

2.º  
12



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE FOTOGRAFIA  
DE SOMBRA (SHADOW - GRAPH) DE DOBLE  
EXPOSICION**

**T E S I S**

**Que para obtener el título de**

**F I S I C O**

**p r e s e n t a**

**Rafael Castrejón García**



**México, D. F.**

**Septiembre 1986**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE FOTOGRAFIA DE SOMBRA (SHADOW-GRAPH)  
DE DOBLE EXPOSICION.

1. INTRODUCCION.
2. ANTECEDENTES.
  - 2.1. Sistema típico utilizado.
  - 2.2. Profundidad de campo en los sistemas utilizados.
3. CONCEPTOS TEORICOS.
  - 3.1. Formación de la imagen e iluminación del objeto en Fotografía de Sombra.
  - 3.2. Derivación de la ecuación de profundidad de campo para Fotografía de Sombra.
  - 3.3. Significado de la profundidad de campo.
  - 3.4. Control de la profundidad de campo mediante el tamaño de la fuente luminosa.
4. CONSTRUCCION DEL SISTEMA.
  - 4.1. Características de diseño.
  - 4.2. Sistema óptico.
  - 4.3. Circuito de sincronía.
  - 4.4. Calibración de la profundidad de campo del sistema.
5. APLICACION EN EL ANALISIS DE UN AEROSOL.
  - 5.1. Introducción.
  - 5.2. Diámetro de partícula y densidad del aerosol.
  - 5.3. Velocidad de partícula.
6. CONCLUSIONES.
7. APENDICE. Detalles de construcción.
8. BIBLIOGRAFIA.

## 1. INTRODUCCION.

En el estudio de objetos en movimiento, una de las técnicas más frecuentemente utilizadas es la fotografía. Su utilidad se debe principalmente a que no interacciona con el objeto y permite observar posteriormente algunas de las características físicas del objeto, tales como forma, tamaño y velocidad (en este caso, al afirmar que no interacciona con el objeto; se refiere a que la técnica no altera estas características físicas).

Si se conoce el factor de amplificación de la fotografía, la forma y el tamaño se obtienen directamente. Para conocer la velocidad, es necesario que la imagen del objeto, a lo largo de su trayectoria, aparezca dos veces en la fotografía. Es decir, se lleve a cabo una doble exposición. Si se conoce el intervalo de tiempo entre las dos exposiciones y además el factor de amplificación, es posible calcular la velocidad del objeto. De hecho, la velocidad obtenida de esta manera, es la proyección del vector velocidad en el plano enfocado por el sistema.

La iluminación del objeto se puede realizar de dos maneras distintas; por iluminación directa, o por iluminación por la parte posterior. En el primer caso (figura 1.1) el objeto es iluminado, ya sea por luz natural o por luz artificial, de manera que la luz dispersada o reflejada por el mismo sea la que forme la imagen en la película de la cámara fotográfica. Tal es el caso de la técnica convencional de fotografía.

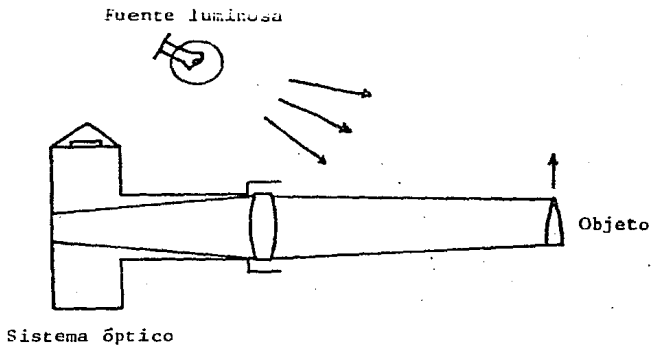


FIGURA 1.1. Iluminación directa. Fotografía convencional.

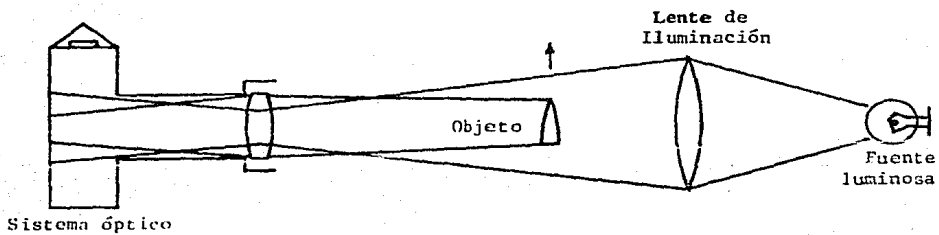


FIGURA 1.2. Iluminación en Fotografía De Sombra.

