



## DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO DE BAJO COSTO PARA LA MEDICIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS

GONZALO SALINAS-SALAS<sup>1</sup>, FRANK BABICK<sup>2</sup>, FERNANDO ESPINOSA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Tecnologías Industriales – Facultad de Ingeniería  
Universidad de Talca.

Camino Los Niches km. 1 – Curicó – Chile

<sup>2</sup>Arbeitsgruppe für Mechanische Verfahrenstechnik – Fakultät Maschinenwesen.  
Technische Universität Dresden.

Georg-Schumann-Bau, Münchner Platz 3. 01062 – Dresden – Germany

*(Recibido 10 de junio de 2011, para publicación 25 de julio de 2011)*

**Resumen** – Este trabajo muestra el desarrollo y los resultados alcanzados al construir y calibrar un dispositivo destinado, mediante sedimentación gravimétrica, realizar la medición de distribución de tamaño de partículas de orden de tamaño micrométrico, utilizando para esto componentes estándar, lo que permitiría su empleo por la mediana y pequeña industria de los países en desarrollo, incrementando con ello su competitividad. La calibración del dispositivo se realizó empleando normas técnicas, mediante el uso de suspensiones en base a esferas de vidrio calibradas en agua. Los valores entregados por el dispositivo desarrollado son comparados con los obtenidos mediante métodos convencionales, tales como la espectrometría láser, el análisis de imágenes y la centrifugación analítica. Los resultados de las mediciones mostraron que el dispositivo es preciso en la determinación de la distribución de tamaño de sistemas de micropartículas.

**Palabras clave** – Medición de tamaño, componentes estándar, micropartículas.

### 1. INTRODUCCIÓN

La medición de la distribución de tamaño y el diámetro medio de un colectivo de partículas es un problema que adquiere una mayor importancia en la industria de procesos en general, destacándose la producción de celulosa, de alimentos y en la minería, entre otras, ya que estas industrias emplean tecnologías de molienda, de separación de fase, de transporte neumático y/o hidráulico de sólidos y obviamente tecnologías de descontaminación y medioambientales. La importancia de esta medición radica en el hecho físico de que no existe un determinado polvo o colectivo de partículas con un tamaño o diámetro único de partícula, sino que existe un tamaño o diámetro medio que pretende representar al colectivo de partículas o polvo de dimensiones similares, lo que conduce a que para la misma medida de tamaño nominal, exista un porcentaje de partículas con un tamaño mayor y otro con uno menor al valor nominal o medio. Luego, la calidad de un determinado proceso de reducción de tamaño o de clasificación por tamaño, sólo puede ser evaluada a partir de la medición de la distribución de tamaño y del diámetro medio de partículas que son el producto del proceso. Este problema se vuelve singularmente más dificultoso cuando se trata de micro partículas con un diámetro medio menor a 50  $\mu\text{m}$ , dado que en estos sistemas surgen fenómenos de carácter físico-químicos que no se presentan en colectivos de partículas de mayor tamaño.

Si bien existe la tecnología capaz de medir con una buena precisión e incluso en tiempo real la distribución de tamaño y el diámetro medio de micro partículas, ésta es de elevado costo y por lo que no se encuentra al alcance de las Pequeñas y Medianas Industrias (PYMes) latinoamericanas, las que de contar con equipos de medida de un relativo bajo costo y una adecuada precisión, podrían mejorar significativamente la eficiencia de sus procesos, lo que redundaría en una mejora en la calidad de los productos y en una reducción de sus requerimientos energéticos, lo que aumentaría la competitividad de estas industrias, mediante una reducción de sus costos de producción. Esta es la motivación de este trabajo, en que cual se

presenta el desarrollo de un dispositivo de medida de bajo costo y con adecuada precisión, que permite determinar la distribución de tamaño y el diámetro medio de micro partículas.

Finalmente, cabe indicar que el dispositivo se calibró siguiendo la norma DIN 66111 [1].

## 2. DESARROLLO

Conceptualmente, el principio de medida del dispositivo consiste en medir la velocidad de sedimentación del denominado espejo de separación, que corresponde a la frontera que se establece durante un proceso de sedimentación, entre la suspensión que contiene material particulado y la fracción de fluido que va quedando libre de partículas suspendidas. De modo que el problema técnico se reduce a determinar la posición espacial en sucesivos intervalos de tiempos de este espejo de separación, con el objeto de obtener perfiles temporales de la posición de las partículas a medir y a partir de estos perfiles establecer la velocidad de sedimentación, que es dependiente del tamaño del sistema de partículas que sedimenta.

