsiones formadas a 1200 rpm y 1400 rpm para ambos estatores son las que tienen una mayor estabilidad. Contrario a lo que se podría suponer con las emulsiones

preparadas a 1800 rpm suponiendo que la alta velocidad promovería la formación de gotas con diámetros pequeños, es decir mayor área superficial, no ocurre, lo que traería pérdidas en vez de beneficios.

De aquí la importancia de saber las características que hacen a una emulsión estable, tomarlas en cuenta para su preparación.

5 Referencias

Dickinson, E. (2003). Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocolloids*, **17**, 25-39.

Dickinson, E., Radford, J., Golding, M. (2003). Stability and rheology of emulsions containing sodium caseinate: combined effects of ionic calcium and non-ionic surfactant. *Food Hydrocolloids*, **17**, 211-220.

Nandi, W. G. M., Agterof, D. (2003). Investigation of the effect of a simple SALT on the kinetics of gravity induced coalescence for a viscosity matched emulsion system. *Colloids and Surfaces*, **213**, 199-208.

Kyazze, G., Starov V. (2003). Influence of Cluster Formation: Viscosity of Concentrated Emulsions. *Applied Rheology*, **13** (5), 259-264.

Fennema, O. R. (2003). Química de los alimentos. Editorial Zaragoza. Acribia. España.

Rodríguez, R. Hombre, M. Villavicencio (2002). Estabilizador combinado para helado de crema. *Revista alimentaria*, 137-139.

García, G., Rodríguez, J., Villavicencio, M. (2002). Influencia de la formulación en la estabilidad de aderezos tipo mayonesa, 87-89.

Huang, X., Kakuda, Y., Cui, W. (2001). Hydrocolloids in emulsions: particle size distribution and interfacial activity. *Food hydrocolloids*, **15**, 533-542.

Sánchez, Berjano, Guerrero, Gallegos (2001). Emulsification Rheokinetics of Nonionic Surfactant-Stabilized Oil-in-Water Emulsions. *Langmuir*, **17**, 5410-5416.

Hemar, Y., Tamehana, M. (2001). Influence of xanthan gum on the formation and stability of sodium caseinate oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*, **15**, 513-519.

Garti, N., Leser, M. (2001). Emulsification properties of Hydrocolloids. *Polymers for Advanced Technologies*, **12**, 123-135.

Hemar, Y., Tamehana, M. (Junio, 2000). Effect of xanthan on the stability of sodium caseinate oil-in-water emulsions. *The Australian Journal of Dairy Technology*, **55**, 95.

Reiffers-Magnani, C.K, Cuq, J. L., Watzke, H. J. (2000). Depletion flocculation and thermodynamic incompatibility in whey protein stabilized O/W emulsions. *Food Hydrocolloids*, **14**, 521-530.

Maskan, M., Gögüs, F. (2000). Effect of sugar on the rheological properties of sunflower oil-water emulsions. *Journal of food Engineering*, **43**, 173-177.

Desrosier, N. (1997). Elementos de tecnología de alimentos. Décimo segunda reimpresión. México, D. F. 207-217, 529-535.

Severian, D. (1998). Polysaccharides: Structural Diversity and Functional Versatility. M. Dekker. Nueva York.

Brekker, O. L. (1997). Desgomado del aceite y la lecitina de soya. *Ind. Alimentaria*, **10** (1). 15-18.

Tinland, B., Rinaudo, M. (1989). Dependence of the stiffness of the xanthan chain on the external salt concentration. *Macromolecules*, **22**, 1863-1865.

Tornberg, E., Lundh, G. (1978). Functional characterization of protein stabilized emulsions: standardized emulsifying procedure. *Journal of Food Science*, **43**, 1553-1558.

Tornberg, E. (1978). Functional characterization of protein stabilized emulsions: creaming stability. *Journal of Food Science*, **43**, 1559-1965.

Tornberg, E., Hermansson A. (1977). Functional characterization of protein stabilized emulsions: Effect of processing. *Journal of Food Science*, **42**, 468-472.

Becher, P. (1972). Emulsiones Teoría y Practica. Editorial Blume. Madrid. España.