

# Fabricación de un mini molino acoplado a una instalación de bombas de pequeño caudal para producir emulsiones con tamaño de gota uniforme

## Manufacture of a mini-mill coupled to an installation of low flow pumps to produce emulsions with uniform droplet size

Guédez, Víctor\*; Concho, Ileana y Rodríguez, Fernando

Grupo de Tecnología, GRUTEC, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, ULA.

Mérida 5101, Venezuela

\*guedez@ula.ve

### Resumen

*Las emulsiones son sistemas polidispersos en el cual una fase aceite (o agua) está dispersa en agua (o aceite) como fase continua. Existen múltiples factores que generan diferentes características en las emulsiones, siendo una de los aspectos más importantes el tamaño de gota de la fase dispersa. Entre los factores, se encuentra uno muy importante que es la cizalla mecánica. Este proyecto se enfoca en estudiar el efecto de la cizalla, en función del dispositivo utilizado, en el tamaño y distribución del tamaño de gota de las emulsiones. El objetivo principal de este proyecto es fabricar un mini molino de fluido el cual se acopla a componentes mecánicos tales como bombas de pequeño caudal, tuberías y accesorios. Se estudia cómo diferentes componentes afectan el tamaño de gota de la emulsión. Se utilizan las metodologías del QFD (Quality Function Deployment) y del Análisis de Alternativas para seleccionar el tipo de molino de fluido. Para el diseño del prototipo se utiliza la técnica de Diseño para Manufactura y la ayuda de programas CAD. Luego se inicia el proceso de fabricación en el laboratorio de Tecnología Mecánica utilizando las máquinas-herramientas disponibles. A continuación se ensambla el prototipo y se realizan los experimentos utilizando un sistema modelo: agua/kerosén/surfactante no-iónico cambiando solamente la relación agu/kerosén. El prototipo diseñado y fabricado mostró que se pueden obtener, bajo ciertas condiciones, tamaños de gota uniformes para las emulsiones del tipo agua-en-kerosén.*

**Palabras clave:** Cizalla, diseño y manufactura, prototipo, QFD, emulsiones

### Abstract

*Emulsions are polydisperse system in which an oil (or water) phase is dispersing in water (or oil) as continuous phase. To obtain emulsions with low polydispersity in droplet size distribution, one of the most important factors is the mechanical shear introduced in the oil/water/surfactant system to produce the emulsion. The main objective of this project is to produce a fluid mini mill, which is coupled to mechanical components such as small flow pumps, pipes and fittings. Also, the project studied how different components affect the droplet size of the emulsion. The methodologies used were QFD (Quality Function Deployment) and Analysis of Alternatives to select the type of fluid mill. The prototype was designed using Manufacturing Design and CAD programs. Then, the manufacturing process starts in the laboratory of Mechanical Technology using machine tools. Later, the prototype was assembled and tested in the laboratory. Finally, the prototype obtained a small and uniform drop size*

**Key words:** Shear, design and manufacturing, prototyping, QFD, emulsions.

### 1 Introducción

Las emulsiones son dispersiones de dos líquidos inmiscibles, en las cuales uno de los líquidos está disperso en el otro que formará la fase continua. Se pueden dar dos ti-

pos de morfologías; emulsiones agua en aceite (W/O) o de aceite en agua (O/W) y generalmente se requiere la presencia de una sustancia estabilizadora llamada surfactante. Las emulsiones son ampliamente utilizadas en las industrias farmacéuticas, cosméticas, alimenticias, de pinturas, petro-

leras etc. La calidad de estos productos está sujeto a diferentes características tales como: el tamaño y distribución del tamaño de gota, la diferencia de la densidad de ambas fases (dispersa y continua), la viscosidad de la fase continua, la estabilidad del sistema disperso. El tamaño de gota y su distribución repercuten en la estabilidad cinética de los productos emulsionados y debido a que el cizallamiento mecánico determina en gran medida el tamaño de gota y su distribución, éste mejoraría estabilidad de una emulsión.

El científico Taylor (1934) fue el primero en proponer la creación de dos aparatos compuestos por poleas colocadas dentro de recipientes para lograr un tamaño de gota pequeño por medio de cizalla mecánica. Adicionalmente, otros investigadores propusieron modelos para la emulsión como por ejemplo: los mezcladores de alta velocidad (Minoru, 2006; Kurosawa, 2008; Nozomu, 2011; Bansal y otros, 2011), los molinos coloidales (Mason y Bibette, 1997; Mabile y otros, 1999; Adler-Nissen, Mason y Jacobsen, 2003; Han, Washington y Melia, 2004; Araujo y Nuñez, 2006; Salentinig y otros, 2008; Hassan y otros, 2008; Kaminsky, 2009), las válvulas homogeneizadoras de alta presión (Almeida-Rivera y Bongers, 2010; Reinheimer, Grosso y Wilhelm, 2011), los homogeneizadores ultrasónicos (Nii, Kikumoto y Tokuyama, 2008; Chiha y otros, 2009), la micro fluidificación (Bunyan, Hannah y Mari, 2010), las membranas homogeneizadoras (Yukinobu, 2008; Kukizaki, 2008; Bunyan, Hannah y Mari, 2010; Holdich, 2010; Ahmad y otros, 2010; Koris y otros, 2010) y los homogeneizadores de microcanales (Chia-Wei, Yen-Heng y Gwo-Bin, 2008). Los modelos propuestos son limitados debido a que son de alto costo, tienen un alto consumo de fluido y alto consumo de energía.

