



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS EN UN MODELO FÍSICO
DE ATOMIZACIÓN POR CENTRIFUGADO A PARTIR DE
ANÁLISIS DE IMÁGENES**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA:

DIANA ESQUIVEL HERNÁNDEZ

ASESOR DE TESIS

M en C. JUAN CARLOS CONTRERAS GUZMÁN

CIUDAD DE MÉXICO, 2019





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.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE:	Profesora: Balbina Ojeda Ramírez
VOCAL:	Profesor: Gerardo Sanjuan Sanjuan
SECRETARIO:	Profesor: Juan Carlos Contreras Guzmán
1er SUPLENTE:	Profesor: Benjamín Beltrán Fragoso
2do SUPLENTE:	Profesor: José Bernardo Hernández Morales

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

LAB, 005, EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

M. en C Juan Carlos Contreras Guzmán

SUPERVISOR TÉCNICO

Dr. José Bernardo Hernández Morales

SUSTENTANTE:

Diana Esquivel Hernández

Índice

1	Resumen.....	1
2	Antecedentes	2
2.1	Pulvimetalurgia	2
2.1.1	Producción de Polvos	4
2.2	Ingeniería de proceso.....	7
2.3	Modelado físico.....	9
2.4	Análisis Dimensional.....	10
2.5	Grupos adimensionales relevantes en la mecánica de fluidos.	12
2.6	Análisis de imágenes por computadora	15
3	Hipótesis.....	17
4	Objetivos	18
5	Metodología de trabajo	19
6	Resultados y discusión	22
7	Conclusiones.....	39
8	Referencias bibliográficas	40
	ANEXO 1	42
	ANEXO 2	46
	ANEXO 3	47

1 Resumen

La atomización por centrifugado es un proceso que consiste en el uso de un disco giratorio colocado horizontalmente, sobre el cual incide verticalmente una columna de metal líquido fundido para formar una capa sobre él. En función de la velocidad de rotación, se generará una película que se desintegrará en el borde formando pequeñas gotas, las cuales al solidificar forman el polvo metálico.

El espesor de la película del fluido depende de la velocidad del metal vaciado (que depende del uso de dispositivos mecánicos o del efecto de la gravedad para hacer fluir el metal), la velocidad de rotación (que es proporcional a la potencia del motor a usar), el radio, el ángulo de inclinación y la calidad de la superficie del disco, así como de propiedades del metal fundido tales como densidad, viscosidad y tensión superficial.[1]

Algunos autores han buscado describir tres etapas de la atomización: la formación de la película, la formación de los ligamentos y finalmente la atomización. Otros aportan conocimiento acerca de la densidad de partículas formadas, por medio de modelos estocásticos. Sin embargo, aún no se han realizado modelos físicos que describan, a través de números adimensionales, el comportamiento del sistema respecto a las partículas obtenidas.

Este trabajo busca determinar el tamaño de partícula y su distribución como función de la altura de vaciado de un fluido de trabajo colorido (que representa al metal fundido) y del diámetro de disco giratorio, con la finalidad de desarrollar una herramienta de modelado físico basada en el análisis de imágenes en un modelo físico del atomizador centrífugo.

2 Antecedentes

2.1 Pulvimetalurgia

La pulvimetalurgia comprende la producción de metales en forma de polvo y manufactura de productos terminados. Ha sido usada por más de 60 años para la fabricación de componentes tales como bujes auto lubricados, engranajes, piezas de máquinas y herramientas de corte, entre otros. Una de las ventajas que presenta, con respecto a otros métodos de fabricación, es el uso del material de forma más eficiente, sin altas pérdidas por los procesos de manufactura comunes, además de control adecuado de la microestructura. Otras ventajas son el menor costo de producción, menor consumo de energía y mayor aprovechamiento de materias primas.

Los métodos por los que pueden producirse metales en forma de polvo son diversos: de forma mecánica a través de la molienda del metal sólido; la atomización de un metal fundido; a través de procesamiento químico como la precipitación de una sal, la descomposición térmica de un compuesto químico en estado sólido (usualmente óxido) o, finalmente, por medios electroquímicos a través de la electrodeposición [2].

Los polvos metálicos comprenden tamaños de entre 0.1 y 1000 micrómetros, pueden ser de forma esférica (usadas en filtros porosos), escamada (empleadas en pigmentos para pinturas), irregular (utilizadas en el conformado de piezas por PM), dendrítica o fibrosa. La morfología del polvo metálico se caracteriza por la dimensión y superficie de la partícula; una caracterización completa se muestra en la Figura 2.1.

El proceso de pulvimetalurgia involucra varias etapas, desde el método de fabricación, explicado en la sección 2.1.1, hasta el producto terminado. A continuación, se describen los procesos posteriores a la obtención de polvos [3]:

- a) Mezclado. Para que el producto terminado tenga uniformidad, es necesario controlar la distribución de tamaño de partícula y su mezclado con algunos otros agentes químicos que reduzcan la fricción o eviten la contaminación de los polvos a utilizar.

Durante el mezclado se adiciona el polvo de aleación, lubricante y agentes de volatilización para dar una porosidad deseada. El tiempo de residencia puede ir desde unos minutos hasta días dependiendo del producto deseado. Sin embargo, se debe tener cuidado con el sobre-mezclado ya que puede disminuir el tamaño de partícula y producir zonas endurecidas.



Figura 2.1 Morfología de partícula y proceso de producción. [2]

- b) Depósito y compresión del polvo. El polvo es colocado en un molde que prácticamente tiene la forma final de la pieza y donde se aplicará presión para formar una pieza compacta, con alta cohesión entre las partículas. Usualmente se trabaja en una atmósfera protectora para evitar que pudiera existir autoignición o reacciones químicas indeseables (de manera común, oxidación). Dicha etapa de compresión involucra la unión de las partículas individuales entre sí por el efecto de la difusión atómica de los componentes químicos, confiriendo al material una tenacidad y resistencia mecánica por debajo de las propiedades finales pero que permiten su manipulación sin producir desmoronamiento.
- c) Sinterizado. Es un proceso de unión y consolidación entre las partículas sólidas por la formación de enlaces metálicos. Se logra a una temperatura inferior a la de fusión del constituyente con menor punto de fusión. Todas las obstrucciones al sinterizado (como el contacto superficial incompleto, la presencia de películas superficiales y la falta de plasticidad) impedirán la correcta unión, generando discontinuidades que son indeseables en el proceso. El proceso de sinterizado empieza con el enlace entre

las partículas a medida que se eleva la temperatura del material. El enlace incluye la difusión de átomos donde hay contacto cercano entre partículas adyacentes que dan lugar al desarrollo de fronteras y crecimiento de grano. Esta etapa origina un incremento en resistencia y dureza, así como una relevación de esfuerzos. Durante la siguiente etapa, las áreas de enlace recientemente formadas, llamadas cuellos, crecen en tamaño, seguidas por un redondeo de los poros. La última etapa es el encogimiento y la eventual eliminación del poro. Esta etapa rara vez se completa, ya que las temperaturas y los tiempos necesarios son demasiado imprecisos siendo este un tema de estudio.

- d) Tratamientos térmicos. Dependiendo de la aplicación, la pieza sinterizada puede tratarse térmicamente para obtener ciertas propiedades deseables. El tratamiento térmico puede ser de liberación de esfuerzos o de recocido. Las aleaciones no ferrosas de ciertas composiciones pueden endurecerse por envejecido, en tanto que los aceros pueden endurecerse por temple o superficialmente por carburación, cianuración o nitruración.

Se pueden llevar a cabo diversas operaciones para completar la manufactura de las piezas fabricadas con polvo metálico. Estas operaciones incluyen maquinado, cizallamiento, escariado, pulido, rectificación, eliminación de rebabas, esmerilado y limpieza por chorro de arena (*sandblasting*). De igual manera, se tiene operaciones superficiales como los revestimientos protectores que pueden aplicarse por electro depósito, metalizado y otros métodos. [4].

2.1.1 Producción de polvos

La producción de polvos puede realizarse mediante tres métodos: químicos, electroquímicos y mecánicos. Para este trabajo, los métodos mecánicos son los de interés para este trabajo.

Métodos Mecánicos

Para la obtención de polvos metálicos por medios mecánicos se puede trabajar en estado sólido o en estado líquido (fundido) a este último se le conoce como atomización

Desintegración mecánica o pulverización

Los polvos son producidos mediante la aplicación de fuerzas mecánicas sobre el metal. El método más común para la fabricación en estado sólido es la trituración, ampliamente usado para trabajar materiales quebradizos. La trituración mecánica (pulverización) comprende la reducción del tamaño del material a través de un molino de bolas, o esmerilado de metales frágiles o menos dúctiles en pequeñas partículas. En el caso de los materiales frágiles, las partículas de polvo producidas tienen formas angulares; si los metales son dúctiles tienen forma de hojuelas por lo que no son particularmente adecuadas para aplicaciones de metalurgia de polvos (MP) [5].

Atomización por fusión

Es el método de producción más utilizado. Consta de tres etapas: fusión, atomización (desintegración de la masa fundida en gotas) y solidificación. La atomización a su vez puede clasificarse en 4 tipos: gaseosa, líquida, líquida y gaseosa y, por último, pero no menos importante, centrífuga. Es característica importante de estos métodos que el metal se encuentra fundido y que, por medio de algún mecanismo de dispersión, se rompa el flujo de metal en partículas que son colectadas y separadas para los procesos de fabricación.

La atomización gaseosa consiste en la desintegración de un chorro de metal líquido en gotas provocada por la interacción de un flujo de gas inerte (Ar, N₂, He) y así obtener polvo de alta pureza [6]. Estos gases también actúan como medio refrigerante, por lo que se obtienen rapidez de enfriamiento de 10² a 10⁵ K/s. El flujo de gas puede ser continuo o pulsado. Los diámetros obtenidos están entre 1 y 200 micrómetros y de forma esférica.

En la atomización líquida el medio de atomización y refrigerante es el agua. Es decir, el jet de agua va a velocidades de 70 y hasta 140 m/s, provocando enfriamientos rápidos del orden de 10⁴ a 10⁵ K/s [6]. El polvo obtenido tiene formas irregulares, contienen alto grado de contaminación (debido muchas veces a la oxidación), pero su costo es menor a la atomización con gas.

La atomización gaseosa y líquida usa jets de alta presión de gas argón y agua (líquida) dirigidos sobre la corriente de metal fundido [6]. El gas lleva a cabo la atomización primaria, para que el líquido la complete. Las gotas de entre 10 a 15 micrómetros son enfriadas por el gas y las de mayor tamaño por el líquido. Presenta rapidez de enfriamiento de hasta 10^6 K/s.

En la atomización centrífuga se tiene el impacto de un chorro de metal fundido sobre la superficie de un disco girando a alta velocidad [7]. El metal en estado líquido se distribuye radialmente en el disco, expandiéndose hasta llegar al borde produciendo un filamento que se fragmenta en partículas y que en el trayecto de caída termina de solidificar. En ocasiones se utiliza una corriente de aire o de agua atomizada para aumentar los gradientes de enfriamiento y tener una rápida solidificación. Las partículas son esféricas y de tamaño decreciente al aumentar la velocidad del disco.[8]. Permite alcanzar rapidez de solidificación de 10^4 a 10^6 K/s, por lo que esta técnica es la de solidificación más rápida.

Gran parte de la producción por esta técnica es para componentes de naves aeroespaciales, por lo que el polvo es manipulado y procesado bajo vacío o gas inerte. En la Figura 2 se muestra un esquema general de los componentes básicos que se requieren para la atomización centrífuga.

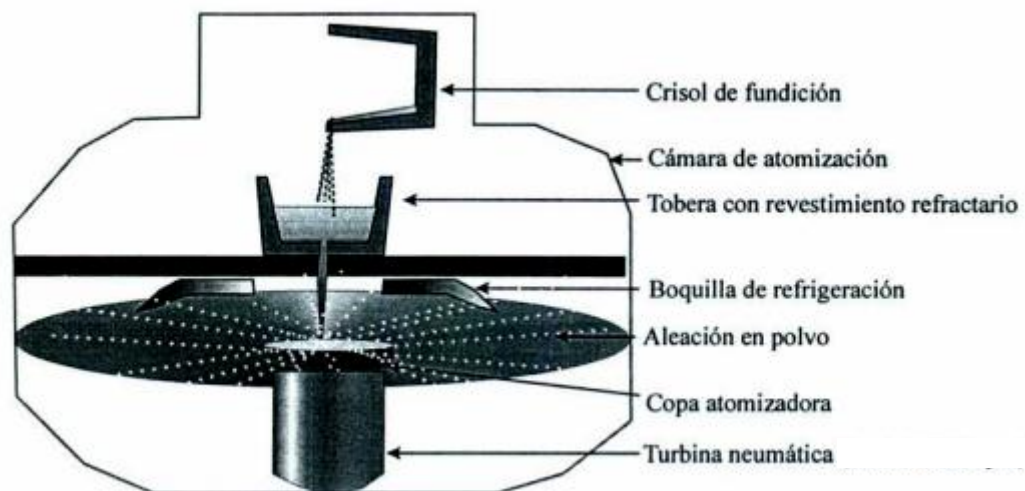


Figura 2.2. Esquema de atomizador centrífugo [6].