Físicamente, el concepto anterior se traduce en el dispositivo desarrollado, que realiza la medición de la distribución de tamaño de partículas, empleando para ello un primer elemento, denominado cubeta, donde ocurre el movimiento de las partículas en el fluido, el que es originado por la fuerza gravitatoria, lo que permitiría evaluar distribuciones de tamaño de partículas con diámetros medios mayores a  $1 \mu\text{m}$ . El segundo elemento del dispositivo corresponde al sistema de detección de la posición de las partículas y por ende de su distribución de tamaño, el que emplea el método de extinción fotométrica, lo que conlleva al procesamiento de sucesivas imágenes de la suspensión contenida en la cubeta, obtenidas mediante una cámara Web-Cam. El tercer elemento del dispositivo es una fuente de luz ubicada frente a la cámara, dejando entre ésta y la cámara, la cubeta que contiene la suspensión con las partículas cuyo tamaño se desea medir. El cuarto elemento, corresponde a los elementos mecánicos que soportan a los elementos anteriores y que permiten alinear respecto de la fuerza de gravedad la cubeta. Finalmente, el quinto elemento del dispositivo corresponde al software que se desarrolló para realizar las operaciones de manejo de imágenes y cálculo de la distribución de tamaño del sistema de partículas.

El principio de medida del dispositivo se basa en medir la velocidad de sedimentación del denominado espejo de separación, que corresponde a la frontera que se establece durante un proceso de sedimentación entre la suspensión que contiene material particulado y la fracción de fluido que va quedando libre de partículas suspendidas. De modo que el problema técnico se reduce a determinar la posición espacial en sucesivos intervalos de tiempos de este espejo de separación, con el objeto de obtener perfiles temporales de la posición de las partículas a medir y a partir de estos perfiles establecer la velocidad de sedimentación, que es dependiente del tamaño del sistema de partículas que sedimenta.

Conceptualmente el dispositivo de medición presenta la siguiente disposición que se indica en la Fig. 1.

### 2.1. Principios físicos empleados

Dado que en este dispositivo de medición intervienen tanto principios de la mecánica de los fluidos como ópticos, éstos serán revisados sucintamente:

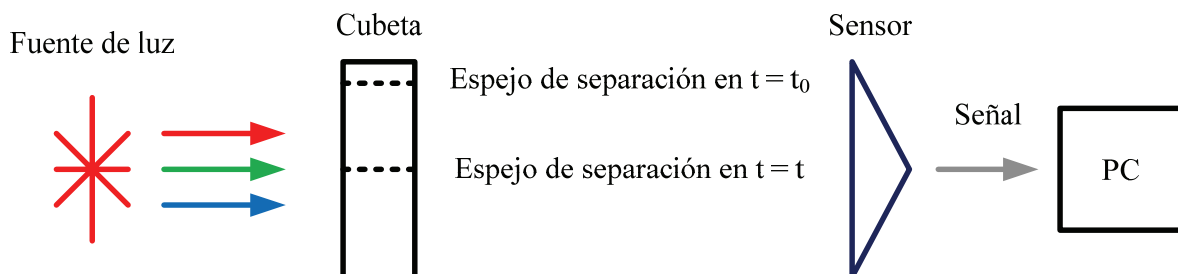


Fig. 1. Esquema conceptual del dispositivo de medición.

El principio físico en que se basa el movimiento de las partículas, corresponde a la acción de la fuerza de gravedad sobre éstas, lo que se traduce en una velocidad de sedimentación, la que es posible modelarla, asumiendo que existe una partícula representativa del sistema, la que se considera como rígida, lisa, de forma esférica y que se sumerja en un fluido viscoso del tipo newtoniano. Ergo, se hace posible considerar para el balance dinámico de fuerzas, sólo los términos de cambio de cantidad de movimiento, peso de la partícula, fuerza de flotación y de arrastre viscoso. Esto da lugar a la ecuación (1), donde  $z$  representa la posición de la partícula en el sentido de la aceleración de gravedad [2-4].

$$m_{particula} \cdot \frac{d\vec{z}(t)}{dt} = \vec{W}_{particula} - \vec{F}_{flotación} - \vec{F}_{arrastre} \quad (1)$$

Como todo movimiento de un cuerpo sólido, en este caso una partícula esférica en un medio viscoso, que parte de un estado de reposo, se presenta una primera fase de movimiento, donde se inicia el movimiento, consecuentemente la velocidad de la partícula es variable con respecto del tiempo y la posición, la que es producto de una progresiva desaceleración la partícula a medida que ésta se sumerge en el fluido. Por lo que se tiende a un estado de equilibrio dinámico, donde el peso de la partícula se ve compensado por la acción de las fuerzas de flotación y de arrastre, alcanzando la partícula una velocidad de sumergimiento constante, a la que se le denomina velocidad terminal. El tiempo que dura esta etapa transitoria del orden de micro segundos para micro partículas, por lo que en términos prácticos, se puede despreciar este intervalo de tiempo para fines de una medición de densidad de tamaño de partículas [2-4].