Debido a que las características de las emulsiones dependen fundamentalmente no solo del tamaño de gota sino de la distribución de la misma, es importante fabricar prototipos donde se pueda controlar la cizalla. En este estudio se ha diseñado y construido un pequeño molino con diferentes holguras para producir gotas diminutas y homogéneas a través del cizallamiento que se producirá sobre el fluido. Luego, para complementar el equipo fabricado, se seleccionan diferentes accesorios con el propósito de ensamblar un circuito de fluidos para mezclar emulsiones y, de esta manera, observar cómo la utilización del nuevo molino afecta el tamaño de la gota de la emulsión que se hará circular por la instalación.

## 2 Antecedentes de la investigación

El estudio de equipos asociados al corte por cizalla mecánica para generar emulsiones monodispersas con gotas pequeñas y del mismo tamaño se ha iniciado desde hace varios años. Muchos investigadores se han dedicado a hacer este tipo de estudio y han obtenido buenos resultados que han sido pioneros y que han permitido ser la base del trabajo que se va a realizar en este proyecto.

Mason y Bibette (1997), diseñaron un prototipo com-

puesto por un cilindro externo de rotación que envuelve a un cilindro interno fijo, dispuestos de manera concéntrica. La emulsión pre-mezclada, contenida inicialmente en una inyectora, era bombeada por la brecha delgada ubicada entre ambos cilindros, los cuales eran accionados por un motor. Los autores observaron como el tamaño de gota depende de la velocidad de corte y la composición del fluido.

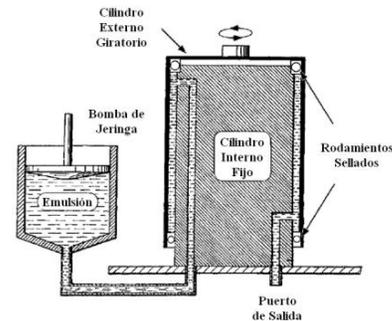


Fig.1. Diagrama esquemático de un mezclador de inyección de corte Couette. (Fuente: Mason y Bibette, 1997)

Luego siguiendo la misma línea de investigación, Mabile y otros (1999) modificaron un dispositivo conocido como Mezclador Couette para obtener emulsiones monodispersas. Este dispositivo consistía en dos cilindros concéntricos, uno fijo y otro rotatorio. La emulsión es inyectada por medio de un pistón a través de una boquilla con cambio de sección que ayudaba a cizallar el fluido antes de tener contacto directo con los cilindros. Con este estudio se descubrió las condiciones necesarias para la fragmentación de las gotas y la monodispersidad.

Por otro lado los estudiantes de la Universidad de Los Andes, Araujo y Nuñez (2006), realizaron un proyecto de grado en el cual fabricaron un prototipo compuesto por dos cilindros concéntricos que cizallan el fluido que se les introduce en el interior de ambos. El fluido era introducido por una bomba y el dispositivo era accionado por un motor. Ellos utilizaron como base el principio estudiado años anteriores por Mason y Bibette (1997).

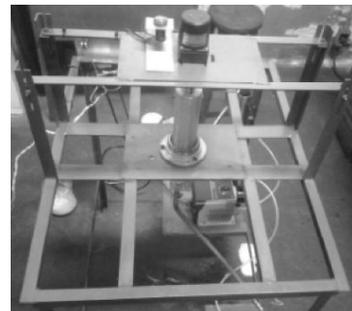


Fig.2. Dispositivo de cilindros concéntricos. (Fuente: Araujo y Nuñez, 2006)

Hassan, et. al (2008), desarrollaron un dispositivo de corte mecánico compuesto por tres hélices de diferentes diámetros contenidas dentro de un recipiente cilíndrico. Este es capaz de proporcionar un tamaño de gota promedio de aproximadamente 100 µm de diámetro.

Kaminsky (2009), desarrolló un método para la emulsión. El método consiste en utilizar un mezclador de tres cilindros macizos fijos ubicados en serie. Cada uno contiene internamente un cilindro giratorio hueco que produce el efecto de cizalla. Kaminsky concluyó que para obtener una emulsión de buena calidad se debe repetir el método de emulsión para mejorar la estabilidad de la misma.