Este método de obtención de polvos aun no es ampliamente estudiado por las múltiples variables que se tienen y por la aparente necesidad de tener rapidez de giro muy altas. Para

conocer los alcances que puede tener este método se propone un estudio por medio de la modelación física. De acuerdo con Sungkhphaitoon *et al.* [9], entre los parámetros que se debe considerar en el diseño se encuentran: rapidez de rotación, tipo de motor, potencia del motor, radio del disco, ángulo de inclinación, forma del disco/copa, sistema de enfriamiento, flujo de vaciado, así como propiedades físicas del fluido de trabajo (densidad, viscosidad, tensión superficial, temperatura de fusión/solidificación).

2.2 Ingeniería de procesos

La ingeniería de procesos es la relación entre el comportamiento del fenómeno físico que ocurre en el proceso (procesamiento) y la calidad del producto (propiedades, composición y microestructura), buscando la mayor eficiencia energética, los menores costos y cumpliendo con las normativas legales, sociales y ambientales en función de parámetros que se puedan medir y controlar.

La ingeniería de procesos metalúrgicos [10] agrupa conocimientos, técnicas y estrategias de distintos campos y disciplinas para describir y predecir el comportamiento de un sistema durante el procesamiento de las materias primas empleando análisis de fenómenos de transporte, metalurgia física y otras áreas.

Entre sus principales herramientas se encuentran [10]:

- Mediciones en planta. Son aquellas que se pueden llevar a cabo dentro de un proceso que ya está en operación con parámetros establecidos. Estas mediciones suelen ser empleadas por las empresas para conocer el comportamiento del proceso y poder verificar que trabaje en un rango de operación aceptable, en caso contrario, realizar las modificaciones necesarias.
- Mediciones en laboratorio. Permiten conocer en qué condiciones generales se puede o no operar el sistema. La experimentación suele ser una buena opción dado el estricto control de operación con que se puede contar en el laboratorio, brindando información relevante del sistema. Es necesario indicar que los experimentos puedan variar en

costos por los reactivos necesarios, así como los equipos de medición. Esta herramienta se apoya en gran medida del diseño experimental.

- Plantas piloto. Surgen de la necesidad de información sobre el comportamiento de un proceso a escala, manteniendo condiciones de operación establecidas y que asemejen las condiciones utilizadas en el prototipo. Dichas plantas requieren una gran inversión económica, conocimiento de escalabilidad para poder realizar la planta, así como de mediciones que den información de los fenómenos principales. Por medio de la planta piloto se espera obtener la información suficiente para evaluar el impacto en los costos del proyecto, inversión, depreciación, gastos de operación, servicios, así como garantizar resultados de la instalación industrial y encontrar parámetros críticos de operación.
- Modelado matemático. Son aquellos que describen los fenómenos físicos que ocurren en un proceso por medio de expresiones matemáticas (algebraicas, diferenciales o estadísticas) que incluyan los parámetros (variables independientes, controlables y medibles) de los cuales dependen las características que se están estudiando (variables dependientes). Los modelos matemáticos pueden resolverse por medio de técnicas numéricas programables y calculadas con apoyo de una computadora. Esto reduce costos de análisis, así como poder realizar una amplia gama de variación de parámetros obteniendo resultados relativamente más rápidos en comparación con los obtenidos por medio de la experimentación.
- Modelado físico. Representan el comportamiento general de un prototipo (sistema a estudiar) empleando materiales que tengan un bajo costo y que cumplan ciertas condiciones (criterios de similitud descritos por números adimensionales) que se asemejen a las que tiene el prototipo. Esta es una ventaja dado que se busca que los materiales empleados permitan visualizar, medir y entender el comportamiento del sistema, cosa que, en ocasiones, el prototipo no permite (por tener paredes opacas, trabajar a temperaturas altas, etc.)

Cualquiera de las herramientas que se tienen busca describir el comportamiento de un sistema, así como su respuesta ante la variación de algún parámetro (o combinación de ellos). Cada una de ellas tiene ventajas y desventajas, pero siempre se seleccionará la mejor

herramienta acotada ante las condiciones, materiales e instrumentos de medición con los que se cuente. El ingeniero tendrá la capacidad de seleccionar cualquiera de las herramientas, por lo que es necesario desarrollar las habilidades suficientes para emplear cualquiera de ellas.

En caso de seleccionar la modelación física, la calidad que se tenga en el modelo empleado depende de factores como [11]:

- a) La exactitud de los datos medibles, así como la incertidumbre que tengan
- b) Tipo de fenómeno físico que se desea estudiar y su impacto sobre el sistema
- c) Consideración de criterios de similitud por medio de números adimensionales
- d) Simplificaciones entre los fenómenos presentes
- e) Forma de definir el uso de los valores presentes en los números adimensionales
- f) Evolución del conocimiento durante el estudio del proceso, ya que la experiencia muestra que es posible o no mantener ciertas condiciones y modificar otra a fin de tener un mejor entendimiento del proceso.

2.3 Modelado físico

El modelado físico es la representación de un sistema, utilizando materiales distintos al del prototipo, así como la selección de equipo que permita realizar mediciones o visualización de los fenómenos de interés [10]. Con el modelado físico se busca observar, medir y reducir los costos de experimentación para poder entender y obtener ecuaciones empíricas que permitan predecir el comportamiento del prototipo.

Se inicia definiendo los parámetros de los cuales depende el fenómeno de interés. Posteriormente se pasa al diseño de experimentos considerando los parámetros de operación y las respuestas buscadas. El modelado se apoya de la observación y medición de los fenómenos que ocurren en el prototipo. Los modelos construidos apropiadamente, suelen dar resultados de la funcionalidad, estabilidad y economía, dentro de un rango aceptable, como resultado de un trabajo amplio de investigación experimental sobre todas las variables que participan. Por otro lado, la cuantificación de los fenómenos que ocurren en el prototipo se analizan dependiendo del escalamiento por medio de criterios de similitud con respecto del

prototipo y de la amplitud de estudio que se busque realizar. En general, estos criterios de similitud se clasifican en: geométricos, mecánicos (cinemáticos, estáticos y dinámicos), térmicos y másicos [12]. Mientras más campos de interés se empleen más similares serán el modelo y el prototipo. La validación de los modelos físicos, es decir, asignar parámetros que no se hayan experimentado y corroborar con la predicción realizada que entran en la descripción predicha, también es una de las características más importantes en el desarrollo de un modelo físico.

La secuencia del desarrollo de un modelo físico consta de cinco etapas que a continuación se describen [10]:

- 1) Definir los fenómenos físicos de interés en el prototipo y ver si es posible describirlos por medio de números adimensionales, que servirá para definir las características del modelo físico y brindar rangos de operación.
- 2) Comparar y analizar la información existente para determinar cuáles son los límites operativos que deben considerarse o incluso en que valores hace falta información para complementar.
- 3) Plantear los objetivos e hipótesis adecuadamente de acuerdo con la información que todavía no existe.
- 4) Realizar la experimentación y registrar la información para así determinar el efecto de los parámetros seleccionados ante la respuesta buscada.
- 5) Interpretar los resultados permitirá realizar las conclusiones prudentes.

2.4 Análisis dimensional

El análisis dimensional es una herramienta que ofrece un método para reducir problemas físicos complejos disminuyendo los factores de los que depende el sistema y dando regiones en las que existen diferentes tipos de comportamiento. Permite tener una visión general del problema con respecto a las variables (adimensionales) relevantes involucradas [13]. Es así como surgen los números adimensionales, que llevan a la reducción de las variables involucradas en un fenómeno y dan pie a experimentos a escala (modelos) que cumplan con esas condiciones. Se definen a los números adimensionales como relaciones entre cantidades

físicas que sí tienen dimensiones y describen algún fenómeno que al combinarse por medio de multiplicaciones eliminan las dimensiones, dejando al número sin dimensiones físicas. Estos números pueden obtenerse a partir de la adimensionalización de las ecuaciones gobernantes o bien por el teorema de Pi Buckingham, que establece que dada una relación física expresable mediante una ecuación en la que están involucradas n magnitudes físicas o variables, y si dichas variables se expresan en términos de k dimensiones físicas independientes, entonces la ecuación original (o el sistema) puede escribirse de forma equivalente dada una serie de $n - k$ números adimensionales construidos con las variables originales.

Un concepto de suma importancia en el análisis dimensional es el de similitud o semejanza, que es la equivalencia entre los fenómenos presentes en dos sistemas diferentes [14]: el modelo y el prototipo, es decir, son las condiciones que se deben cumplir para que los fenómenos sean descritos de la misma manera entre el prototipo y el modelo. Si el fenómeno de interés está relacionado con la dinámica de fluidos, los principales criterios de similitud que se busca sean cumplidos son:

- *Similitud geométrica*. El modelo debe ser la versión a escala del prototipo cumpliendo con relaciones entre las longitudes características presentes.
- *Similitud cinemática*. Las líneas de corriente son iguales y la razón entre los módulos de velocidad entre prototipo y modelo debe ser constantes en todo el campo. [15]
- *Similitud dinámica*. Se cumple si los diversos tipos de fuerzas presentes en los flujos son similares y la razón entre sus módulos es constante para cualquier punto dentro del sistema.

En la mecánica de fluidos se han identificado muchos grupos adimensionales importantes; comprender su significado físico da una visión de los distintos fenómenos que los comprenden. Entre las variables que aparecen en los fenómenos están; presión, velocidad del flujo, viscosidad, densidad, tensión superficial del fluido, gravedad, velocidad de propagación del sonido y las fuerzas que influyen en un flujo como las debidas a la inercia, la viscosidad, presión y tensión superficial, entre otras.

2.5 Grupos adimensionales relevantes en la mecánica de fluidos

Las bases del estudio del movimiento de fluidos fueron desarrolladas durante los siglos XVI al XIX resultado del trabajo experimental de científicos como Reynolds, Galileo y Bernoulli, entre muchos otros. Sin embargo, al ser un fenómeno que engloba muchas implicaciones físicas (conservación de masa, de energía y de momentum) suele buscarse que su descripción sea sencilla para su comprensión. Por ello, el uso de números adimensionales reduce la cantidad de términos presentes y ayuda a generalizar los comportamientos.

La mayoría de los números adimensionales que aseguran la similitud geométrica están compuestos de cocientes entre las longitudes características que describen el modelo [16]. Un ejemplo puede ser la relación que tendría un cilindro entre su diámetro y la altura.

$$\text{Relación de longitudes} = \frac{H}{D}$$

Número de Reynolds

Es un número adimensional utilizado en la mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido, el cual puede ser en régimen laminar o turbulento, la diferencia yace en el comportamiento de las partículas del fluido, que depende del balance de fuerzas de inercia y viscosas [17]:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho V^2 L^2}{\mu V L} = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Donde

ρ = densidad del fluido [Kg/m³]

V = velocidad característica del fluido [m/s]

D = longitud característica del sistema [m]

μ = viscosidad dinámica [N s/m²]

El régimen laminar ocurre cuando las partículas del líquido se mueven a lo largo de trayectorias uniformes, en capas o láminas, con mismo sentido, dirección y magnitud. Suele darse a pequeñas velocidades, en tubos con pequeños diámetros y fluidos muy viscosos, pues

en estas condiciones las fuerzas viscosas predominan sobre las de inercia. En cuanto al régimen turbulento es donde las partículas se mueven sin seguir trayectorias constantes ni definidas, es decir, desordenadas, con formación de torbellinos cuando aumenta la velocidad del flujo.

Es de uso común criterios que marcan las condiciones límite entre flujo laminar y turbulento. Cabe aclarar que tener un $Re \leq 1$ indicaría que no existe movimiento perceptible, ya que las fuerzas viscosas son superiores a las fuerzas de inercia lo que indicaría que el flujo tardará mucho tiempo en provocar un movimiento medible. Reynolds comprobó que, en tuberías, el flujo laminar pasa a ser turbulento con valores mayores a 2300; lo cierto es que para valores entre 2000 y 4000 la situación es imprecisa y se considera que existe una zona de transición de flujo. Entonces un $Re < 2000$ se considera régimen laminar, $2000 < Re < 4000$ se trata de una zona crítica o de transición y $Re > 4000$ es régimen turbulento. La importancia radica en poder determinar la velocidad promedio que caracteriza el régimen de una corriente de fluido.

Número de Weber

Es una medida de la importancia de la inercia del fluido comparada con su tensión superficial; es útil para analizar flujos multifásicos, superficies curvadas, flujos de capas finas, en formación de gotas y burbujas.

$$We = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas de tensión superficial}} = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$$

Donde

ρ = densidad del fluido [Kg/m^3]

V = velocidad del fluido [m/s]

L = longitud característica (usualmente diámetro de la gota) [m]

σ = tensión superficial [N/m]

Es un parámetro importante en la atomización de un líquido, ya que da la razón entre las fuerzas aerodinámicas que ejerce el gas sobre una película delgada y las fuerzas de tensión que actúan en la superficie del líquido. La tensión superficial en la gota es lo que mantiene

su forma, si la gota es pequeña y se somete a un chorro de aire donde existe una velocidad relativa entre el gas y la gota, las fuerzas de inercia harán que la gota se deforme.