El problema de evaluar matemáticamente la solución de la ecuación (1), fue resuelto analíticamente por Stokes en 1850, para un régimen de escurrimiento laminar del fluido por sobre la esfera, lo que implica que los valores del número de Reynolds son menores a 0,25. De modo que a partir del balance de fuerzas planteado mediante (1), considerando el término de impulso inercial como nulo, es posible determinar la velocidad de sumergimiento terminal, la que se denomina como velocidad de Stokes y que toma la forma de la ecuación (2), teniendo como dirección de movimiento, la definida por el campo gravitatorio [2-5].

$$v_{St} = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot x^2 \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad (2)$$

En relación con los principios ópticos que deben considerarse para diseño del sistema de detección de la posición de las partículas y por ende de su tamaño. Estos corresponden fundamentalmente a la Ley de Lambert-Beer, la que aplicada a este caso, indica que existe un rango de concentración de material particulado, llamada zona de linealidad de la suspensión, donde existe una directa proporcionalidad entre el logaritmo natural de la intensidad luminosa que atraviesa la suspensión, dividido por la intensidad luminosa que cruza por el fluido libre de partículas y el área transversal efectivo de la partícula, la concentración volumétrica de partículas, el espesor de la suspensión que debe atravesar el haz luminoso y la denominada función del coeficiente de extinción, el que corresponde a la división entre el área transversal efectiva de la partícula y el área proyectada por ésta sobre una superficie plana perpendicular al haz luminoso (su sombra).

Matemáticamente esta relación adopta la forma de la ecuación (3).

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -K(x) \cdot A_p \cdot C_v \cdot L \quad (3)$$

donde a la división entre intensidad luminosa que atraviesa la suspensión y la intensidad luminosa que cruza por el fluido libre de partículas, se le denomina Extinción.

Finalmente, cabe indicar que la función coeficiente de extinción es una propiedad característica para cada suspensión conformada por un determinado tipo de partícula y de fluido y se puede evaluar tanto a partir de la teoría Mie o experimentalmente [2,4]. Luego el valor del tamaño o diámetro de las partículas presentes en la suspensión, se extrae a partir de la ecuación de velocidad de Stokes (2), al reemplazar las propiedades de las sustancias empleadas y el valor de la velocidad de sedimentación de las partículas, lo que permite despejar el diámetro de la partícula.

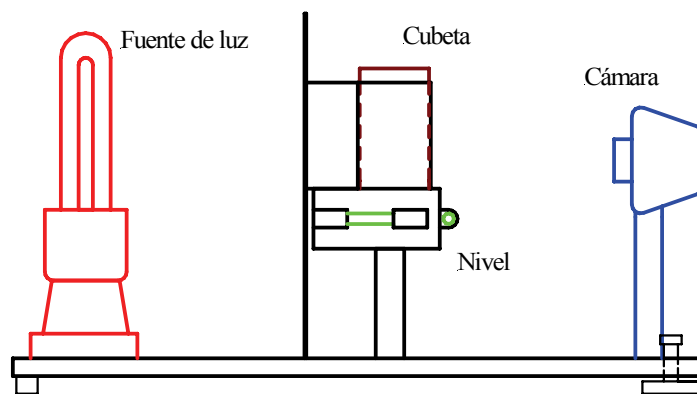


Fig. 2. Croquis del dispositivo de medición.

## 2.2. Diseño y construcción

El dispositivo de medición fue construido sobre una base de acero rectangular, sobre la cual se montó en uno de sus extremos una fuente emisora de luz, que en este caso una lámpara de baja energía comercial de una potencia nominal de 11 W. A su vez, en el extremo opuesto se emplazó la cámara Web Cam CMOS, que actuará como sensor óptico que medirá el paso de luz a través de la suspensión de micro partículas, lo que permitirá evaluar el cambio de la intensidad lumínica que atraviesa la suspensión con respecto al tiempo, mediante el análisis de imágenes sucesivas. Entre ellos se implementó un emplazamiento dotado de niveles de burbuja, donde se alojará una cubeta rectangular, la función de los niveles es asegurar que la dirección de la sedimentación de las partículas coincida con la línea de acción del campo gravimétrico. La cubeta se construyó a partir de dos materiales, el primero es vidrio de cuarzo, el que se utilizó para las caras que son iluminadaa y sensadaa, (las de mayor área de la cubeta), mientras que su base y sus costados se construyeron en material plástico (Technyl). El mecanizado de la cubeta se realizó con la mayor precisión posible a fin de asegurar el paralelismo entre las placas de vidrio y no generar algún grado de interferencia óptica por falta de éste. Como adherente y sello se empleó silicona. Los elementos eléctricos que alimentan la lámpara y el cable de señal de la cámara con su terminal USB, se dispusieron en uno de los extremos de la placa, a la que se dotó de un emplazamiento de manera de facilitar el transporte del dispositivo de medición. Respecto al ingreso de la suspensión a la cubeta, este se realiza por la parte superior de ésta, por simple vaciado desde el vaso de preparación de la muestra.

La Fig. 2 muestra un croquis del dispositivo de medición desarrollado y la disposición de sus elementos componentes.

A su vez, la Fig. 3 muestra una fotografía del dispositivo de medición ya construido.