En el segundo caso (figura 1.2), el objeto es iluminado por su parte posterior mediante una lente condensadora, de tal manera, que la imagen que aparece en la película, es la imagen de su propia sombra o silueta. Esta sombra aparece contrastando sobre un campo iluminado, el cual se ha formado al sensibilizarse la película por la luz de iluminación. A esta técnica fotográfica se le conoce como Fotografía de Sombra (del inglés shadow-graph). La principal ventaja de esta técnica es que permite visualizar objetos de interés, cuyas propiedades o condiciones de iluminación, no hacen posible su visualización con la técnica convencional de fotografía.

Debido a la necesidad de obtener fotografías claras y precisas de objetos en movimiento, se requieren sistemas con tiempos de obturación muy pequeños. Por ejemplo, supóngase que existe la necesidad de fotografiar un objeto que se mueve a una velocidad de 50 m/seg. Si el objeto se observa a través de un instrumento óptico cuyo factor de amplificación es 3, la velocidad con la que se mueve la imagen del objeto sobre la película es entonces de 150 m/seg. Si el obturador tiene un tiempo de obturación de 100 microsegundos, el objeto fotografiado producirá en la película una imagen borrosa a lo largo de 1.5 cms. Es necesario entonces que el tiempo de obturación sea el mínimo posible para lograr "inmovilizar", en la película, la imagen del objeto en movimiento (en este caso inmovilizar se refiere al hecho de obtener una fotografía nítida del objeto, tal y como se obtendría si el objeto estuviera en reposo).

Los tiempos de obturación de las cámaras convencionales difícilmente son inferiores a 500  $\mu$ seg., lo que hace im

posible "inmovilizar" en la película la imagen del objeto en movimiento.

La alternativa es utilizar una lámpara de destello de corta duración, de modo que el tiempo de exposición sea determinado por la duración del destello luminoso.

Entre las lámparas más adecuadas para este propósito, se encuentra la del tipo de descarga eléctrica (comúnmente llamadas lámparas de chispa), ya que el destello luminoso tiene una duración de aproximadamente 500 nanosegundos ( $5 \times 10^{-7}$  seg.). Esta consiste fundamentalmente en un par de electrodos sobre los cuales se produce, a través de un gas inerte (argón por ejemplo), la descarga de energía eléctrica almacenada en un banco de condensadores. Lámparas de este tipo se fabrican comercialmente y es a veces conveniente, desde el punto de vista técnico y económico, adquirirlas en lugar de desarrollarlas y construirlas.

La fotografía de sombra tiene actualmente un gran número de aplicaciones. Se utiliza, por ejemplo, en aerodinámica, en mecánica de fluidos, en balística, etc. Recientemente ha sido desarrollada y utilizada por algunos investigadores <sup>1, 2, 3</sup>, particularmente, en el análisis de los aerosoles (sprays) producidos por los atomizadores en la industria termoeléctrica, quienes han aportado diversa literatura al respecto. Sin embargo, los aspectos teóricos involucrados, que en la literatura se mencionan; son en general poco detallados, lo que hace difícil el diseño y construcción de un sistema funcional y controlable con base en la literatura existente.

El objetivo de este trabajo es analizar los conceptos óp

ticos involucrados en la técnica de fotografía de sombra, particularmente el concepto de profundidad de campo, el cual a pesar de ser de gran importancia no ha sido bien establecido. La parte experimental de esta investigación ha consistido en el desarrollo y construcción de un sistema de fotografía de sombra de doble exposición, que ha sido probado y utilizado continuamente en el análisis de aerosoles producidos en bancos experimentales de atomización.



## 2. ANTECEDENTES.

### 2.1. Sistema típico utilizado.

La configuración del sistema generalmente utilizado y que se reporta en la literatura<sup>1,2,3</sup> se muestra en la figura 2.1. El plano sobre el cual se mueve el objeto se hace coincidir con el plano enfocado por la lente principal  $L_p$ . Esta lente forma la imagen del objeto sobre la película P.

La lente  $L_d$  forma una imagen real de la lámpara de destello  $D_2$  justamente en el lugar donde se encuentra la lámpara  $D_1$ . De esta forma, la iluminación producida tanto por  $D_1$ , como por  $D_2$  provienen, ópticamente, del mismo punto; en este caso, del lugar donde se encuentra  $D_1$ .