Entonces, si el número de Weber es $\gg 1$, esas fuerzas inerciales superan a las fuerzas de tensión superficial, provocando que la gota se fragmente en otras más pequeñas o con mayor facilidad. Es decir, la película líquida se separa en gotas de tamaño fino, menores al orden del grosor de la película. Si por el contrario el número de Weber es $\ll 1$, quiere decir que la tensión superficial mantiene unida a la capa líquida provocando la formación de gotas de mayor tamaño. Por lo tanto, el criterio del número de Weber puede ser útil al pronosticar el tamaño esperado de la gota en la atomización de un líquido [18].

Número de Bond

Corresponde al cociente entre las fuerzas debidas a la fuerza de gravedad y las debidas a la tensión superficial. Un valor alto significa que la fuerza de gravedad es el fenómeno dominante, mientras que uno bajo (más pequeño que la unidad) indica que la tensión superficial domina.

$$Bo = \frac{\text{Fuerza gravitacional}}{\text{Fuerzas de tensión superficial}} = \frac{\rho g L^2}{\sigma}$$

Donde

ρ = densidad del fluido [Kg/m³]

g = gravedad [m/s²]

L = longitud característica (usualmente diámetro de la gota) [m]

σ = tensión superficial [N/m]

Por un lado, la fuerza gravitacional, que se traduce en el peso de la gota tiende a alargar la gota verticalmente; por otro lado, la tensión superficial tiende a minimizar la interfaz haciéndola esférica. A partir de un análisis de imagen, se puede determinar el volumen y, conociendo la densidad del líquido, el peso de la gota. Es una medida de cuanto se deforma un fluido por los gradientes de presión, densidad, así como determinar si este fluido puede

sostener esta diferencia de presión por medio de su tensión superficial, es decir la resistencia de la superficie cohesiva [19].

2.6 Análisis de imágenes por computadora

El análisis de imágenes ha sido una herramienta ampliamente usada en diversos sectores, desde el reconocimiento facial hasta el uso en análisis metalográfico para determinar porcentaje de fases presentes en una microestructura. Este análisis consiste en la extracción de información significativa contenida en imágenes digitales mediante técnicas de procesamiento de las mismas [20].

La luz puede proporcionar una serie de colores que combinados forman una imagen. Esta puede ser recordada en nuestra mente o puede ser capturada por medio de una fotografía. En el caso de que las fotografías estén digitalizadas los tres colores principales son RGB (por sus siglas en inglés *Red, Green, Blue*); por medio de una combinación de la intensidad de estos tres colores es como se compone una imagen. De igual forma, estas imágenes digitales están constituidas de pequeñas partes conocidas como píxeles, cuadros que están definidos por su posición en un sistema de referencia que inicia comúnmente en la esquina inferior izquierda y se mueve de forma creciente en el eje x hacia la derecha y en forma creciente en la dirección y hacia arriba (al menos, en la mayoría de los programas que permiten analizar imágenes). Cada uno de estos píxeles tiene un vector (R, G, B) que define el color que tiene.

El tratamiento de imágenes utiliza justamente estos vectores de color y sus posiciones para poder realizar ajustes o análisis a nivel ingeniería que permitan encontrar información útil. El uso de *software* que analiza imágenes se aplica incluso en la visualización de metalografías para poder escalar y tener mediciones confiables de tamaños de grano, distribución de ellos o fases formadas.

En el presente trabajo se buscó que una imagen digitalizada (cartulina escaneada) se seccionara en cuadros de 3×3 píxeles, generando una malla y , con la relación entre las medidas de la cartulina y la información de la imagen en formato digital, generar una regla

de correspondencia. Como esa malla tiene área total y valores de cuantos de los pixeles contenidos en los cuadros eran blancos (representación de la partícula), se puede extrapolar el área de un círculo (pues es la morfología que se espera de la partícula); es así como se podrá determinar el radio de las partículas formadas durante el proceso de atomización centrífuga.

3 Hipótesis

Es posible construir un modelo físico de la atomización centrífuga para determinar tamaños de partícula con la variación de dos parámetros, diámetro de disco y altura de vaciado, usando fluido de trabajo es coloridos y una superficie donde se depositen, para tener una huella de la distribución de las partículas.

La mayor cantidad de las partículas generadas en el modelo físico estarán concentradas en una región alejada del atomizador.

A mayores valores del número de Reynolds se espera obtener partículas de menor tamaño.

Por otro lado, al aumentar el número de Weber se verá una disminución en los tamaños de partículas.

Las partículas tendrán menor tamaño y se distribuirán en una mayor región alejada del atomizador cuando se aumente el número de Bond.

4 Objetivos

- Construir un modelo físico de la atomización centrifuga.
- Caracterizar el tamaño de las partículas generadas de dos parámetros de operación (altura de vaciado y tamaño de disco) por medio de análisis de imágenes.
- Determinar el comportamiento del tamaño promedio de las partículas generadas en el modelo físico de atomización por centrifugado, en función de los valores del número de Reynolds, Weber y Bond, así como de las relaciones geométricas.

5 Metodología de trabajo

El proceso de atomización por centrifugado consiste en tener un disco liso que gira a altas velocidades y sobre el cual se deja caer un chorro de metal fundido. Como no se tiene información de algún atomizador que esté en funcionamiento y con el cuál se pueda hacer un escalamiento directo, se decidió implementar un sistema que generará los dos fenómenos importantes: un sistema que rotará y otro que permitiera generar el vaciado.

Como dos de los fenómenos principales son la rotación y el vaciado, esas fueron las pautas que se emplearon para el modelo físico. Para generar la rotación se empleó un taladro percutor de 3/8 in con motor de 550 W, el cuál fue fijado sobre una estructura metálica con ayuda de una prensa metálica tipo G. Cabe señalar que el taladro tiene un botón que permite dejar bloqueado el botón de encendido; esto ayuda a no tener que estar todo el tiempo presionándolo para que funcione.

En el portabrocas, se colocó uno de los tres discos plásticos (5, 7 ó 9 in de diámetro) asegurándose que estuviera completamente horizontal con la ayuda de un nivel. Los discos estaban completamente lisos.

Sobre la estructura metálica y a un lado del motor se colocó un soporte universal con pinzas de tres dedos, los cuales sostenían el cuerpo de la jeringa de 20 mL. Estas pinzas podían ajustarse sobre el eje del soporte universal, lo que permite adecuar la altura de la boquilla de salida de la jeringa. Se emplearon 3 alturas distintas medidas desde la superficie del disco hasta la boquilla de la jeringa: 5 cm, 15 cm y 25 cm. El acomodo del disco y de la jeringa se muestran en la Figura 5.1.

Uno de los materiales críticos era el fluido de trabajo que se utilizaría. Originalmente se pensó en emplear agua para seguir la estela que dejaba sobre una superficie, sin embargo, no se encontró una superficie que al final mantuviera la forma de la estela y que pudiera ser transportada o fotografiada sin mostrar alteraciones, principalmente porque el agua tendía a ser absorbida por el papel usado, después de cierto tiempo se evaporaba o deformaba el

material. Se trató de usar directamente una pintura blanca de uso comercial, cuya viscosidad favorecía que se adhiriera al disco y no mostrará muy claramente la estela que se buscaba describir, además de mostrar una especie de giro en su caída desde la boquilla al disco. Así que se generaron diluciones para ver cuál de ellas presentaba mejores características tanto de manejo como de estela formada. El fluido de trabajo que simularía el metal fundido fue una dilución de pintura con agua. En un vaso de precipitados de 50 mL se vertieron 20 mL de agua por 10 mL de pintura blanca, mezclando completamente con un agitador de vidrio.

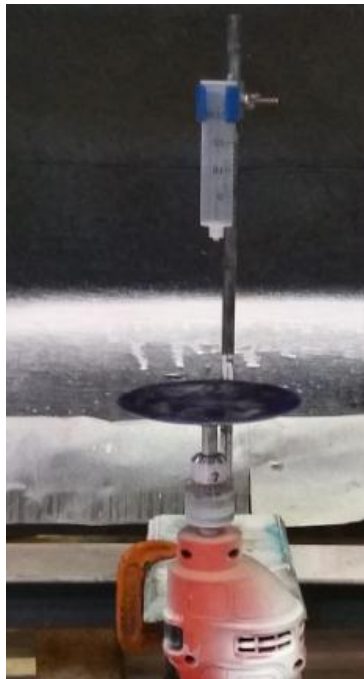


Figura 5.1. Esquema del modelo de atomización por centrifugado.

De igual forma, la superficie donde se depositó el fluido de trabajo representó un reto. Se empleó papel manila, papel kraft, cartulinas plastificadas y cartulinas negras. En todos ellos, al emplear agua como fluido de trabajo se marcaban las gotas de agua, sin embargo, se secaban después de un tiempo corto y ya no eran perceptibles, por lo que no quedaba una marca permanente. Al usar cartulinas plastificadas las gotas, tanto de agua como de pintura diluida, se quedaban y al menor movimiento comenzaban a juntarse, lo que imposibilitaba su manipulación. En el caso de usar la pintura diluida las gotas quedaban marcadas en el papel manila, el kraft y las cartulinas negras. Sin embargo, los dos primeros papeles sufrían deformaciones (ondulaciones) que hacían que la superficie ya no coincidiera en dimensiones

y condiciones con la primera imagen fotografiada, lo que dificultaría su posterior análisis. Por otro lado, la cartulina negra captaba las gotas, mantenía las formas, no se distorsionaba y se podía hacer coincidir con las condiciones dimensionales que tenía al inicio, por lo que estas son las que se emplearon. Estas cartulinas se colocaron sobre una superficie horizontal evitando que se presentarán pliegos y adhiriéndolas con *masking tape* en las esquinas. La madera se colocó a un lado del motor, a un centímetro de distancia de él y a cinco centímetros por debajo del disco. La ubicación de la cartulina se mantuvo fija en todos los experimentos.

Se aseguró que el motor funcionará de forma adecuada en cada una de las pruebas de selección del fluido de trabajo. Para ello, se hacía funcionar el taladro y se dejaba el seguro para mantenerlo encendido y se procedía a realizar el vaciado con agua o pintura, según fuera el caso, observando la estela que quedaba marcada en las cartulinas. No se observó mal funcionamiento durante las pruebas y el giro siempre era horizontal y nivelado.

Una vez que se tuvo el sistema rotatorio, la forma de vaciado, el fluido de trabajo y la superficie de caída, se procedió a realizar los experimentos. Se tuvieron dos parámetros de variación: el diámetro del disco (5, 7 y 9 in) y la altura de vaciado (5, 15 y 25 cm).

Se vaciaron 10 mL de fluido de trabajo en la jeringa y se dejaron que fluyeran en caída libre sobre el disco (que giraba a 2800 RPM), formando una película sobre el disco hasta llegar al borde para ser fragmentada. Cuando las partículas que se formaron caían sobre la cartulina, se impregnaron en ella y dejaron una huella de la forma de la estela producida y de las partículas formadas. Las cartulinas fueron digitalizadas (calidad 821 x 600 pixeles) con ayuda de un escáner para su posterior análisis con el *software Wolfram Mathematica*. De igual manera, se utilizó una cámara fotográfica para tomar las fotografías de las cartulinas una vez realizado el experimento, pero debido a su calidad (aproximadamente 2000 x 3000 pixeles) no fueron empleadas debido al tiempo de procesamiento que emplearía *Mathematica* para realizar los análisis. En el primer caso se tardaba tres horas, en el segundo se tardó alrededor de un día y no fue posible continuar por falta de espacio en el disco duro de la computadora.