La adquisición de las sucesivas imágenes o fotografías en el tiempo se resuelve a través del software específico de la cámara, el que permite programar la captura de imágenes progresivas a intervalos de tiempo prefijados y enviar estas imágenes a un computador personal, donde se efectúa el procesamiento de éstas, así como los cálculos matemáticos que permitirán la transformación de estas imágenes en una densidad de distribución incremental de tamaño de partícula.

Para esto fue necesario desarrollar un software específico que permitiera realizar las operaciones de manejo de imágenes y cálculo, que se desarrolló en lenguaje en C++, cuyos pasos más relevantes son los siguientes:

- Lectura de la imagen digital y transformación a escala de grises
- Evaluación de la intensidad lumínica en términos los perfiles de intensidad y de extinción
- Determinación de la altura del espejo de separación entre la suspensión y el fluido claro
- Cálculo de la distribución de velocidades de sedimentación a partir de cambio temporal de los perfiles de intensidad o extinción

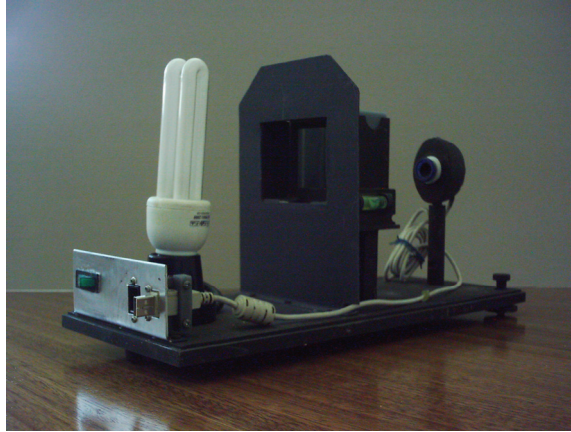


Fig. 3. Fotografía del dispositivo de medición desarrollado.

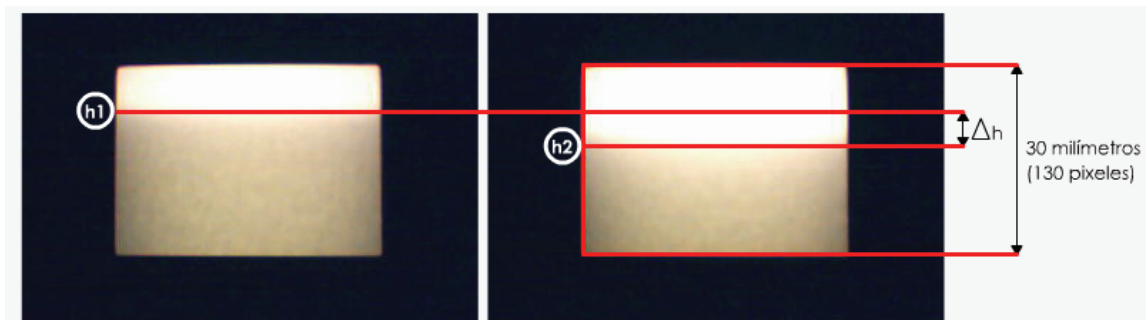


Fig. 4. Imágenes de la altura del espejo de separación, en distintos tiempos para el sistema de partículas CP 5000.

#### e) Cálculo de la distribución incremental de tamaño del sistema de partículas

La primera operación implica realizar una manipulación digital de la imagen capturada, ya que la cámara utilizada recibe una señal en colores, por lo que resulta necesario, por consideraciones ópticas, transformar la intensidad lumínica de los píxeles a una forma de valores en una escala de color gris o escala de grises, para lo cual se empleó la siguiente relación de combinación para los canales de color de la cámara.

$$I_{gris} = 0,3 \cdot I_{rojo} + 0,6 \cdot I_{verde} + 0,1 \cdot I_{azul} \quad (4)$$

La segunda operación que realiza el software es generar los perfiles de intensidad lumínica en función de la altura del espejo de separación para las distintas imágenes sucesivas, como lo muestra la Fig. 4.

Esto se realiza al considerar que cada valor de la intensidad lumínica corresponde al valor medio de su respectiva línea de altura, a partir de esta consideración pueden construirse los perfiles de altura, intensidad y extinción para distintos intervalos secuenciales en el tiempo. Lo que permite generar un patrón temporal de perfiles como el mostrado en la Fig. 5, donde se presentan los perfiles de intensidad para el espejo de separación en una sedimentación.

Es necesario considerar que para una determinada suspensión que está sedimentando, existen valores de intensidad lumínica en escala de grises asociados a determinadas concentraciones de partículas, de manera que los valores mínimos de intensidad en escala de grises corresponden a la zona de la suspensión donde se encuentran presentes las partículas, mientras que los valores máximos de intensidad en la escala de grises corresponden a la porción de fluido libre de partículas. Entre estos valores es posible definir un valor de intensidad lumínica que represente al espejo de separación, el que se utilizara para el cálculo de la distribución de velocidades de sedimentación. Lo que se realiza a través del patrón de perfiles de intensidad lumínica y extinción en función del tiempo, lo que se realiza a partir de los perfiles de extinción en función del tiempo, como los mostrados en la Fig. 6.