### 3 Metodología

Para comenzar se realiza un estudio de requerimientos utilizando la técnica Quality Function Deployment (QFD), con el objetivo de recaudar los requerimientos necesarios para la planeación, el diseño y la fabricación del prototipo a desarrollar en el proyecto. Después se aplica el método de Análisis de Alternativas a una serie de opciones anteriormente estudiadas que cumplen con lo establecido en el proyecto. Estas alternativas se digitalizan usando programas CAD profesionales para obtener un diseño preliminar de las mismas. Al final se selecciona la alternativa más apta para desarrollarla en el proyecto y solucionar el problema anteriormente planteado.

#### 3.1 Estudio de requerimientos: Quality Function Deployment (QFD)

El Despliegue de la Función de Calidad o Quality Function Deployment (QFD) es un método de diseño de productos y servicios que recoge la voz del cliente y la traduce, en pasos sucesivos, a características de diseño y operación que satisfacen las demandas y expectativas del mercado. (Bernal, Dornberger y Suvelza, 2009).

La metodología del QFD se basa en el desarrollo de una serie de matrices llamadas "Casas de la Calidad". Estas matrices son llamadas de esta manera por la forma de techo que tiene la estructura en la parte superior. Estas matrices se encuentran divididas en diferentes secciones o habitaciones y cada una contiene valiosa información. (Bernal, Dornberger y Suvelza, 2009)

La Fig. 4 presenta un diagrama de Pareto con las importancias del "Qué" obtenidas en la matriz del QFD ordenadas de forma decreciente.

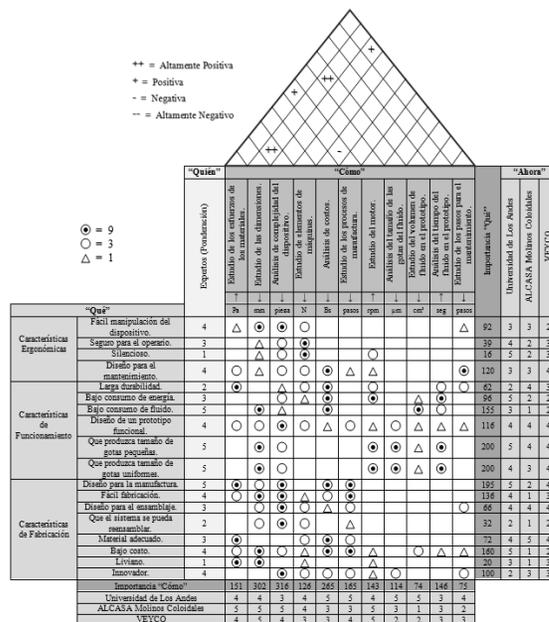


Fig. 3. QFD: La casa de la calidad

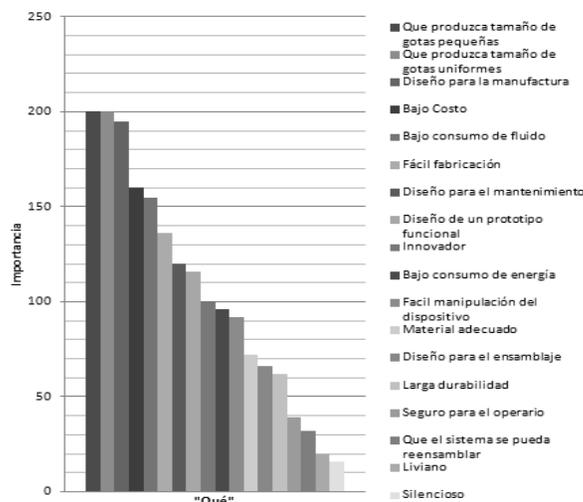


Fig. 4. Diagrama de Pareto de las Ponderaciones Obtenidas vs "Qué"

Observando el diagrama de la Fig. 4, se puede concluir que los requerimientos más importantes para el cliente que se deben tener en consideración a la hora de diseñar y fabricar son: que el prototipo produzca tamaños de gotas pequeñas y uniformes, que sea diseñado para la manufactura, que sea de bajo costo y de bajo consumo de fluido.

### 3.2 Método de análisis de alternativas

Se utiliza el método de análisis de alternativas para estudiar las diferentes opciones que se pueden presentar para resolver el problema anteriormente planteado. Este método consiste en la toma de decisiones sobre un conjunto de alternativas, estrategias y otros, utilizando diferentes métodos para su elección. Para realizar el análisis de alternativas en este proyecto se utilizará una evaluación multicriterios.

En este método se utiliza una matriz conocida como tabla de valoración en la que se encuentran representados los criterios ( $C_j$ ), las alternativas ( $A_i$ ), los pesos de los criterios ( $W_j$ ), las valoraciones de cada alternativa frente a cada criterio ( $a_{ij}$ ) y los resultados del análisis de alternativas.

#### 3.2.1 Estudio de alternativas

##### 3.2.1.1 Alternativa 1

Esta alternativa consiste en un prototipo compuesto por un cilindro externo de rotación que envuelve a otro cilindro interno fijo, dispuestos de manera concéntrica. Este posee unas boquillas de salida y entrada de fluido ubicadas en la parte inferior del mismo. El fluido es inyectado por una bomba y el cilindro de rotación externo es accionado por un motor. El cizallamiento mecánico en este prototipo ocurre por las diferencias de diámetro u holguras que existen entre un cilindro y otro, lo que permite obtener un tamaño de gota relativamente pequeño y uniforme. (Mason y Bibette, 1997 y Araujo y Nuñez, 2006).