6 Resultados y discusión

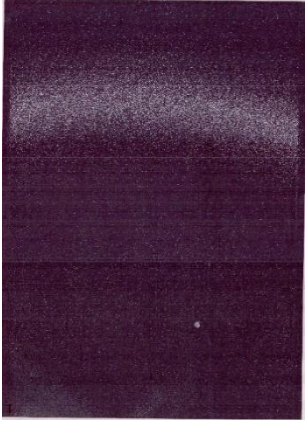
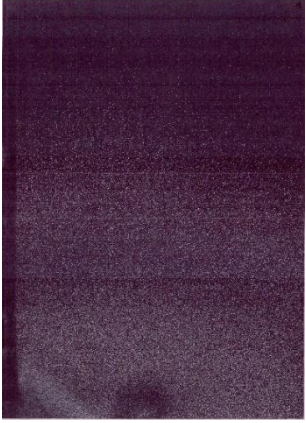
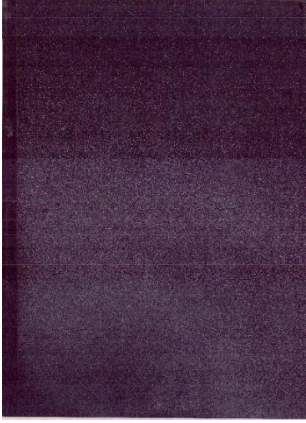
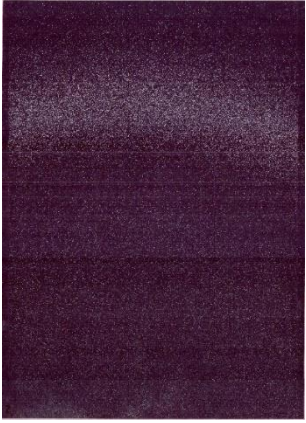
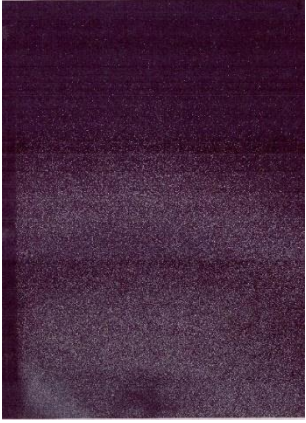
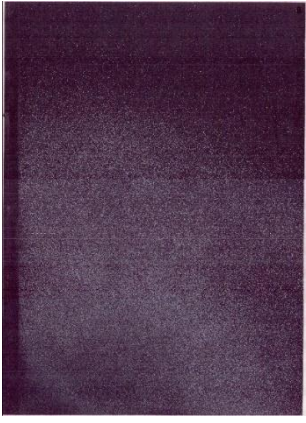
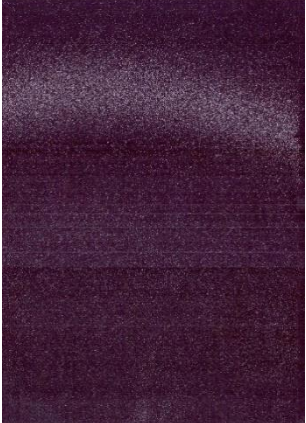
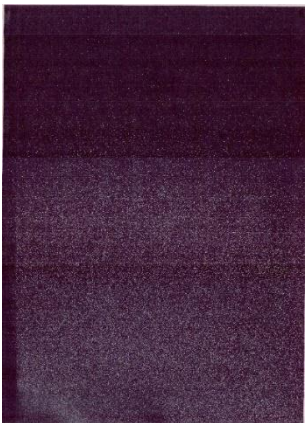
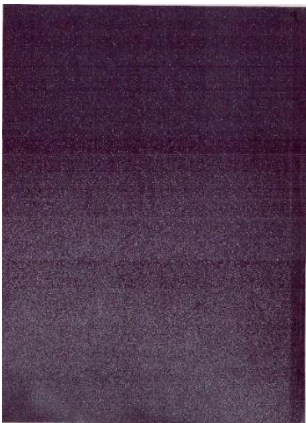
Una de las partes importantes del trabajo fue desarrollar una técnica que brindara información de la distribución que tienen las partículas bajo las condiciones de operación. Para ello, se tomó una muestra de la huella que deja la estela generada por la expulsión de un fluido de trabajo colorido colocado en el modelo físico del atomizador centrífugo. Se variaron dos parámetros: la altura de vaciado del fluido de trabajo (que afecta la velocidad con la que cae el fluido de trabajo) y el tamaño del disco (que afecta el espesor de la película formada sobre el disco y la velocidad con la que se desprende del borde del disco repercutiendo en el tamaño de las partículas).

El fluido de trabajo que se encontraba en la jeringa cayó hacia el centro geométrico del disco rotatorio; al chocar el flujo que salía de la jeringa formaba una capa sobre el disco y al llegar al borde de este se fragmentaban los filamentos para formar gotas que caían sobre la cartulina.

Las imágenes en la Tabla 6.1 muestran cómo se distribuyen las partículas generadas por la atomización centrífuga en función del tamaño del disco y de la altura a la que se dejaba caer el fluido de trabajo. Se observa que el comportamiento de la huella de la estela es similar para las tres cartulinas en el disco de 5 in. Una de las características que comparten es la mayor cantidad de puntos que se concentran en una zona semicircular, alejada del disco rotatorio. Sin embargo, a medida que aumenta la altura de vaciado del flujo, la zona se ensancha y hay mayor dispersión de los puntos blancos en el resto de la cartulina.

La primera observación se atribuye a un desprendimiento de las gotas formadas por la capa sobre el disco que deben tener un tamaño grande, lo que implica mayor materia y mayor peso, provocando que sigan una trayectoria parabólica y que finalmente caigan hacia la cartulina en una zona muy restringida de la cartulina como se muestran en la Tabla 1. Esto indica que al emplear un disco de diámetro de 5 in las gotas formadas son de gran tamaño y no están suficientemente aceleradas para tener una trayectoria distinta a la establecida por las dos fuerzas que actúan sobre ellas: la fuerza centrípeta y el peso (que producen una trayectoria parabólica).

Tabla 6.1. Huellas de la estela obtenida a partir de las gotas de fluido de trabajo sobre una cartulina en función del tamaño de disco (vistas en forma horizontal) y altura de vaciado de fluido de trabajo (vistas de forma vertical). Rapidez de giro de 2800 RPM.

		Diámetro (in)		
		5	7	9
Altura de vaciado del fluido de trabajo (cm)	5			
	15			
	25			

Para los discos de 7 y 9 in, se puede observar que ya no aparece la zona semicircular de alta densidad de puntos blancos, en su lugar, hay una mayor distribución en toda la cartulina incluso en la sección más alejada del motor, aunque apareciendo una mayor presencia en las zonas cercanas a este. Las pruebas a 5 y 15 cm de altura de vaciado muestran dispersiones similares, con algunas zonas de alta concentración en la parte cercana al disco. Sin embargo, a 25 cm se ve una distribución más homogénea de la huella de la estela. El cambio en la distribución se atribuye al uso de un disco de mayor diámetro: el fluido que choca con el disco forma una capa más delgada y al mantener la misma rapidez de giro, el aumento en radio produce una aceleración mayor que provoca que el líquido se desintegre en partículas más pequeñas y dispersas en todas direcciones. Esta misma descripción aplica para el disco de 9" que, con un diámetro todavía mayor, genera más partículas y de menor tamaño, que son fácilmente distribuibles en todas direcciones.

La segunda observación está relacionada con el efecto de la altura de vaciado del flujo. A mayor altura se provoca una mayor velocidad de vaciado dado que existe una transformación entre la energía potencial y la cinética presentes. Al aumentar la velocidad con la que el fluido vaciado choca con la superficie del disco la dispersión de la capa es mucho mayor, generando superficies más delgadas (esto se podría probar con videos en la zona del disco como trabajo a futuro) que al ser aceleradas por la rotación producen gotas de menor tamaño y mayor distribución de la huella de la estela formada.

Cabe señalar una observación realizada durante la experimentación referente a las trayectorias que las partículas parecen seguir. Durante los experimentos, se observó (porque no fue posible medir) que algunas partículas formadas subían por encima del nivel del disco; probablemente este movimiento fue provocado por las corrientes que se generaban dentro del laboratorio, las cuales podían atrapar a las partículas y cambiar su trayectoria. Eso explica, en cierta medida, la forma que adopta la huella de la estela en los discos de 7 y 9 in, dado que el motor genera corrientes que atraen aire hacia él, promoviendo así el movimiento de las partículas hacia el motor y por ende en la zona de la cartulina cercana al motor. Será necesario ahondar en cuantificar el efecto de las corrientes de aire sobre las trayectorias de las partículas, ya que se podría proponer un proceso de separación controlada por corrientes.

Las imágenes muestran de forma general como es la distribución de las partículas, basándose en una huella de la estela formada durante el proceso; lo que no muestran son los tamaños, al menos no directamente. Por esta razón se empleó un código computacional realizado en *Wolfram Mathematica* (empleando la licencia académica que brinda la UNAM) y se realizó un análisis de esas imágenes.

Lo primero que se hace es tener dos imágenes, la primera fotografía es de la cartulina antes de su exposición a la atomización (será el blanco), mientras que una fotografía posterior a la realización del proceso dará la imagen de la huella total de la estela (será la muestra). Las imágenes están constituidas de pixeles y estos, a su vez, están hechos de vectores de colores (R, G, B). Al comparar el blanco con la muestra se hacen notorias las diferencias existentes. En *Mathematica* se realizó la operación de resta entre las dos imágenes para que únicamente se perciban las diferencias. La imagen posteriormente se transforma a escalas de grises, lo que permite reducir de un vector de tres componentes a uno de una sola componente; esto facilitó el análisis. En la Figura 6.1 se muestra este proceso.

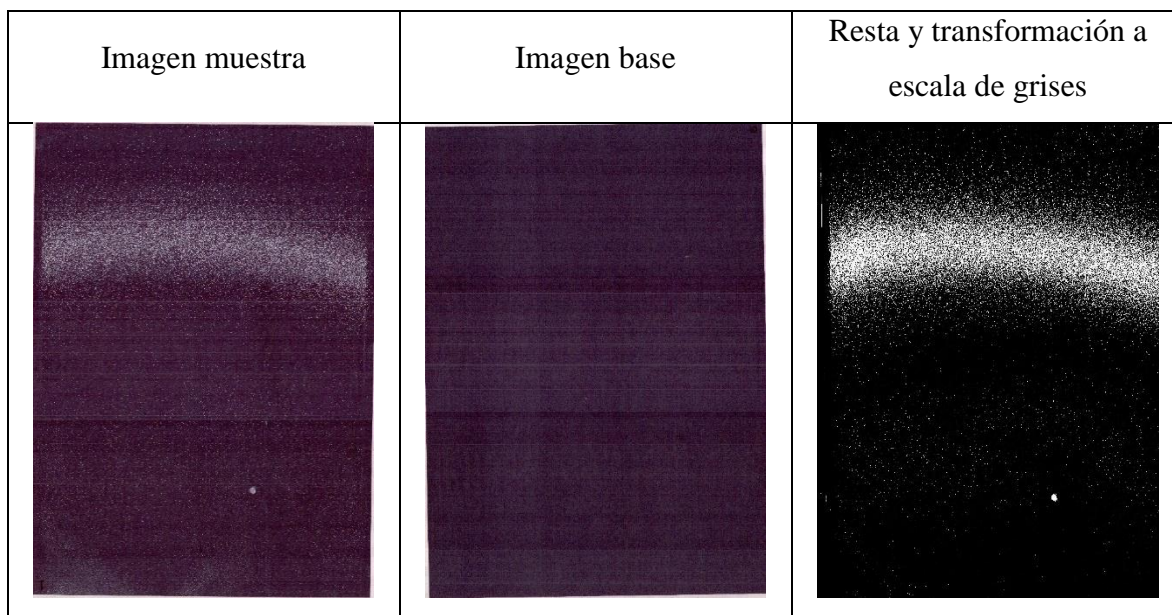
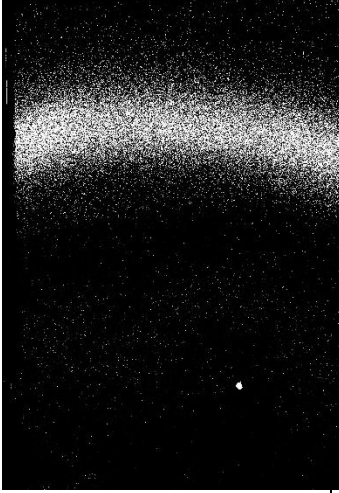

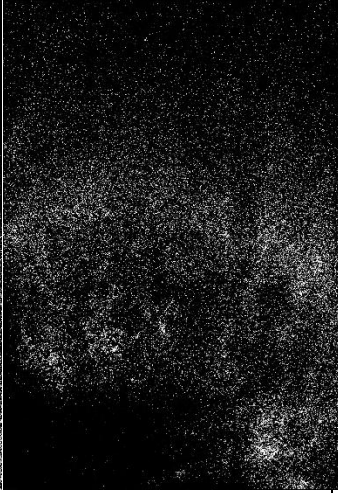
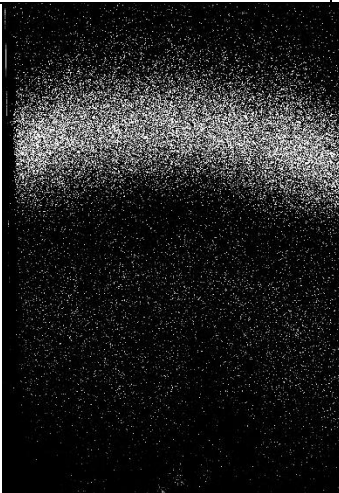
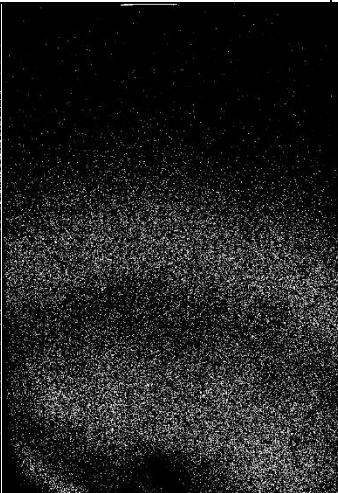
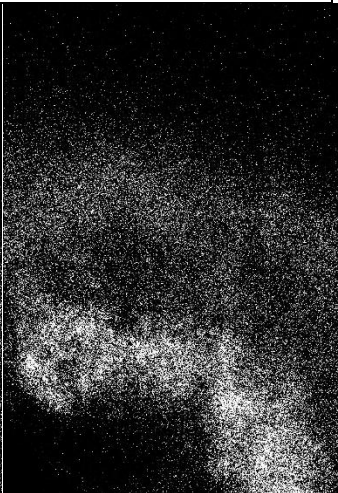
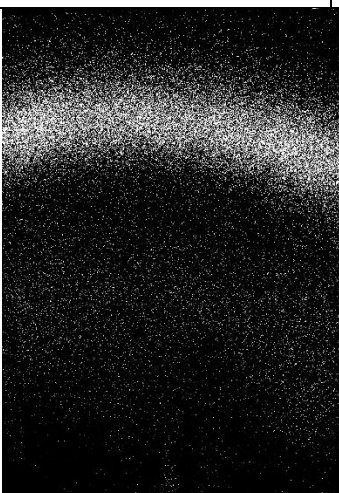
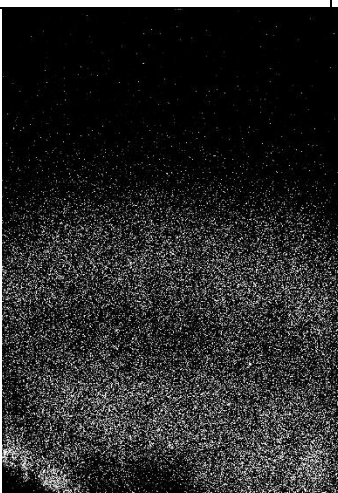
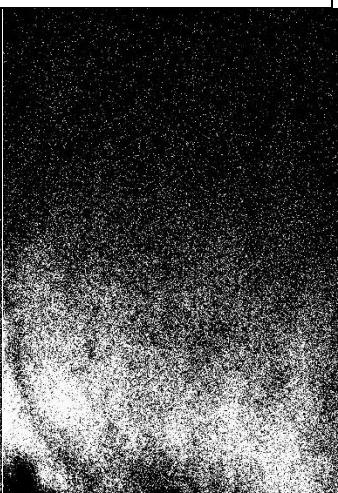