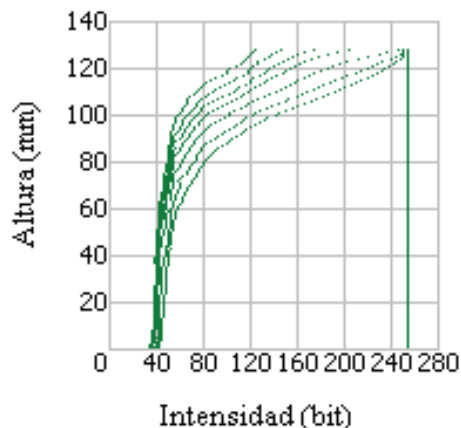


Fig. 5. Perfiles de intensidad lumínica en función del tiempo generados por el sistema de detección óptica para el colectivo de partículas CP 5000.

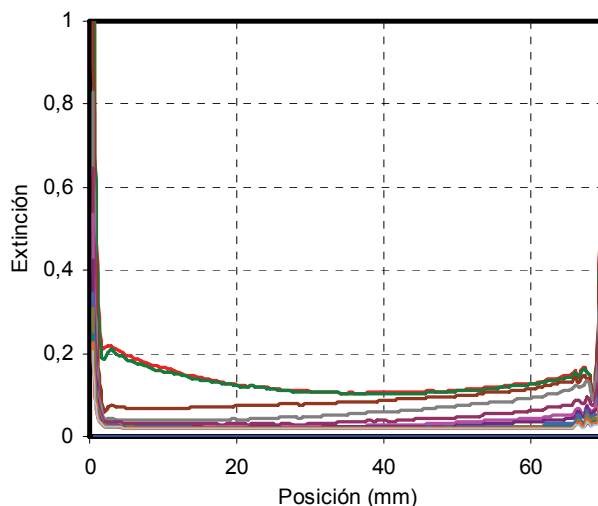


Fig. 6. Patrón de perfiles de extinción en función del tiempo para el sistema de partículas CP 5000.

La tercera operación correspondiente al cálculo de la distribución de velocidades de sedimentación se realiza a partir del cambio temporal de la coordenada de posición (altura) del espejo de separación.

La cuarta operación corresponde al cálculo de la densidad incremental de tamaño del sistema de partículas, lo que se realiza a partir del patrón temporal de perfiles de intensidad, ya que estos valores permiten determinar la distribución de la velocidad de sedimentación y a partir de ésta determinar la fracción de partículas que se encuentran en un determinado intervalo de tamaño, ya que la velocidad de sedimentación es función del tamaño de la partícula como se indica en (2). Luego, para conocer la densidad de distribución incremental del sistema de partículas, se procede a determinar la magnitud del intervalo de tamaño, a partir de las velocidades medias de sedimentación para los sucesivos intervalos de tiempo. La densidad acumulativa se determina mediante la suma de las fracciones de tamaño multiplicado por el intervalo de tamaño, para luego normalizarse en una escala porcentual.

Como cualquier aparato de medida que emplee el principio de sedimentación en campo gravimétrico para la determinación de la distribución de tamaño de partículas, su uso está limitado en la práctica para sistemas de partículas cuyos tamaños varíen entre  $1\ \mu\text{m}$  hasta aproximadamente  $100\ \mu\text{m}$ . Para sistemas de partículas de mayor tamaño es necesario dispersarlas en un fluido que posea una viscosidad dinámica mayor a  $1\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ .

Tabla 1. Datos técnicos del dispositivo de medición.

Identificación del equipo	Dispositivo de medición DTI
Intervalo temporal de medida	10 s – 600 s
Fuente de luz	Lámpara de ahorro de energía Tipo ECO 11 W, 220-240 V / 50 Hz
Cámara Web-Cam CMOS	Creative Labs Inc., Modell PD1110, 640 × 480 Pixel, USB 2.0
Cubeta	Rectangular de vidrio de 22 mm × 67 mm
Volumen de la prueba	70 ml
Rango de concentraciones volumétricas	1% - 5%
Rango de tamaños de partículas	1 $\mu\text{m}$ a 100 $\mu\text{m}$
Rango de densidad de partículas	2.000 kg/m <sup>3</sup> - 10.000 kg/m <sup>3</sup>
Software de procesamiento de imágenes	Desarrollado por el Departamento de Tecnologías Industriales de la Universidad de Talca en C++.