La luz proveniente de las lámparas de destello  $D_1$  y  $D_2$  es enviada hacia la lente  $L_p$  a través de la lente de iluminación  $L_i$  de manera que, la imagen de  $D_1$  (y por consiguiente la imagen de  $D_2$ ) se forme en el plano nodal de la lente  $L_p$ .

En el momento en que ocurren los destellos de las lámparas  $D_1$  y  $D_2$ , en los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  respectivamente, una doble imagen del objeto queda impresa en la película fotográfica. La separación ( $\Delta s$ ) entre cada una de las imágenes está determinada por la velocidad del objeto ( $V$ ), el intervalo de tiempo entre los destellos ( $\Delta t = t_2 - t_1$ ) y la amplificación ( $M$ ) de la fotografía. Es decir:

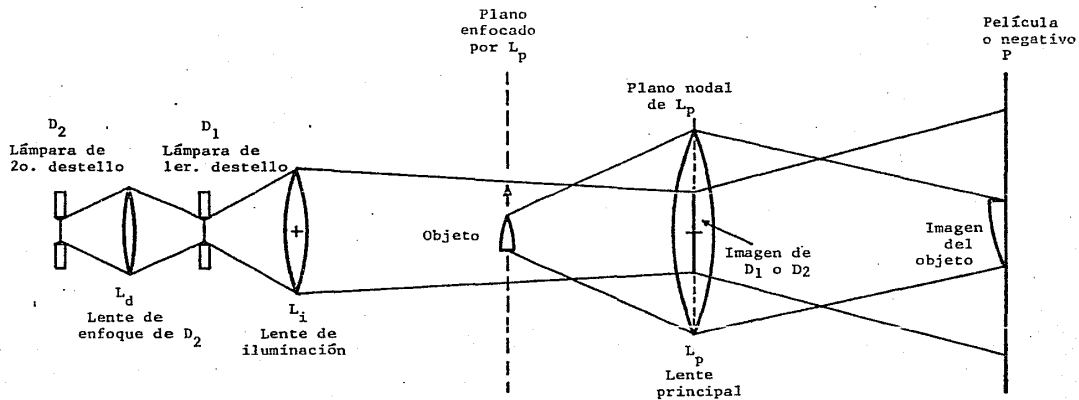


FIGURA 2.1. Configuración del sistema generalmente utilizado.

$$V = \frac{\Delta s}{M \Delta t} \quad (2.1)$$

## 2.2. Profundidad de campo en los sistemas utilizados.

En un sistema fotográfico, la profundidad de campo se define<sup>4</sup> como la zona anterior y posterior a la distancia a que se ha enfocado, en la que la pérdida de nitidez de la imagen del objeto es imperceptible. Esta pérdida de nitidez es gradual y aumenta conforme el objeto se aleja del plano enfocado, por lo que no es posible determinar un valor de la profundidad de campo a menos que se establezca un grado fijo de la pérdida de nitidez. Es decir, la profundidad de campo depende del grado de nitidez mínimo aceptado por el sistema de observación.

La profundidad de campo es un parámetro importante para la caracterización completa de un sistema fotográfico, ya que define, en forma cuantitativa, el volumen de observación (o volumen de exploración) del sistema.

En la literatura mencionada, se presentan, sin justificación alguna, ecuaciones para determinar la profundidad de campo ( $P_C$ ). A continuación se presentan algunos ejemplos,

$$P_C = 2 \left( \frac{f}{10^3} \right) \frac{f(m+1)}{d \text{ m}^2} \quad (2.2)^2$$

$$P_C = \frac{u}{1 - \frac{u}{d} \left[ \frac{f}{10^3} \right]} - \frac{u}{1 + \frac{u}{d} \left[ \frac{f}{10^3} \right]} \quad (2.3) 5$$

$$P_C = \frac{u^2 \left( \tan \frac{f}{1720} \right)}{d - u \left( \tan \frac{f}{1720} \right)} - \frac{u^2 \left( \tan \frac{f}{1720} \right)}{d + u \left( \tan \frac{f}{1720} \right)} \quad (2.4) 4$$

donde:

- f = longitud focal de la lente principal ( $L_p$ ).
- d = diámetro de la lente principal.
- m = factor de amplificación del sistema óptico.
- u = distancia de  $L_p$  al plano enfocado por el sistema.