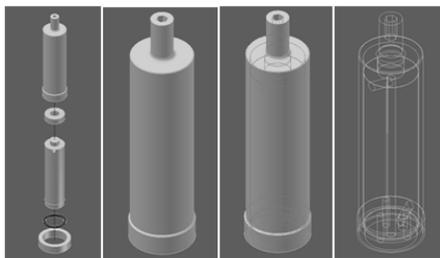


Fig. 5. Estructura de la Alternativa 1. (Fuente: Araujo y Nuñez, 2006)

##### 3.2.1.2 Alternativa 2

Este prototipo consiste en dos cilindros concéntricos, uno estator y otro rotor. El fluido entra por la parte inferior y es empujado por una especie de pistón a través de un cambio de sección que permite un pre-cizallamiento de la mezcla antes de tener contacto directo con los cilindros. La salida de la emulsión cizallada se encuentra en la parte superior del dispositivo. El cilindro rotor es accionado por un motor que se encuentra en la parte superior del mismo. Este dispositivo fue desarrollado por los científicos Mabilie y otros (1999). El prototipo determinó la monodispersidad del fluido.

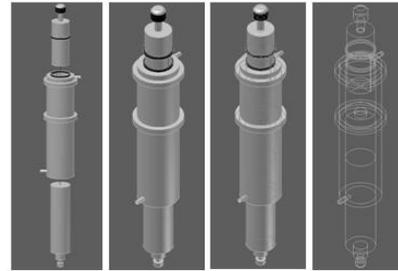


Fig. 6. Estructura de la Alternativa 2. (Fuente: Mabilie y otros, 1999)

##### 3.2.1.3 Alternativa 3

En esta alternativa se presenta un dispositivo mecánico compuesto por un reactor, un catalizador sólido y un equipo de alta cizalla, el cual consiste en tres hélices de diferentes diámetros colocados en serie dentro de un recipiente. El fluido es introducido por gravedad y las hélices conectadas por un eje son accionadas por un motor. Este dispositivo es también conocido como el ultra turrax y es capaz de proporcionar gotas de pequeño tamaño. (Hassan y otros, 2008).

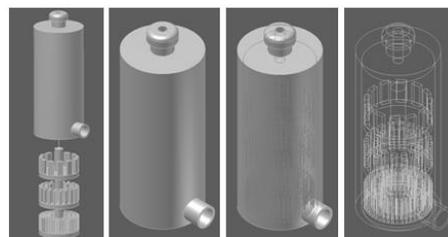


Fig. 7. Estructura de la Alternativa 3. (Fuente: Hassan y otros, 2008)

##### 3.2.1.4 Alternativa 4

Otra alternativa consiste en tres cilindros macizos de diferentes diámetros conectados en serie por medio de un eje, el cual es accionado por un motor. Cada cilindro macizo es cubierto por un cilindro hueco fijo, ambos ubicados de manera concéntrica. Los tres cilindros huecos son del mismo tamaño, lo que permiten que entre los cilindros huecos y los cilindros macizos existan diferentes holguras y por lo tanto diferentes resultados de cada uno. El principio de este dispositivo es hacer pasar el fluido por los tres juegos de cilindros de manera sucesiva para obtener un fluido cizallado con gotas muy pequeñas. (Kaminsky, 2009).

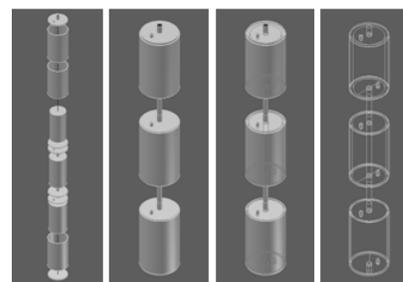


Fig. 8. Estructura de la Alternativa 4. (Fuente: Kaminsky, 2009)

### 3.2.1.5 Alternativa 5

Esta alternativa consiste en una especie de cono truncado conectado a un motor que lo hace girar. Este cono se encuentra dentro de un recipiente fijo que internamente tiene la forma del cono truncado y en la parte superior tiene forma de embudo por el cual se introduce el fluido. El fluido cizallado sale por la parte inferior del recipiente. Entre el recipiente fijo y el cono truncado rotatorio existe cierta holgura que permite un cizallamiento efectivo.

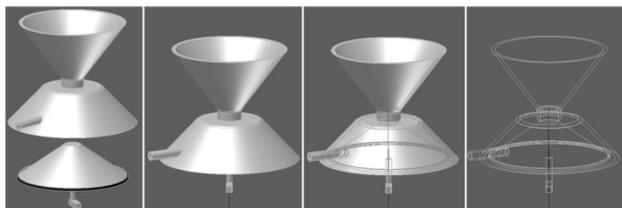


Fig. 9. Estructura de la Alternativa 5. (Fuente: McClements, 2005)

### 3.2.2 Selección de la alternativa

Aplicando el método se obtiene la siguiente matriz de valoración.