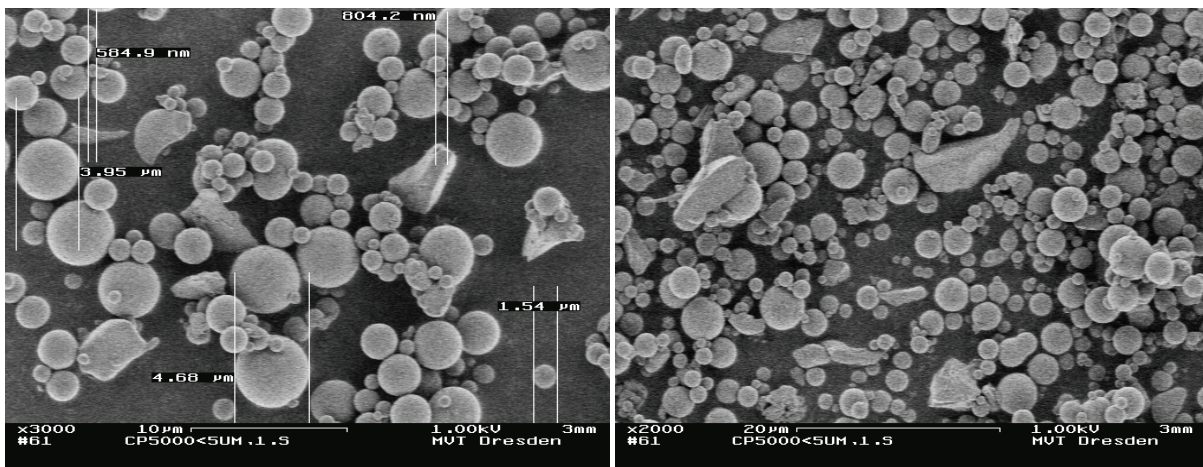


Fig. 7. Fotografía del sistema de micro partículas de CP 5000.

La tabla 1 muestra los principales datos técnicos del dispositivo de medición desarrollado.

### 2.3. Ensayos y discusión

En cuanto a los materiales que se utilizaron en los ensayos de calibración, se seleccionaron a partir de la norma DIN 66111 [1], de manera que se utilizaron partículas esféricas de vidrio soda-lima, compuesto químicamente por un 75% de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), 15% de óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), un 9% de óxido de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y elementos menores, al que se denominara como CP 5000. Estas esferas de vidrio son fabricadas por Potters Industries Inc. con un diámetro medio nominal de 11  $\mu\text{m}$  y una densidad media del orden de 2.440 kg/m<sup>3</sup>. Este sistema de partículas fue suspendido en agua tridestilada y una solución de hidróxido de potasio (KOH), a fin de alcanzar un índice o pH 9,2, a fin de asegurar la estabilidad de la suspensión evitando con ello la formación de flóculos o cluster de partículas, durante el proceso de sedimentación que da lugar a la medición [6].

La Fig. 7 muestra dos fotografías obtenidas con un microscopio electrónico Zeiss Gemini 942, donde se muestra la forma y el tamaño de las partículas CP 5000 utilizadas en la calibración.

En cuanto a la distribución de tamaño de las partículas de referencia CP 5000, esta se realizó mediante un espectrómetro Láser Helos Fa. Sympatec, cuyos resultados se muestran en la Fig. 8.

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de Talca, Chile, utilizándose suspensiones de CP 5000 en agua con hidróxido de potasio como antifloculante, con concentraciones volumétricas de 0,5%, 1,0% y 1,5%. La metodología de preparación de las muestras, consiste en pesar el material particulado y el agua empleando una balanza de laboratorio EEA modelo DT300A. Se procedió a mezclarlos y dispersar las partículas en el agua en etapas, comenzando con el empleo de un

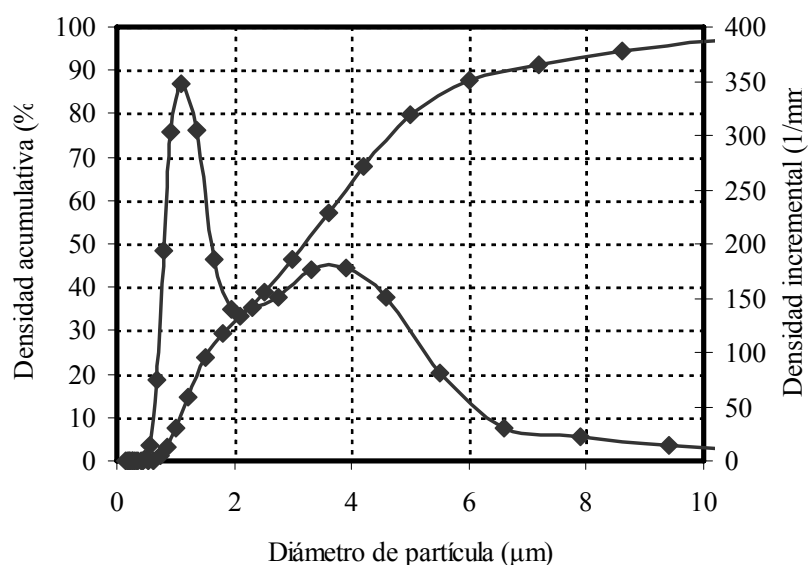


Fig. 8. Caracterización de referencia de la densidad acumulativa e incremental de tamaño para el sistema de partículas CP 5000.

agitador magnético Stuart SM27, se continúa el proceso de dispersión empleando un mezclador mecánico de alta velocidad Cole Palmer Servodyne. Para finalizar el proceso de dispersión se emplea un equipo de ultrasonido Sonofier 250. Los resultados alcanzados tras una batería de ensayos se muestran en la Fig. 6. A continuación se determina el índice de acidez de la suspensión mediante un pH-Meter AZ Instrument Corp. modelo 8685 y se agrega el hidróxido de potasio a fin de alcanzar un pH del orden de 9,2.