Figura 6.1|. Resta de imágenes, transformación a escalas de grises y resultado final.

Con esta operación, las imágenes de la figura 6.1 muestran de forma más marcada las huellas de la estela producida y se pueden hacer cálculos sencillos sobre ella

Tabla 6.2. Imágenes restadas (blanco restado de la imagen de interés).

		Diámetro (in)		
		5	7	9
Altura de vaciado del fluido de trabajo (cm)	5			
	15			
	25			

Al realizar la diferencia entre las dos imágenes quedan al descubierto únicamente las partículas que cayeron y formaron la huella de la estela. Cabe señalar que la escala de grises permite considerar pixeles que están cercanos al color blanco (partículas de la huella de la estela) o al color negro (fondo donde no hay partículas). Es posible realizar otro programa que permita hacer un conteo de cuantos pixeles cercanos al blanco y cuantos cercanos al negro hay en estas imágenes. Sin embargo, para no hacer el conteo de píxel por píxel, se decidió que sería una mejor opción realizar una cuadrícula de 3 pixeles de ancho por 3 pixeles de alto y comparar cuantos pixeles cercanos al blanco había en cada cuadro. De esta manera, contando el número de pixeles que hay en ese cuadro de 3x3, se podría determinar un tamaño aproximado de las zonas que representan las partículas. La elección de una base de 3x3 es porque se pudo observar que las partículas en general son más grandes que un pixel y menores que 7 pixeles. Dentro de *Mathematica* hay herramientas que permiten visualizar estos detalles píxel a píxel, por ejemplo, al usar la lupa en cada imagen. Trabajo a futuro considera la posibilidad de mejorar el algoritmo para determinar si los pixeles que están en la cuadrícula son adyacente entre sí, o si están muy alejados y así mejorar las mediciones del tamaño de partícula.

El programa construido en *Mathematica* que cuenta los pixeles blancos en las cuadrículas de 3x3 devuelve una serie de datos que se encuentran contenidos en tablas de *Microsoft Excel* para poder realizar la estadística correspondiente de manera fácil. Como la cuadrícula es de 3x3 pixeles (9 pixeles) y el valor que arrojaba el programa indica cuantos de los nueve pixeles son cercanos al blanco, se consideró que estos pixeles blancos formaban una partícula redonda de área equivalente a los pixeles que ocupa y así se determinó el radio de las partículas para cada celda. Posteriormente se obtuvo un promedio sobre líneas horizontales de las imágenes, y se graficó la posición de cada línea horizontal en la cartulina contra el promedio del radio de dichos puntos. Se sobrepusieron las gráficas de dispersión con las imágenes en escala de grises para representar con mayor claridad el comportamiento de las partículas y su distribución de tamaños.

La Figura 6.2 muestra la distribución del tamaño promedio que se obtiene de las cuadrículas 3x3 sobrepuesta a la imagen de la huella final. Se observa que, en la zona de alta

concentración, se tienen los tamaños más grandes, al parecer por la alta saturación de zonas blancas. Se observa que, en las zonas previas a la zona semicircular, al aumentar la altura de vaciado se tienen partículas con radios menores al 0.04 cm.

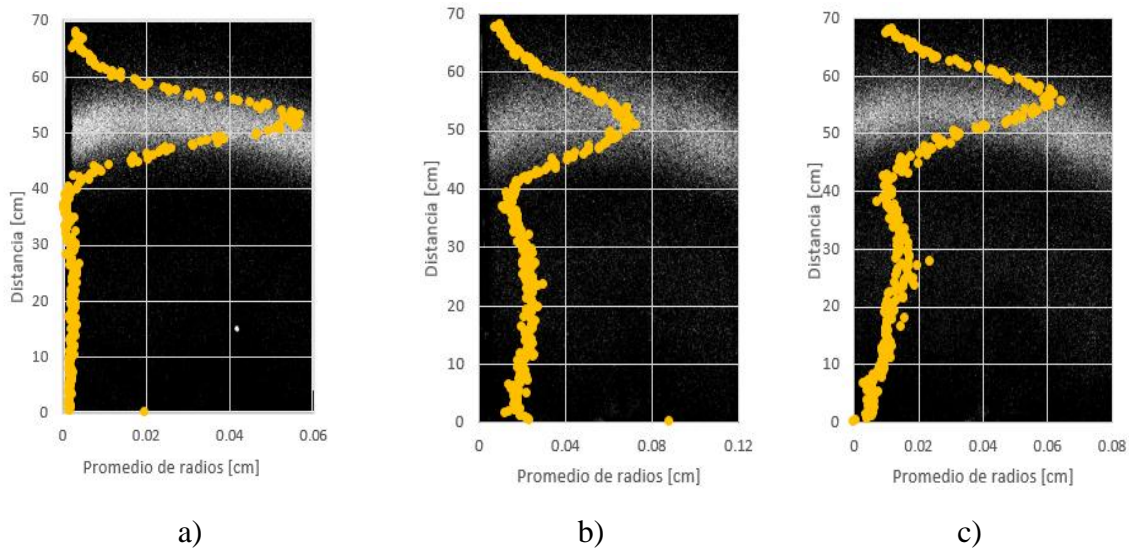


Figura 6.2. Sobreposición de gráfica de promedio de radio de partícula contra distancia sobre la huella final, con rapidez de rotación de 2800 rpm, disco de 5", con valores de la altura de salida del flujo con respecto al disco de: a) 5 cm, b) 15 cm y c) 25 cm.

Se observa en la Figura 6.3 el mismo tipo de sobreposición para los experimentos de atomización centrífuga con el disco de 7". Las gráficas de distribución del promedio de tamaños de las partículas obtenidas durante la experimentación modificando la altura de vaciado muestran que la zona semicircular con mayor densidad de puntos está desde la zona cercana al motor hasta 40 centímetros de distancia. Los tamaños máximos de partícula se encuentran en zonas cercanas al motor del disco. Se tiene que considerar que éstos son datos promedio por línea horizontal. En la Figura 6.4, a diferencia de la Figura 6, se percibe que la distribución de las partículas va desde 0 a 50 centímetros de distancia desde el motor. El cambio en la distribución se atribuye a que, al tratarse de un disco de mayor diámetro, la capa será más delgada porque la rapidez de rotación les dará mayor aceleración a las partículas lanzándolas más lejos y también las hará más pequeñas.

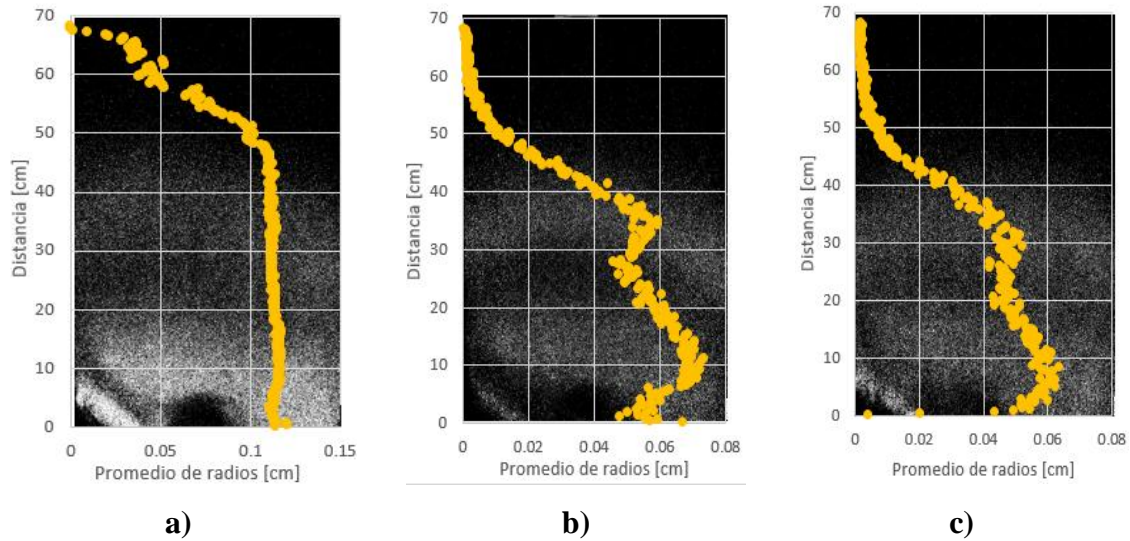


Figura 6.3 Sobreposición de gráfica de distancia contra el promedio de radio de partícula sobre la huella final, con rapidez de rotación de 2800 rpm, disco de 7", con valores de la altura de salida del flujo con respecto al disco de: a) 5 cm, b) 15 cm y c) 25 cm.

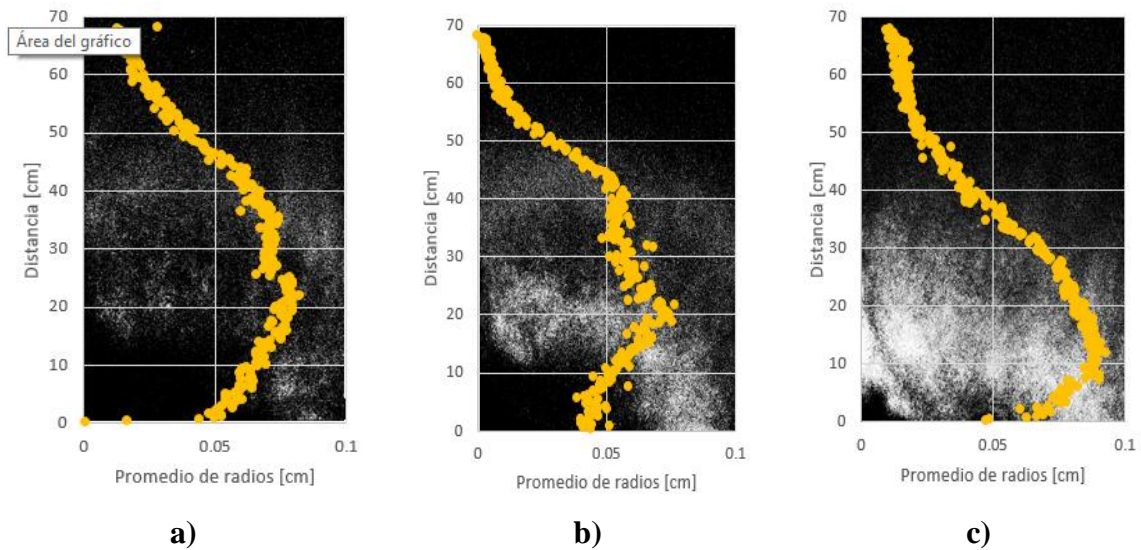


Figura 6.4. Sobreposición de gráfica de distancia contra el promedio de radio de partícula sobre la huella final, con rapidez de rotación de 2800 rpm, disco de 9", con valores de la altura de salida del flujo con respecto al disco de: a) 5 cm, b) 15 cm y c) 25 cm.

Las Figuras 6.5, 6.6 y 6.7 son el resultado de la sobreposición de la imagen final de la huella y la distribución de porcentaje local de partículas en cada imagen. Es decir, si se construyera una línea horizontal se puede calcular el porcentaje de cuadrículas de 3x3 que contienen al

menos 1 píxel blanco. De esta manera, el 100 % indicaría que sobre cada línea horizontal todas las cuadrículas de 3x3 tienen al menos 1 píxel blanco, mientras que el 0% indicaría que no hay cuadrículas con al menos 1 píxel blanco. Esta es una de cuantificar la densidad de partículas. Se puede apreciar como la distribución de partículas es mayor cuando se tienen discos de mayor diámetro.