Alternativas $A_i$	Criterios $C_j$					Resultados	
	Que produzca tamaño de gotas pequeñas	Que produzca tamaño de gotas uniformes	Diseño para la manufactura	Bajos costos	Bajo consumo de fluido		Diseño para el mantenimiento
Alternativa 1	4	4	3	3	2	3	133
Alternativa 2	3	4	2	2	2	3	113
Alternativa 3	3	3	2	1	1	2	86
Alternativa 4	4	4	3	2	1	3	119
Alternativa 5	3	2	1	1	2	3	84
Pesos de los criterios $W_j$	9	9	5	6	8	4	

Fig. 10. Matriz de valoración completa del Método de Análisis de Alternativas.

Según el análisis de alternativas, el molino de fluido que se debe diseñar y fabricar para lograr emulsiones con tamaño de gotas pequeñas y uniformes, es la Alternativa 1. Esta alternativa puede ser rediseñada para que cumpla exitosamente con todos los criterios estudiados, teniendo en cuenta el principio de Mason y Bibette (1997) y el diseño inicial de los estudiantes Araujo y Núñez (2006).

## 4 Diseño del prototipo

En el proceso de diseño de la alternativa seleccionada se utiliza la técnica conocida como Diseño para Manufactura y Ensamblaje (DFM/A), para obtener las dimensiones finales del prototipo. La idea fundamental de esta técnica es lograr una compatibilidad entre el diseño del producto y el proceso de manufactura, con el fin de reducir los costos de fabricación del producto. En el caso del diseño para manufactura (DFM), la compatibilidad se logra al hacer una correspondencia entre las características del producto (geometría, tolerancias, materiales, volúmenes de producción) y el proceso de manufactura primario. Por otro lado, el diseño

para ensamblaje (DFA) de un producto se logra al hacer modificaciones en su geometría para facilitar la manipulación e inserción de los componentes del ensamble y reducir el número de partes del mismo. Estas técnicas fueron formalmente desarrolladas por los científicos Boothroyd y Dewhurst en el año 1987. (Riba, 2006)

En el diseño del prototipo se consideraron los requerimientos obtenidos anteriormente en la matriz del QFD con el objetivo de plantear un diseño que resuelva de manera efectiva el problema planteado. Para diseñar el prototipo se utilizará el programa CAD profesional, con la finalidad de digitalizar y obtener los planos con las dimensiones para su posterior fabricación. Se realiza un rediseño de los dispositivos anteriormente estudiados, teniendo en cuenta la reducción de aproximadamente la mitad de las dimensiones utilizadas por Araujo y Núñez (2006), para lograr un bajo consumo de fluido y un bajo costo en su fabricación. Con esto también se logra un diseño para la manufactura, en el cual las dimensiones de las piezas dependen de los materiales disponibles en el mercado. En cuanto al tamaño de las gotas, se observa que con el dispositivo seleccionado se logra, con gran eficiencia, una emulsión monodispersa con gotas de pequeño tamaño, por lo que en este caso se mantendrá la forma preliminar de las piezas con posibles pequeños cambios. Debido a lo anterior se toma la decisión de diseñar tres tipos de cilindros macizos con el fin de determinar el comportamiento de la emulsión con cada uno. También se decide diseñar dos tipos de cilindros huecos con acoples diferentes.

El primer diseño del acople del cilindro hueco es el mismo diseño utilizado por Araujo y Núñez (2006) con dimensiones diferentes. El segundo diseño del acople del cilindro hueco es un nuevo diseño compuesto por dos piezas. La primera pieza es el cilindro hueco con una tapa que tiene en su centro un agujero que sirve de conexión con el interior del cilindro y facilita el cambio de los cilindros macizos. La segunda pieza tiene el diseño del acople del motor y además sirve de tapa para la primera pieza.

En el proceso de dimensionamiento del prototipo consideró las dimensiones de los accesorios que van acoplados al mismo como por ejemplo los rodamientos, el motor, los tornillos, el estopero, la bomba y el material. Las Fig. 11 y 12 muestran las piezas diseñadas.

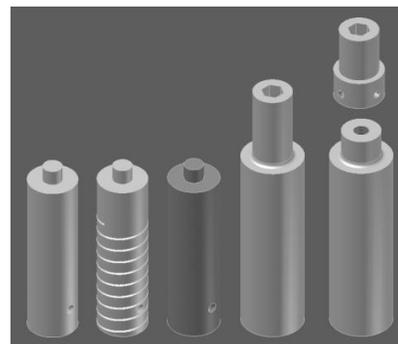


Fig. 11. Piezas diseñadas con ayuda de CAD

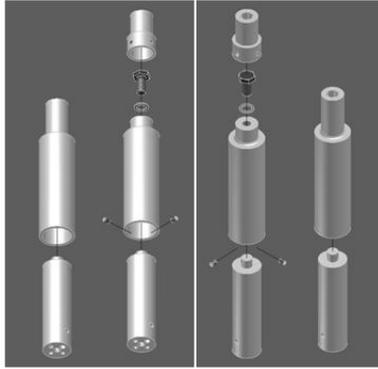


Fig. 12. Despiece de los prototipos diseñados

## 5 Fabricación e instalación del prototipo

Los procesos de manufactura son un conjunto de operaciones necesarias para transformar la materia prima en un producto final, que en este caso es el prototipo diseñado.