Con estas suspensiones se cargó la cubeta y se procedió a realizar las mediciones.

A su vez, la metodología de preparación de las muestras empleada para referenciar el dispositivo en el Laboratorio de Partículas del Grupo de Trabajo de Técnicas de Procedimientos Mecánicos de la Universidad Técnica de Dresden (*Arbeitsgruppe für Mechanische Verfahrenstechnik* de la *Technische Universität Dresden*), Alemania, fue básicamente la misma empleada en la Universidad de Talca, ya que se trató de duplicarla completamente. Por lo que se siguieron los mismos pasos y con equipos similares, de modo que el material particulado y el agua se pesaron empleando una balanza de laboratorio Sartorius Analytic AC 210S. La dispersión de las partículas en el agua se realizó mediante el empleo de un agitador magnético IKA, para continuarla utilizando un homogenizador mecánico de alta velocidad ULTRATurrax T50 y finalizarla mediante un equipo de ultrasonido modelo CV 33, fabricado por Bioblock Scientific. El índice de acidez de la suspensión se midió mediante un pH-Meter WTW Multilab 540 y se agregó hidróxido de potasio hasta alcanzar un pH del orden de 9,2. Además, se determinó el potencial Zeta de la suspensión a través de un espectrómetro de ultrasonido DT1200 fabricado por Dispersion Technology Inc. La eficacia de la dispersión realizada se determinó, a través de la medición de las distribuciones de tamaño del material particulado, empleándose para esto un espectrómetro láser HELOS, fabricado por Sympatec.

La Fig. 9, muestra la densidad acumulativa e incremental de tamaño para el sistema de partículas de CP 5000 medidas en Chile mediante el dispositivo de medición construido y los valores de referencia estandarizados, medidos en Alemania.

Como es posible apreciar, los resultados alcanzados por el prototipo de dispositivo de medición construido y el software desarrollado, permiten realizar una adecuada medición de la distribución de tamaño de partícula, ya que los valores absolutos de tamaño alcanzados y la tendencia de la densidades de tamaño de partícula, tanto la acumulativa como la incremental, corresponden adecuadamente a los valores nominales entregados por el fabricante del material de referencia, así como a los valores medidos por los equipos de control y a los valores suministrados por los métodos de referencia que se utilizaron durante el



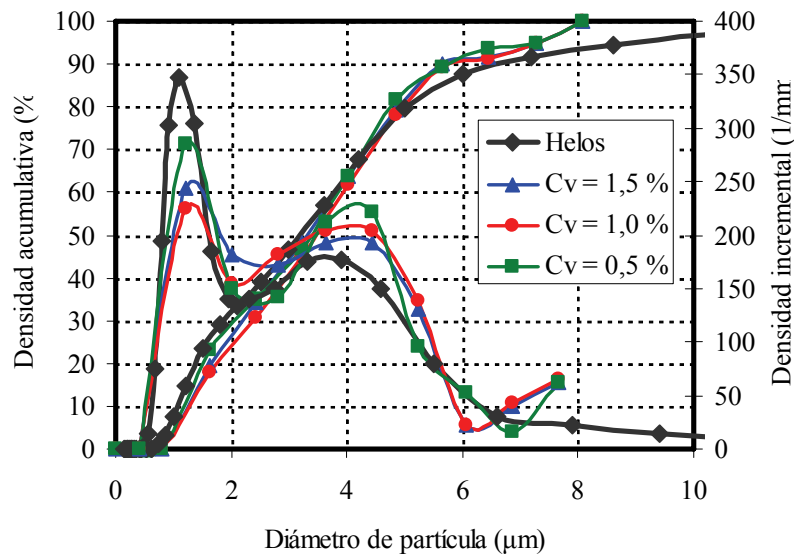


Fig. 9. Comparación de la densidad acumulativa e incremental de tamaño para el sistema de partículas de CP 5000 medidas mediante el dispositivo de medición construido y los valores de referencia.

desarrollo de los ensayos. De hecho aparece claramente la bimodalidad del material de calibración, en cuanto a los valores de punta de los modos el error cometido no supera el 5%, lo que se puede considerar como adecuado considerando el tipo de dispositivo desarrollado.

Cabe indicar que durante el proceso de sedimentación no se habrían presentado turbulencias e interferencias hidrodinámicas por efecto de las distintas velocidades de sedimentación que adquieren las partículas de diferente tamaño y masa que sedimentan simultáneamente.