En las ecuaciones anteriores, al término que aparece entre paréntesis ( $f/10^3$  ó  $\tan f/1720$ ) se le conoce como "círculo de confusión", y que algunos autores sugieren como el grado de nitidez mínima aceptable por el ojo humano promedio; mediante el cual, se calcula la  $P_C$  con los parámetros del sistema óptico.

Por otro lado, supóngase que se tiene un sistema óptico (este sistema es el que se desarrolla en el cap. 4), cuyas características son:

$$\begin{aligned} f &= 305 \text{ mm.} \\ d &= 34 \text{ mm.} \\ m &= 3 \\ u &= 406.7 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Al sustituir en las ecuaciones mencionadas se obtiene:

Según (2.2),  $P_C = 2.4$  mm.

Según (2.3),  $P_C = 9.7$  mm.

Según (2.4),  $P_C = 1.1$  mm.

Las ecuaciones conducen a resultados diferentes cuando se sustituyen los parámetros de algún sistema óptico dado. Esta incongruencia no permite seleccionar o determinar la ecuación adecuada.

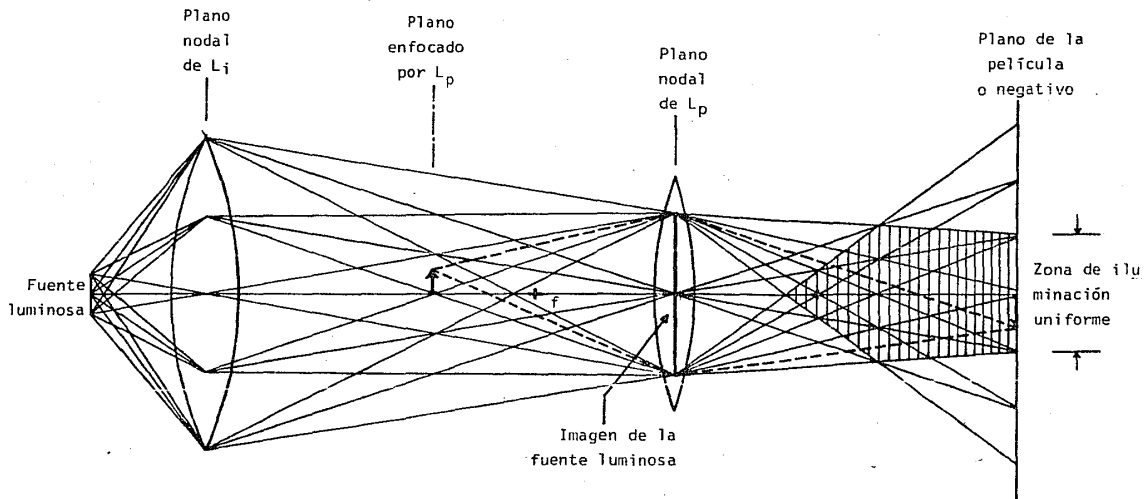
De cualquier forma, si alguna de las ecuaciones es válida en la técnica convencional de fotografía, es necesario de mostrar su validez en la técnica de fotografía de sombra. Este es uno de los objetivos del siguiente capítulo.

### 3. CONCEPTOS TEORICOS.

Para el diseño del sistema de fotografía de sombra (FS) ha sido necesario analizar los fundamentos en los cuales esta técnica se basa. En las siguientes secciones se presentan los principales resultados de este análisis.

#### 3.1. Formación de la imagen e iluminación del objeto en FS.

En la figura 3.1 (en ésta se han exagerado las dimensiones verticales) se han trazado, de acuerdo con las reglas de la óptica geométrica, las trayectorias de los rayos de iluminación y de formación de la imagen. Como se observa, el haz convergente de iluminación proveniente de la lente  $L_i$  intercepta al plano enfocado por  $L_p$ . Todos los rayos que emanan o pasan por un punto particular del plano enfocado son reunidos por la lente  $L_p$  en el punto correspondiente de su imagen (sobre la película o negativo), independientemente de la dirección con la que salieron. En otras palabras, si un objeto dentro del plano enfocado es luminoso (o refleja la luz, como en el caso de fotografía convencional, FC), todos los rayos que emanan de cada punto del mismo se reubican en los puntos correspondientes de su imagen y; si un objeto es iluminado, como en la técnica FS, la imagen de su sombra o silueta estará formada en la película, justamente en el lugar donde la imagen del objeto se formaría si éste fuera luminoso.