En la Figura 6.7 es posible observar que no hay efecto aparente sobre la distribución de partículas cuando se tiene variación sobre la altura de vaciado al tener un disco de gran diámetro (9”), situación opuesta a lo observado en la Figura 6.5, donde sí se aprecia una distribución más uniforme sobre la región analizada, al aumentar la altura de vaciado manteniendo un disco pequeño (5”).

Cabe señalar que esta técnica de conteo de píxeles para la determinación de partículas es una propuesta que busca dar información estadística que permita conocer el comportamiento de los sistemas de atomización centrífuga y así poder determinar que parámetros de control influyen más. En las Figuras 6.5 a 6.7, es posible observar que el diámetro del disco tiene una influencia significativa en la distribución de las partículas mientras que la altura de vaciado afecta en mayor medida al tener discos pequeños.

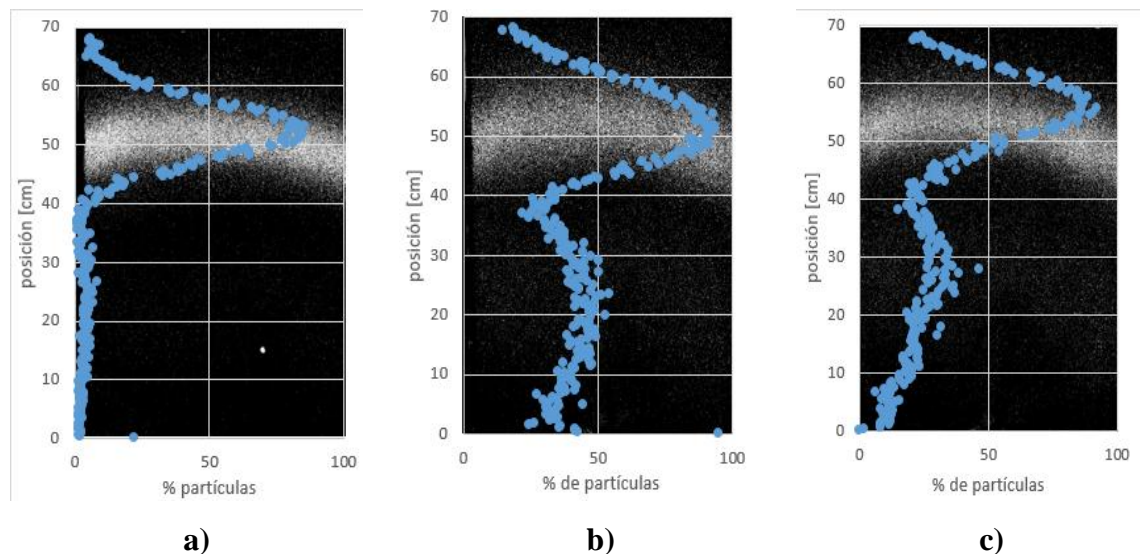


Figura 6.5. Sobreposición de gráfica de distribución de % de partículas sobre la huella final, con rapidez de rotación de 2800 rpm, disco de 5”, con valores de la altura de salida del flujo con respecto al disco de: a) 5 cm, b) 15 cm y c) 25 cm.

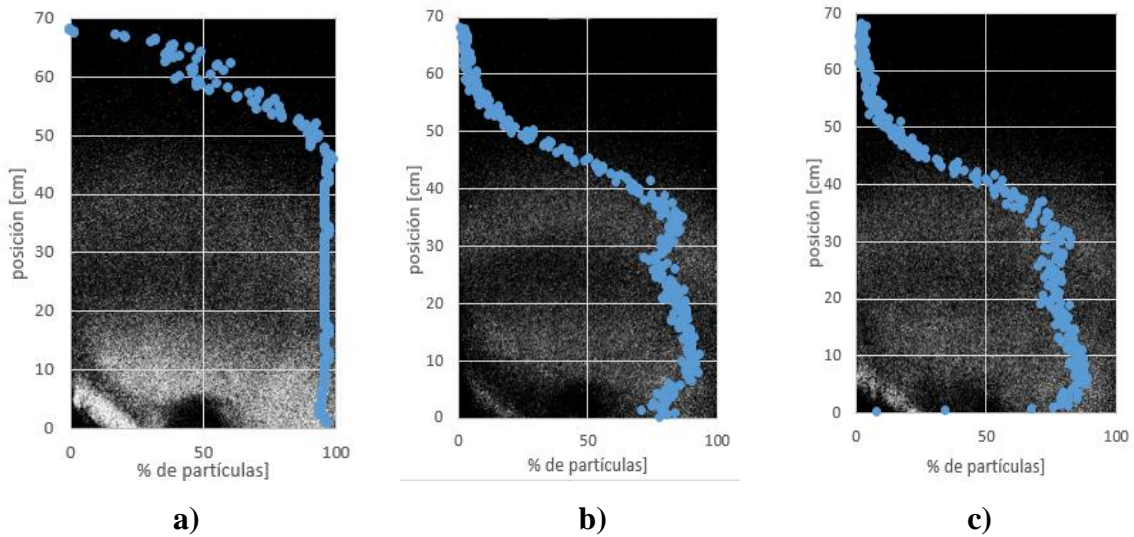


Figura 6.6. Sobreposición de gráfica de distribución de % de partículas sobre la huella final, con rapidez de rotación de 2800 rpm, disco de 7", con valores de la altura de salida del flujo con respecto al disco de: a) 5 cm, b) 15 cm y c) 25 cm.

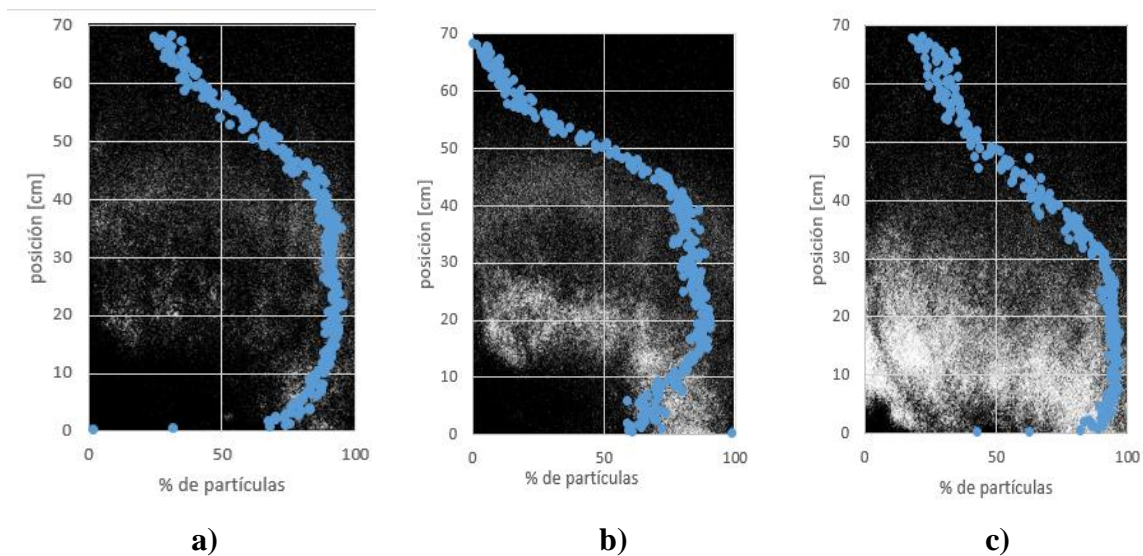


Figura 6.7. Sobreposición de gráfica de distribución de % de partículas sobre la huella final, con rapidez de rotación de 2800 rpm, disco de 9", con valores de la altura de salida del flujo con respecto al disco de: a) 5 cm, b) 15 cm y c) 25 cm.

Las Figuras 6.8, 6.9 y 6.10 muestran el porcentaje de partículas presentes en toda la imagen en función del área que ocupan. Es decir, en una cuadrícula de 3x3 hay 10 posibilidades: que

no haya pixeles coloreados de blanco, lo que es equivalente a tener un área de 0; que haya uno blanco (lo que equivaldrá al área de un píxel); y así, hasta tener los 9 pixeles coloreados de blanco, representando diferentes áreas asociadas a las reglas de correspondencia entre la imagen digital y el tamaño de las cartulinas. Si se agrupan de esta manera, se puede determinar su porcentaje en la imagen.

En la Figura 6.8 es posible ver como existe una gran cantidad de zonas de color negro, yendo desde un 80 % para una altura baja de vaciado y hasta llegar al 50 % para una altura alta de vaciado. También se observa que la mayor concentración de partículas se encuentra en tamaños menores a 0.3 cm^2 , lo que corresponde a tener 6 pixeles blancos o menos en la cuadrícula de 3×3 .

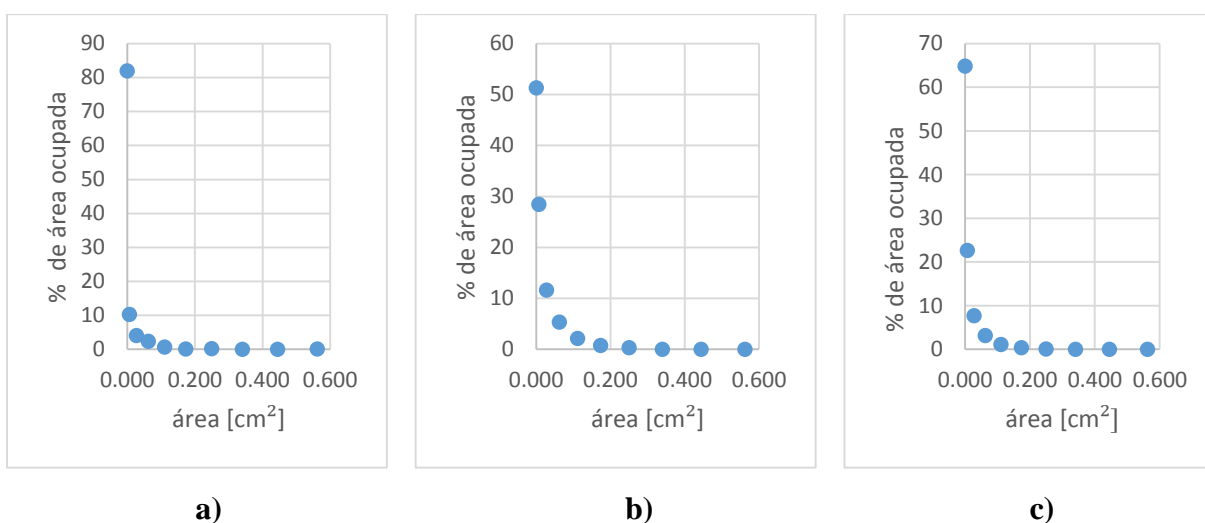


Figura 6.8. Representación gráfica del porcentaje de área ocupada por partículas con respecto a su área de partícula, con rapidez de rotación de 3200 rpm, disco de $5''$, con valores de la altura de salida del flujo con respecto al disco de: a) 5 cm, b) 15 cm y c) 25 cm.

En la Figura 6.9 se alcanza a percibir que el tamaño de partículas se distribuye hasta 0.4 cm^2 , mostrando una tendencia decreciente del porcentaje respecto al área, mientras que a medida que aumenta la altura de vaciado también lo hace el porcentaje de área ocupada por las partículas. En la Figura 6.10 se muestra una tendencia similar, disminuye el porcentaje área ocupada respecto al tamaño de las partículas, mientras que el área ocupada aumenta a medida que aumenta la altura de vaciado. Se percibe que las partículas se distribuyen en tamaños

mucho más variados cuando se tiene mayor tamaño de discos y que la altura de vaciado no es un factor que tenga gran peso en la distribución del tamaño de partícula. En la Figura 6.10 se observa que hay partículas cercanas a los 0.4 cm^2 en el disco de 9 in; sin embargo, también hay un mayor porcentaje de partículas de menor tamaño a diferencia de lo que se observa con los otros dos discos.