Los procesos de manufactura que se utilizaron para la construcción del prototipo fueron: el corte con sierra mecánica, el refrentado al torno, el cilindrado, el mandrinado, el taladrado, el roscado con un giramacho y el troquelado con prensa. Para la unión de las diferentes piezas se utilizó soldadura TIG. Para darle un buen acabado a las piezas finales se utilizan los procesos de rectificación, limado y lijado.

La Fig. 13 muestra las piezas fabricadas para la realización de este prototipo.

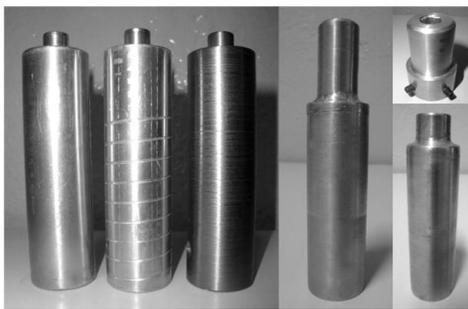


Fig. 13. Piezas fabricadas del prototipo.

Para la instalación del prototipo se utiliza el banco de pruebas empleado por los estudiantes Araujo y Nuñez (2006) en sus experimentos. El diseño original de este banco de pruebas es ergonómico y además permite su fácil modificación y adaptación para nuevos ensayos.

## 6 Análisis y resultados

Luego de haber instalado el prototipo se comienza con la fase de experimentación, en la que se hace pasar una pre-emulsión por el circuito de fluido para obtener las emulsiones.

La emulsión que se utiliza en los experimentos es del tipo W/O (agua en aceite). Esta emulsión presenta una relación de agua/kerosén igual a 40/60, y se mantiene constante la concentración total de surfactante siendo ésta de 1 % en peso (dodecil sulfato de sodio).

Las variables que se toman en cuenta en los experimentos son: el tiempo de permanencia del fluido en el circuito, el tipo de cilindro macizo y las rpm de la bomba. El tiempo de permanencia es de 3, 7 y 14 minutos. Se utilizan tres cilindros macizos de diferentes dimensiones, holguras y materiales. El primer cilindro macizo es liso, de aluminio y con un diámetro de 25,4 mm lo que permite una holgura de 0,55 mm con respecto al cilindro hueco. El segundo cilindro macizo posee un roscado a lo largo de su superficie exterior, es de aluminio y tiene un diámetro de 25,4 mm lo que permite una holgura de 0,55 mm con respecto al cilindro hueco. El tercer cilindro macizo es liso, de acero y con un diámetro de 26 mm lo que permite una holgura de 0,25 mm con respecto al cilindro hueco.

Los experimentos con el prototipo consisten en colocar una pre-emulsión en el tanque y hacerla pasar por el circuito de fluido un cierto tiempo de permanencia tomando en cuenta todas las variables anteriormente descritas. A medida que la emulsión recircula se van tomando las muestras de acuerdo al tiempo sin parar el circuito. Cada muestra al ser extraída es analizada inmediatamente un equipo de difracción de luz laser, para obtener la distribución de tamaño de gota. Lo que se quiere observar con estos experimentos es el comportamiento que tiene el fluido al ser cizallado por el prototipo. Es importante destacar que se mantienen constantes las revoluciones por minutos a la cuales gira el motor.

Antes de comenzar el experimento se mide la distribución del tamaño de gota de la pre-emulsión 40/60 con el equipo de difracción de luz laser, antes de ser cizallada por el prototipo, en la cual hay un tamaño promedio  $D(v; 0,5)$  igual a 103,78  $\mu\text{m}$  y un Span de 1,271, lo que significa que es bastante polidispersa.

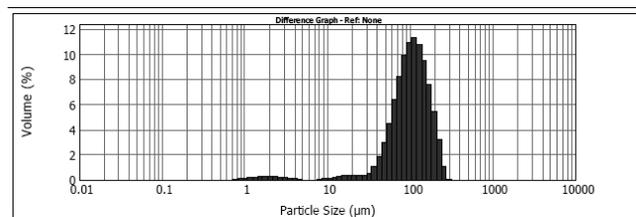


Fig. 14. Distribución del tamaño de gota de la Pre-emulsión 40/60

A continuación se observan tres tablas en donde se resumen los resultados de los experimentos realizados.