Cabe indicar que los valores de tamaño de partícula entregados por la dispositivo de medición tienen una tendencia a ser mayores que la del material de referencia, esto puede deberse a que la dispersión del material particulado CP 5000, no fue perfectamente duplicada respecto de la que se realizó cuando se referenció el material en el Laboratorio de Partículas del Grupo de Trabajo de Técnicas de Procedimientos Mecánicos de la Universidad Técnica de Dresden (*Arbeitsgruppe für Mechanische Verfahrenstechnik* de la *Technische Universität Dresden*).

### 3. CONCLUSIONES

De los resultados alcanzados en el prototipo construido se pudo concluir que su aplicación para la evaluación de la distribución de tamaño de micro partículas fue no sólo eficiente, sino que fue precisa. Además, presentó las ventajas de su simplicidad de construcción, bajo costo, relativa facilidad de operación y con niveles de precisión satisfactorios, ya que el error medio cometido con el sistema de partículas CP 5000, reprodujo su modalidad y con un error medio menor a un 5%.

En cuanto a las desventajas del equipo, éstas radican en la larga duración de cada ensayo, lo que incrementa las posibilidades que éste sufra alteraciones externas, tales como la formación de corrientes convectivas por efecto de calor que ingrese a la suspensión o simplemente el efecto de vibraciones mecánicas sobre el dispositivo.

Cabe indicar que al realizarse los experimentos de acuerdo a la norma DIN 66111 [1], el utilizar un material de referencia calibrado y equipos de control externos como el microscopio electrónico y el espectrómetro láser, permite tener confianza en los valores alcanzados, ya que estos mostraron un muy buen nivel de reproducibilidad.

## REFERENCIAS

- [1] Norma DIN 66111 sobre Métodos de Sedimentación, DIN Norme 66111 Über Sedimentationsmethoden
- [2] Bernhardt, C., *Granulometrie*, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (1990)
- [3] Hoffmann, B., Husemann, K., "Sinkgeschwindigkeit kugelförmiger Teilchen in Suspension bei laminar bzw. turbulenter Umströmung – Exakte Lösung der Bewegungsgleichung", *Chem. Ing. Techn.*, **75**(3), 757-763 (2003)
- [4] Salinas-Salas, G., Stintz, M., Wessely, B., "Aplicación del método fotométrico para la detección de la distribución de tamaño de micro partículas", *Información Tecnológica*, **16**(4), 59-68 (2005)
- [5] Ripperger, S., Salinas-Salas, G., Stintz, M., Wessely, B., "Untersuchung der Sedimentation von nanoskaligen Partikeln Zentrifugalfeld", *F&S (Filterieren und Separieren)*, **16**(5), 230-236 (2002)
- [6] Babick, F., Salinas Salas, G., Sobisch, T., Lerche, D., "Particle interactions in dispersions of micro and nanoparticles", PARTEC 2007 – Word Congress on Particle Technology, Nürnberg (2007)

## UNIDADES Y NOMENCLATURA

$m_{particula}$	Masa de la partícula (kg)
$z$	Posición vertical (m)
$t$	Tiempo (s)
$W_{particula}$	Peso de la partícula (N)
$F_{flotación}$	Fuerza de flotación (N)
$F_{arrastre}$	Fuerza de arrastre viscoso (N)
$v_{St}$	Velocidad de Stokes (m/s)
$\rho_p$	Densidad media de la partícula (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_f$	Densidad media del fluido (kg/m <sup>3</sup> )
$g$	Aceleración de gravedad (m/s <sup>2</sup> )
$x$	Diámetro medio de la partícula (m)
$\mu$	Viscosidad dinámica del fluido (Pa·s)
$I$	Intensidad lumínica captada por la cámara con material particulado en la suspensión (bit)
$I_0$	Intensidad lumínica captada por la cámara para fluido sin material particulado (bit)
$K(x)$	Función coeficiente de extinción (-)
$A_p$	Área de la partícula específica de extinción (m <sup>2</sup> )
$C_v$	Concentración volumétrica de partículas presente en la suspensión (m <sup>3</sup> partículas/m <sup>3</sup> suspensión)
$L$	Ancho de la cubeta que contiene la suspensión (m)

## DEVELOPMENT OF LOW COST DEVICE FOR MEASUREMENT OF PARTICLE SIZE

**Abstract** – This document shows the development and results achieved by a device which was made and calibrated for measuring particle size distribution of micrometer-sized order, using for this standard components through sedimentary gravity which allow their use for the medium and small industry in developing countries to increase their competitiveness. The device calibration was made using standard techniques, through suspensions on the basis of calibrated glass spheres in water. The values given by the developed device are compared with those obtained by conventional methods such as laser spectroscopy, image analysis and analytical centrifugation. The results of measurements showed that the device is accurate in determining the size distribution of micro-systems particles.

**Keywords** – Measurement of size, standard components, micro particles.