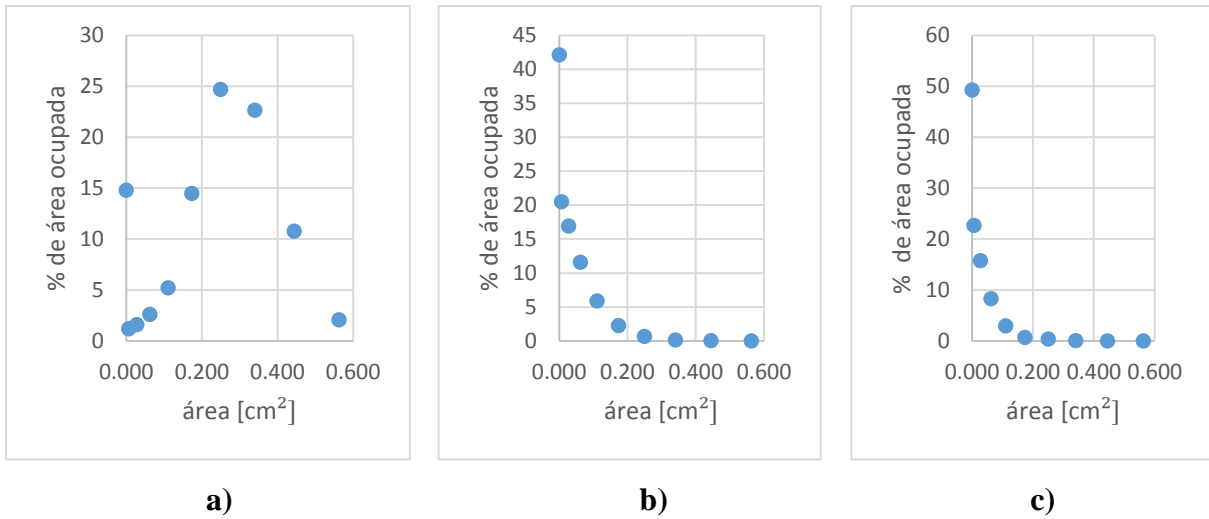


Figura 6.9. Representación gráfica del porcentaje de área ocupada por partículas con respecto a su área de partícula, con rapidez de rotación de 3200 rpm, disco de 7'', con valores de la altura de salida del flujo con respecto al disco de: a) 5 cm, b) 15 cm y c) 25 cm.

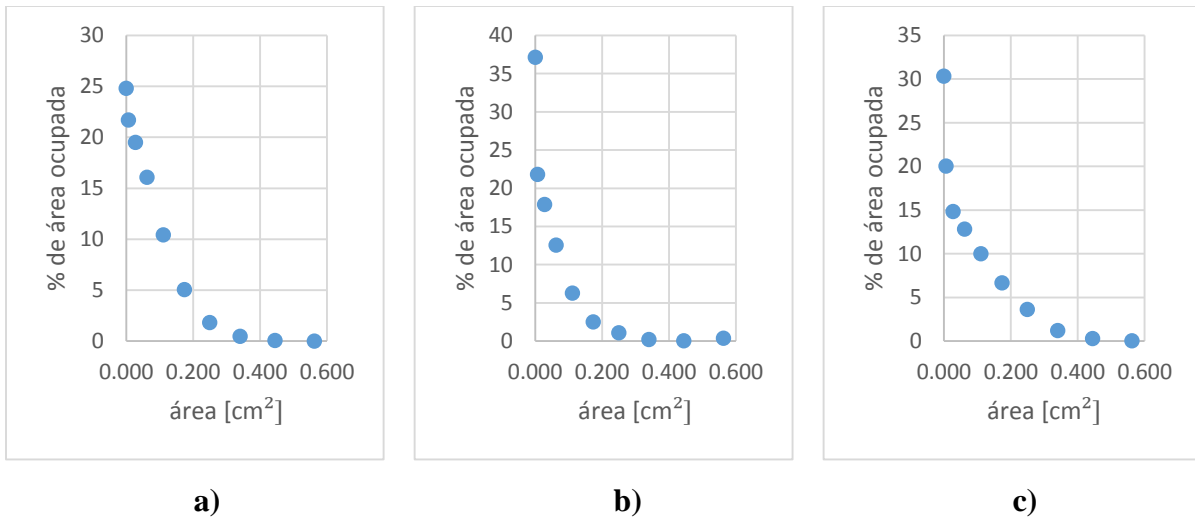


Figura 6.10. Representación gráfica del porcentaje de área ocupada por partículas con respecto a su área de partícula, con rapidez de rotación de 2800 rpm, disco de 9'', con valores de la altura de salida del flujo con respecto al disco de: a) 5 cm, b) 15 cm y c) 25 cm.

En el modelo de atomización por centrifugado se destacan 3 grupos adimensionales (los números de Reynolds, Weber y Bond). La importancia de este tipo de relaciones radica en brindar una visión más amplia del problema presente en ciertos procesos. Se buscó trabajar con los datos promedio de los radios obtenidos a partir del tratamiento de imágenes, para relacionarlas con números adimensionales. Para la obtención de los números adimensionales, lo primero que se hizo fue medir las propiedades del fluido de trabajo, como la viscosidad dinámica [N s/m²], la densidad [kg/m³] y la tensión superficial [N/m], tal como se describe en los Anexos 1, 2 y 3, respectivamente.

También se calculó una velocidad característica [m/s] como la velocidad de caída del fluido de trabajo a partir de la ecuación de Bernoulli, que se puede considerar como parte del principio de la conservación de la energía (Ec.6.11)

$$W_{F1} + E_{c1} + E_{p1}^g = W_{F2} + E_{c2} + E_{p2}^g \quad (\text{Ec.6.1})$$

El teorema de Bernoulli establece el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente, en el cual destacan tres tipos de energía: la debida a la presión del fluido, la energía cinética y la gravitacional. Para poder usarla se consideró que no existían pérdidas de energía por fricción, que las fuerzas debidas a la presión (F_1 y F_2) se contrarrestaban entre sí y que el fluido no presentaba adelgazamiento o deformación del chorro en caída libre. Así, se obtuvo la Ec. (6.2).

$$F_1 + \frac{1}{2}mV^2 + mgh_1 = F_2 + \frac{1}{2}mV^2 + mgh_2 \quad (\text{Ec 6.2})$$

La Ec. (6.2) se reduce a la Ec.(6.3):

$$\frac{1}{2}mV_0^2 + mgh_0 = \frac{1}{2}mV_1^2 + mgh_1 \quad (\text{Ec 6.3})$$

Despejando V_0 , que es la velocidad del fluido al entrar en contacto con el disco giratorio, se obtiene:

$$\frac{1}{2}mV_0^2 + mgh_0 - \frac{1}{2}mV_1^2 - mgh_1 = 0$$

$$mg(h_0 - h_1) + \frac{1}{2}m(V_0^2 - V_1^2) = 0$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{-mg(h_0 - h_1)}{\frac{m}{2}}} + V_1^2$$

Donde

V_0 = velocidad del fluido al entrar en contacto con el disco giratorio

V_1 = velocidad del fluido al salir de la jeringa

m = masa del fluido

g = aceleración debido a la fuerza gravitacional

h_1 = posición de la boquilla de la jeringa donde sale el fluido

h_0 = Posición donde el fluido entra en contacto con el disco (este es el eje de referencia, por lo que es cero)

Una vez que se tenían los valores de V_0 para cada altura se sustituyeron como la velocidad en el número de Reynolds. Para la relación del número de Weber se utilizó la tensión superficial (medida tal como se describe en el Anexo 3), mientras que para el número de Bond lo que varió fue el peso de las partículas, relacionadas con el tamaño que tienen. Cada número adimensional tiene una longitud característica asociada: para Re que se calculó, fue el diámetro de la salida de la jeringa, mientras que para We y el Bo es el diámetro de la gota.

Se graficó, en una superficie definida por los números de Reynolds y la relación H/D (altura de vaciado/ diámetro del disco), el promedio de los radios de cada una de las imágenes digitalizadas analizadas. La Figura 6.11 muestra esta gráfica.

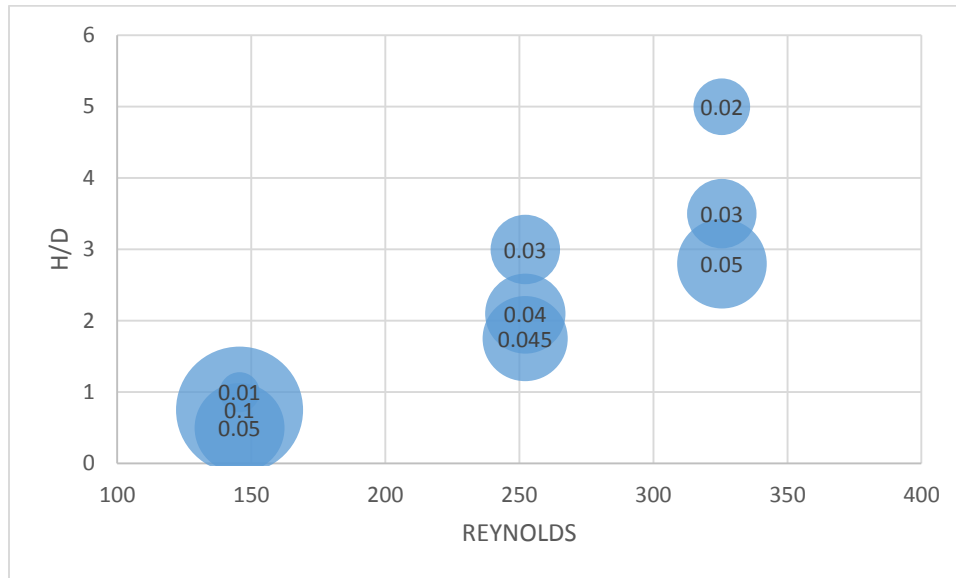


Figura 6.11. Representación gráfica del valor del radio de la partícula en función de la relación (H/D) y el número de Reynolds

Los círculos azules representan el promedio de los radios comparados entre sí. Las gráficas representan el Número de Reynolds calculado en la caída del fluido de trabajo contra la relación entre altura (H) sobre el diámetro del disco (D). Un mayor valor del número de Reynolds indica que el fluido es vaciado a mayor velocidad; para estos experimentos se mantiene el régimen laminar. La relación H/D es menor cuando el vaciado tiene menor altura y aumenta el tamaño del disco. En la Figura 6.11 se aprecia que los tamaños de partícula disminuyen al aumentar el número de Reynolds y cuando la relación H/D aumenta.

Es interesante observar lo que pasa a bajos valores del número de Reynolds. Debido a que las partículas se concentran en una región alejada del disco, provocando que en otras regiones no haya pixeles blancos, provocando una variación en los tamaños promedios de partículas dando el efecto de que allí no hay una tendencia clara, sin embargo a medida que aumenta el Reynolds, se puede observar que el tamaño disminuye cuando aumenta la relación de H/D.

Para la Figura 6.12 la relación entre fuerzas inerciales durante el vaciado y de tensión superficial es representada por el número de Weber. Se puede apreciar la disminución de tamaño de partícula a medida que el número de Weber aumenta y disminuye con la relación

H/D. Se podría mejorar la estimación del valor del número de Weber si se consideraran las velocidades con las que las gotas salen disparadas en el filo del disco y se empleara como longitud característica el tamaño promedio de la gota; sin embargo, se tendría que tener una medición de la velocidad de salida de las partículas, cosa que en este trabajo no se consideró.

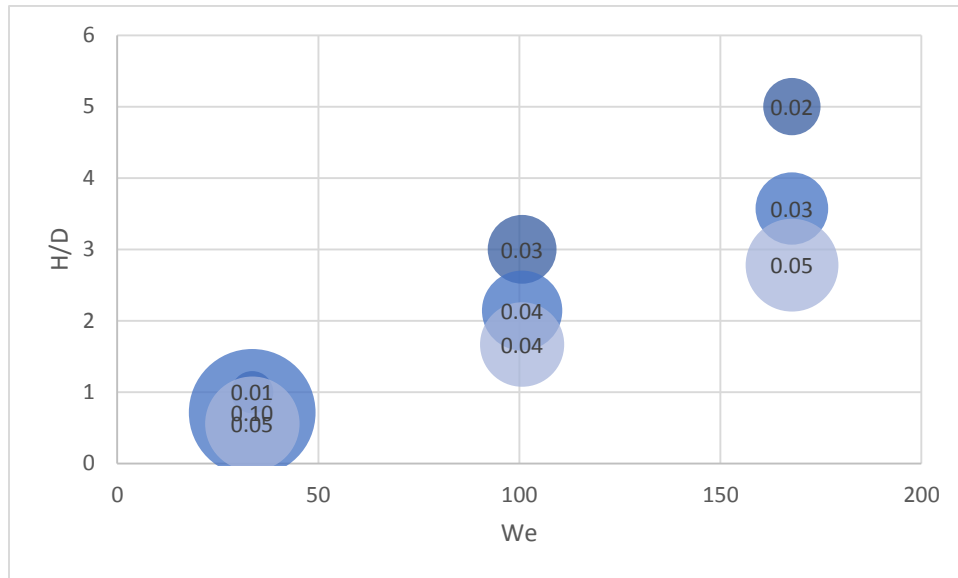


Figura 6.12. Representación gráfica del valor del radio de la partícula en función de la relación (H/D) y el número de Weber.

En la Figura 6.13 se representa una gráfica de burbuja del tamaño de partícula en función del número de Bond y la relación H/D. El Número de Bond relaciona a las fuerzas gravitacionales con las fuerzas de tensión superficial. A valores grandes del número de Bond mayor efecto hay de la gravedad, produciendo tamaños mayores de partícula probablemente debido al bajo efecto de la tensión que provoca deformaciones en las partículas, es decir, forma alargada de las partículas y, por lo tanto, poco esféricas.