Tabla 1. Experimento 1

EXPERIMENTO #1: Primer cilindro macizo Holgura: 0,55 mm		Tiempo de permanencia (min)		
		3	7	14
Bomba	100 rpm	D(0,5):	D(0,5):	D(0,5):
		51,158 $\mu\text{m}$	37,935 $\mu\text{m}$	32,281 $\mu\text{m}$
		Span:	Span:	Span:
	75 rpm	1,380	1,367	1,544
		D(0,5):	D(0,5):	D(0,5):
		52,453 $\mu\text{m}$	41,989 $\mu\text{m}$	39,110 $\mu\text{m}$
	Span:	Span:	Span:	
	1,297	1,390	1,541	

Tabla 2. Experimento 2

EXPERIMENTO #2: Segundo cilindro macizo Holgura: 0,55 mm		Tiempo de permanencia (min)		
		3	7	14
Bomba	100 rpm	D(0,5):	D(0,5):	D(0,5):
		55,701 $\mu\text{m}$	41,526 $\mu\text{m}$	37,217 $\mu\text{m}$
		Span:	Span:	Span:
	75 rpm	1,214	1,374	1,656
		D(0,5):	D(0,5):	D(0,5):
		49,740 $\mu\text{m}$	44,255 $\mu\text{m}$	36,886 $\mu\text{m}$
	Span:	Span:	Span:	
	1,257	0,967	1,449	

Tabla 3. Experimento 3

EXPERIMENTO #3: Tercer cilindro macizo Holgura: 0,15 mm		Tiempo de permanencia (min)		
		3	7	14
Bomba	100 rpm	D(0,5):	D(0,5):	D(0,5):
		51,202 $\mu\text{m}$	38,744 $\mu\text{m}$	33,200 $\mu\text{m}$
		Span:	Span:	Span:
	75 rpm	1,294	1,213	1,021
		D(0,5):	D(0,5):	D(0,5):
		32,363 $\mu\text{m}$	31,355 $\mu\text{m}$	27,025 $\mu\text{m}$
	Span:	Span:	Span:	
	1,585	1,568	1,045	

Comparando los resultados obtenidos en las tablas 1, 2 y 3, se establece que los mejores resultados son los del experimento 3, en el cual se utiliza el cilindro macizo de acero, a 75 rpm y con un tiempo de permanencia de 3,7 y 14 minutos. El tamaño de gota  $D(v; 0,5)$  es disminuido de 103,78  $\mu\text{m}$  a 32,363  $\mu\text{m}$  cuando la emulsión lleva un tiempo de permanencia de 3 minutos dentro del prototipo. A medida que se incrementa el tiempo de permanencia se disminuye ligeramente el tamaño de gota de la emulsión hasta 27,025  $\mu\text{m}$  a los 14 minutos. Con estos resultados se observa que disminuye satisfactoriamente tanto el tamaño de gota como la polidispersión de la emulsión.

Si se mantiene el fluido durante un tiempos más pro-

longado circulando por el prototipo, se obtiene una emulsión monodispersa.

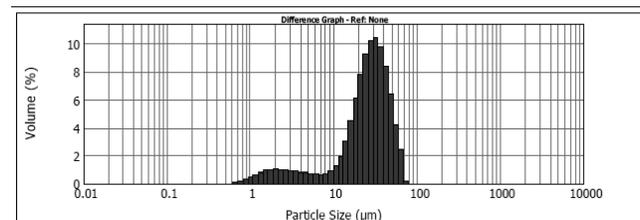


Fig. 15. Experimento 3: Distribución de la emulsión 40/60, con el tercer cilindro macizo a 14 min y 75 rpm.

## 7 Conclusiones

Luego de realizar los análisis y estudios correspondientes al diseño y fabricación de equipos aplicados al campo de las emulsiones, se fabricó un prototipo que resultó totalmente exitoso. Lo anterior fue logrado gracias a una investigación exhaustiva en este tema y a la correcta aplicación de los métodos de investigación.

Al observar el funcionamiento del prototipo se puede concluir que los requerimientos de diseño señalados han sido cumplidos satisfactoriamente, ya que se obtuvo un tamaño de gota mucho más pequeño que el de la pre-emulsión, con una disminución de la polidispersidad de la misma. Lo anterior se obtiene debido a que el nuevo prototipo es de pequeñas dimensiones, lo que permite un bajo consumo de fluidos y un bajo costo en su fabricación.

La forma como fue diseñado el prototipo permite que sea sencillo de limpiar, ensamblar y desensamblar, logrando con esto que la puesta en marcha del mismo en cada experimento se realice de manera rápida y eficaz.

En la construcción del prototipo se logró obtener una holgura entre los valores 0,25 mm y 0,50 mm considerados por Mason y Bibette (1997) como valores ideales para este tipo de dispositivo. Estas holguras permitieron que la emulsión fuera cizallada correctamente al pasar por el prototipo.