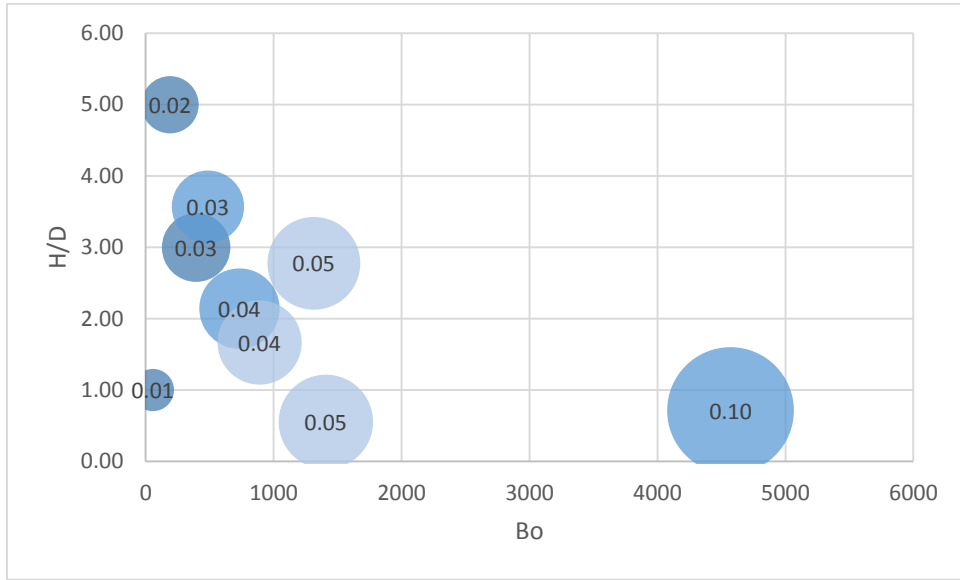


Figura 6.13. Representación gráfica del valor del radio de la partícula en función del número de Bond (Bo) y relación (H/D).

7 Conclusiones

Se diseñó y construyó un modelo físico de la atomización centrífuga que muestra de manera general el comportamiento en la dispersión y tamaño de las partículas obtenidas de acuerdo a la variación de la altura de vaciado y el diámetro de disco rotatorio. A partir de mediciones relacionadas con este equipo, acompañadas de análisis de imágenes, se obtuvieron las conclusiones siguientes:

Se observó que la huella de la estela formada por el fluido describe de manera parcial la distribución que tienen las partículas generadas por el atomizador.

El análisis estadístico de las imágenes digitalizadas permite describir el tamaño de las partículas en función de los parámetros de operación. Se encontró que la mayoría de las partículas no exceden una superficie de 0.4 cm^2 .

El comportamiento general indica que, al aumentar el número de Reynolds calculado antes de que el fluido entre en contacto con el disco, el tamaño de partícula disminuye. Se observó que el tamaño de partícula disminuye a medida que el número de Weber aumenta.

El efecto del número de Bond es que, mientras menor sea este, el tamaño de partícula disminuye.

8 Referencias bibliográficas

- [1] Zhao, Y. Y., Considerations in designing a centrifugal atomiser for metal powder production, *Materials and Design* 27, Febrero 2005.
- [2] Thümmler, F., *Powder Metallurgy*, London: The Institute of Materials, 1993
- [3] American Society of Metals, “Atomization”, en *Metals Handbook*, vol.7: Powder Metallurgy, , 9ª. edición, (Metals Park, Ohio) (1984)
- [4] Díaz. S, "Diferentes aspectos de la metalurgia de los polvos", Federación de enseñanza de CC.OO. de Andalucía, Julio 2009
- [5] Sidorovas. L, "Monografía de la metalurgia de polvos (pulvimetalurgia)", Facultad de Ingeniería, UNAM, 2009.
- [6] Ozols, A., *Producción y caracterización de polvos metálicos obtenidos por atomización y enfriado rápido*, Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 1998.
- [7] Xie J. W, Zhao Y. Y. y Dunkley J. J. Effects of processing conditions on powder particle size and morphology in centrifugal atomisation of tin. *Powder Metallurgy*, 2004; 47: 168–72.
- [8] Sungkhphaitoon. P, Wisutmethangoon. S, Plookphol. T, Influence of Process Parameters on Zinc Powder Produced by Centrifugal Atomisation, *Materials Research*. Vol 27, ELSEVIER, 2005
- [9] Sungkhphaitoon. P., Wisutmethangoon. S. y Plookphol. T, " Design and Development of a Centrifugal Atomizer for Producing Zinc Metal Powder ", *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, vol. 2, No. 2, marzo de 2012

- [10] Modelos matemáticos físicos y conceptuales. Su uso para el pronóstico, [En línea]. Disponible en: <http://dicyg.fic.unam.mx:8080/sistemas/publicaciones/TEMAIII.3.pdf>. [Último acceso: 10 Febrero 2019].
- [11] Quintanar, L., "El teorema Pi y la modelación", Instituto Superior de Matemática (INSUMA), Aguascalientes.
- [12] "Análisis dimensional y semejanza", [En línea]. Disponible en: http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/hja/file/Mec_Fluid_CBS/me33a_cap08.pdf. [Último acceso: 10 Febrero 2019]
- [13] Martínez, J., "Análisis dimensional", Universidad de Oviedo, 2004.
- [14] Barderas, A., "Ingeniería de fluidos", UNAM, México, 2016.
- [15] "Análisis Dimensional", [En línea]. Disponible en: <http://materias.fi.uba.ar/6718/Problemas/a%20revisar/adimensional.pdf>. [Último acceso: 03 Febrero 2019]
- [16] Mott, R. L., "Mecánica de fluidos aplicada", PEARSON Educación, México, 1996.
- [17] Mott, R. L., "Mecánica de fluidos" PEARSON Educación, México, 2006.
- [18] Aranda, V., "Número de Weber", EDOC.SITE 2019, en: <https://edoc.site/numero-de-weber-pdf-free.html> [Último acceso: 10 de Marzo 2019]
- [19] Rapp, B.E., "Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics", 2017, en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bond-number>. [Último acceso: 11 Marzo 2019]
- [20] Zhe-M, L., "Lossless information hiding in images" Syngress, November 2016

ANEXO 1. Medición de la viscosidad del fluido

Durante la experimentación del modelo físico de atomización centrífuga, el fluido de trabajo que se utilizó fue una dilución de pintura, por cada 10 mL de pintura se agregó 20 mL de agua, por lo que la viscosidad cambió, con el siguiente experimento se busca determinar dicha viscosidad dinámica.

1. Material y Equipo

- Vaso de precipitados de 600 ml
- Agitador de vidrio
- Viscosímetro Brookfield DV++ con accesorios
- Pintura vinil- acrílica Meridian clásica 2468 blanco
- Agua

2. Descripción del equipo

El equipo (ver Figura A1.1) consiste de un viscosímetro Brookfield rotacional digital (1), con soporte (2), husillo (en presentación de varios tamaños) (3) y termopar (4). Los tornillos de la base (5) se pueden girar para lograr una mejor nivelación del equipo.

2.1.Preparación del equipo

1. Colocar el viscosímetro en su soporte según la figura 1, conectar a la corriente eléctrica sin encender
2. Conectar el cable del termopar al viscosímetro y sujetar el termopar al vaso con sustancia con ayuda del clip.
3. Nivelar con la burbuja que está en la parte superior del viscosímetro, primero moviendo suavemente la cabeza del mismo, y luego girando los tornillos de la base.
4. Colocar el husillo elegido anotando el número indicado en la parte superior del mismo.



Figura A1.1. Viscosímetro de Brookfield.

2.2. Operación del equipo

1. Encender el viscosímetro oprimiendo el botón ON/OFF de la parte trasera. Esperar a que realice el Autocero, indicando en la pantalla.
2. Seguir las instrucciones que se muestran en la pantalla del viscosímetro, utilizando el cuadro de flechas y oprimiendo suavemente el tablero digital.
3. Si en la pantalla aparece otro número de husillo al colocarlo, presionar SELECT SPINDLE (SP) y con ayuda de las flechas UP o DOWN indicar el número del husillo. Volver a presionar SP. Sobre la pantalla se modificará el valor del número del husillo. Esto debe hacerse dentro de los primeros 5 segundos.
4. Si desea ver sobre la pantalla el valor obtenido de la viscosidad (cP), presione SELECT DISPLAY.

5. Si desea una velocidad previa del husillo, usar las flechas. Esta velocidad aparecerá a la derecha de RPM y la velocidad actual (si el motor esta encendido) aparecerá a la izquierda de RPM.
6. Para cambiar la velocidad del husillo presionar la tecla SET SPEED . Se tomará la velocidad previa por la actual, así que deberá fijar otra velocidad previa si quiere cubrir el rango de velocidades que tiene el viscosímetro. Elgir el rango de velocidades de 0 a 100 RPM.
7. Detener el motor oprimiendo el botón MOTOR ON /OFF.

Antes de iniciar, realice un precorte al líquido, agitando suavemente con un agitador de vidrio por espacio de 1 minuto.

8. Bajar la cabeza del viscosímetro hasta sumergir el husillo según la marca del mismo en el líquido problema.
9. Con el motor apagado elegir una velocidad angular inicial. Encender el motor y registrar la viscosidad (cP).
10. Detener el motor, elevar el husillo por arriba del líquido, dejar reposar por unos minutos la muestra líquida y realizar el precorte.

2.3.Resultados

En la Tabla A1.1 se muestran los resultados de las lecturas obtenidas, utilizando tres diferentes husillos, a una velocidad angular de 100 RPM y a temperatura ambiente.

Tabla A1.1. Valores de viscosidad obtenida con el viscosímetro Brookfield.

Velocidad angular Ω [RPM]	Número de husillo	Viscosidad [cP]
100	6	40
100	5	40
100	4	42

2.4.Paro del equipo

11. Oprimir el botón paro MOTOR OFF y apagar el viscosímetro (ON/OFF).

12. Elevar la cabeza del viscosímetro y retirar el husillo.
13. Limpiar y lavar el husillo sólo con agua y jabón. Sin fibra, secarlo bien. Medir el diámetro y espesor del plato.
14. Retirar y limpiar el termopar junto con el clip.
15. Desconectar el cable eléctrico de la corriente y retirarlo del viscosímetro.
16. Quitar la cabeza del viscosímetro del soporte y guardarlo en su caja, junto con los cables de corriente y termopar.
17. Desarmar y guardar el soporte en su caja.

ANEXO 2. Medición de la densidad del fluido

Durante la experimentación del modelo físico de atomización por centrifugado, el fluido de trabajo que se utilizó fue una dilución de pintura, por cada 10 ml de pintura se agregó 20 ml de agua, por lo que la densidad cambió, con el siguiente experimento se busca determinar la densidad.

1. Material y Equipo

- Vaso de precipitados de 50 ml
- Agitador de vidrio
- Balanza analítica
- Pintura vinil- acrílica Meridian clásica 2468 blanco
- Agua

2. Procedimiento

Colocar el vaso de precipitado en la balanza analítica y tararlo. En el vaso de precipitado verter 10 ml de pintura y 20 ml de agua, agitar vigorosamente con ayuda de la espátula, hasta que se mezclen ambos líquidos, volver a pesar en la balanza.

Conociendo que la definición de densidad es la relación de masa y volumen, como se expresa la Ecuación A2.1.

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{[kg]}{[m^3]} \quad \text{Ec A2.1.}$$

Entonces se conoce la masa del fluido que es de 63g y el volumen fueron 30 ml.

$$\rho = \frac{0.063kg}{3 \times 10^{-5} m^3} = 2100 \frac{kg}{m^3} = 2.1 \frac{g}{ml}$$

Se repitió el procedimiento para corroborar el valor y lo obtenido fue lo siguiente

$$\rho = \frac{0.066 kg}{3 \times 10^{-5} m^3} = 2200 \frac{kg}{m^3} = 2.2 \frac{g}{ml}$$

ANEXO 3. Medición de la tensión superficial del fluido

Durante la experimentación del modelo físico de atomización por centrifugado, el fluido que se utilizó fue una dilución de pintura, por cada 10 ml de pintura se agregó 20 ml de agua, por lo que fue necesario medir la tensión superficial, como se describe a continuación.

1. Material y equipo

- Vaso de precipitados de 50 ml
- Tubo capilar
- Agitador de vidrio
- Vernier o regla
- Pintura vinil- acrílica Meridian clásica 2468 blanco
- Agua

2. Procedimiento

Se colocó en el vaso de precipitados de 50 mL, 20 mililitros de agua por 10 mililitros de pintura blanca, formando la mezcla con ayuda de un agitador de vidrio. Una vez que se tuvo una mezcla homogénea se colocó un tubo capilar de forma vertical y recta dentro del vaso de precipitados para que, debido a la fuerza de adhesión que es la fuerza de atracción entre partículas diferentes, el fluido (agua diluida) subiera por las paredes del capilar, con ayuda de un vernier se midió la altura recorrida por el fluido de trabajo, una vez obtenido el valor se sustituyó el valor en la Ecuación A3.1 para determinar el valor de la tensión de superficie.

$$\sigma = \frac{\rho h g R}{2} = \frac{\left(2100 \frac{kg}{m^3}\right) * (0.0059 m) * \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) * (0.0027 m)}{2} = 0.1719 \left[\frac{N}{m}\right] \text{ Ec A3.1}$$