Se observó que con el cilindro macizo de acero de superficie lisa se obtienen mejores resultados que con los otros dos (primer cilindro macizo liso y el segundo cilindro macizo torneado, ambos en aluminio), ya que este cilindro macizo posee mayor diámetro lo que implica una menor holgura con respecto al cilindro hueco. Por otro lado se puede afirmar que el hecho de utilizar diferentes materiales (acero y aluminio) no afecta el buen desempeño del prototipo y por ende en los resultados de los experimentos.

Los resultados obtenidos en los experimentos indican que el tiempo de permanencia óptimo, del fluido en el equipo, es el de 14 minutos, pues en ese tiempo se consiguieron disminuir los tamaño de gota. Los tamaño de gota finales encontrados variaron entre 27,025 y 39,110  $\mu\text{m}$  de diámetro.

## Agradecimientos

Este proyecto de investigación, desea agradecerle al CDCHTA de la ULA por su cofinanciamiento con los proyectos I-1285-11-02-F e I-933-0-602-A

## Referencias

Alting L, 1990, Procesos para Ingeniería de Manufactura, 3era edición, México, Editorial Alfaomega.

Araujo D. y Nuñez A, 2006, Diseño y Construcción de un Equipo Cilíndrico para Mezclar Emulsiones, Proyecto de grado, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.

Bernal L, Dornberger, U. y Suvelza J, 2009, Quality Function Deployment (QFD) Para Servicios, Manual, Innaways GmbH. Alemania. Extraído desde: [http://www.in4in.net/fileadmin/user\\_upload/Downloads/Guia\\_QFD\\_Servicios.pdf/](http://www.in4in.net/fileadmin/user_upload/Downloads/Guia_QFD_Servicios.pdf/).

Calderon F; Schmitt V. y Bibette J, 2007, Emulsion Science, Basic Principles, 2da edición, Francia, Editorial Springer.

Groover M, 1997, Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, Procesos y Sistemas, 1era edición, México, Editorial Pearson Prentice Hall.

Hassan A. y otros, 2008, High Shear Process for Cyclohexane Production. HRD Corporation, United States Patent, Texas, Estados Unidos. Extraído desde: <http://www.google.co.ve/patents/>.

Kalpakjian S. y Schmid S, 2002, Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 4ta edición, México, Editorial Prentice Hall.

Kaminsky R, 2009, Enhancing Emulsion Stability. ExxonMobil Upstream Research Company, Texas, Estados Unidos. Extraído desde: <http://www.google.co.ve/patents/>.

Mabille C. y otros, 1999, Rheological and Shearing Conditions for the Preparation of Monodisperse Emulsions, Centre de Recherche Paul Pascal, Francia. Extraído desde: <http://www.mendeley.com/research/>.

Mason T. G. y Bibette J, 1997, Shear Rupturing of Droplets in Complex Fluids, Johns Hopkins University, Department of Chemical, Baltimore, Estados Unidos. Extraído desde: <http://www.mendeley.com/research/>.

McClements D, 2005, Food Emulsion: Principles, Practices, and Techniques, 2da edición, Boca Ratón, Editorial CRC Press.

Mudeme S, 2009, Drop Formation and Rupture in Shearing During Processing of Highly Concentrated Emulsion, Cape Peninsula University of Technology, CPUT Theses & Dissertations, Ciudad del Cabo, Sudáfrica.

Paruta E, 2008, Emulsiones Geles. Influencia de la formulación y fracción de fase dispersada sobre sus propiedades reológicas y estabilidad, Tesis de grado, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.

Ramírez J. y Camacho, M, 2011, Selección de Bombas de Pequeño Caudal y Alta Eficiencia para Inyección de Emulsiones, Proyecto de grado, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.

Riba C, 2006, Metodologías de Ingeniería Concurrente, Universidad Politécnica de Catalunya, España. Extraído desde: <http://upcommons.upc.edu/e-prints/>.

Salager J, 1992, Propiedades y Formulación de una Emulsión, Cuaderno FIRP 231, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.

Salager J, 1993, Emulsión, Cuaderno FIRP 232, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.

Salager J, 1993, Tamaño de Gotas de una Emulsión, Cuaderno FIRP 235, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.

Sarache L, 2004, Conformado de Materiales Sin Arranque de Viruta, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela.

Taylor G. I, 1934, The Formation of Emulsions in Definable Fields of Flow. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences, Londres. Extraído desde: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/>.

Ullman D, 2010, The Mechanical Design Process. 4ta edición, Nueva York, Estados Unidos, Editorial McGraw Hill, Higher Education.

**Recibido:** 30 de septiembre de 2011

**Revisado:** 10 de Julio de 2012

**Guedez, Victor:** *Profesor (ULA). Jefe del Laboratorio de Tecnología Mecánica. Jefe del grupo de investigación GRUTEC (Grupo de Tecnología).*

**Concho Ríos, Ileana Isabel:** *Ingeniero Mecánico (ULA Correo electrónico: ilecori82@gmail.com).*

**Rodríguez Fernández, Fernando Ismael:** *Ingeniero Mecánico (ULA). Correo electrónico: ferrod567@gmail.com.*