**FIGURA 3.1.** Trazo de rayos de formación de la imagen y de iluminación en Fotografía de Sombrá.

como resultado de lo anterior, se puede concluir que la formación de la imagen del objeto (por la lente  $L_p$ ) es independiente de la forma en que éste se ilumine, ya sea en FS o en FC.

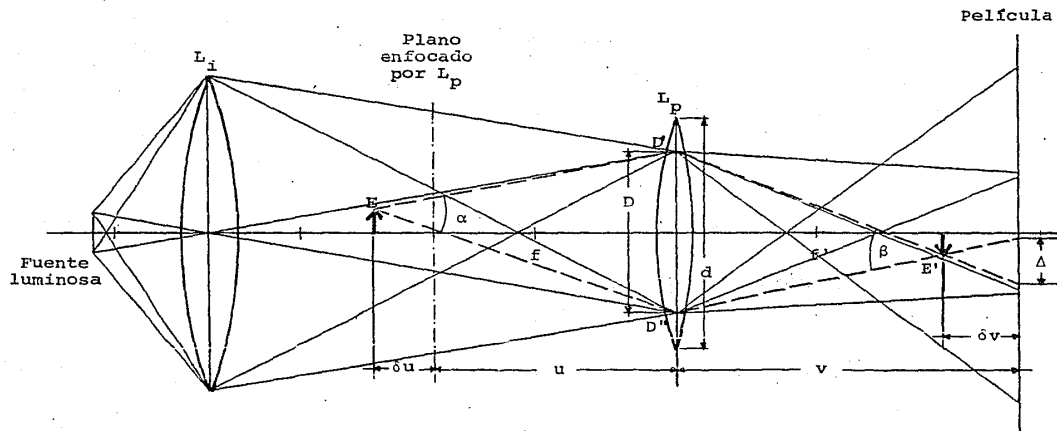
La iluminación del objeto se realiza con la lente  $L_i$ . Esta, enfoca la imagen de la fuente luminosa en el plano nodal de la lente  $L_p$ . La iluminación, así producida en la película, tiene una zona de intensidad máxima de forma circular. La intensidad en esta zona es uniforme (homogénea), y se localiza en el centro del plano de la película (véase la parte sombreada en la figura 3.1). Durante el diseño de un sistema de fotografía de sombra, es necesario tomar en cuenta que el área de esta zona de intensidad uniforme, debe cubrir en su totalidad la superficie del negativo (esta superficie está determinada por el formato del mismo); de esta forma, es posible obtener un campo uniformemente iluminado.

### 3.2. Derivación de la ecuación de profundidad de campo para FS.

Las ecuaciones que se muestran en la sección 2.3 relacionan la profundidad de campo con las características del sistema óptico. Sin embargo, su validez, tanto en la técnica FC como en la técnica FS, no se ha demostrado. Un procedimiento desarrollado aquí, para encontrar una ecuación válida, se presenta a continuación.

Considérese la figura 3.2. Esta muestra un objeto fuera de foco. El objeto se encuentra a una distancia  $\delta u$  del plano enfocado por la lente principal  $L_p$ , tal que





**FIGURA 3.2.** Trazo de rayos para un objeto fuera del plano enfocado.

su imagen se forma a una distancia  $-\delta v$  de la película. La imagen de la fuente luminosa está formada en el plano nodal de la lente  $L_p$  y tiene un diámetro  $D$ . Todos los rayos que pasan rozando el extremo  $E$  del objeto y que corresponden al límite de su silueta (o sombra) sólo pueden entrar a la lente  $L_p$  a través del círculo formado por la imagen de la fuente, o sea, del círculo de diámetro  $D$ . Los rayos extremos (o límites) son los que coinciden con los puntos  $D'$  y  $D''$  respectivamente, y el ángulo  $\alpha$  que los separa es el que causa la pérdida de nitidez  $\Delta$  de la imagen del objeto, en la película.

Para valores pequeños de  $\alpha$ ,

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{D}{u + \delta u},$$

si  $\delta u \ll u$ ,

$$\alpha \approx \frac{D}{u}. \quad (3.1)$$

Similarmente, para valores pequeños de  $\beta$ ,

$$\alpha \approx \frac{\Delta}{-\delta v} \quad (3.2)$$

Además,

$$\beta \approx \frac{D}{v - \delta v}.$$

Pero  $\delta u \ll u \Rightarrow \delta v \ll v$

$$\Rightarrow \beta \approx \frac{D}{v}. \quad (3.3)$$

Por otra parte, la amplificación  $m$  del sistema se expresa:

$$m = \frac{v' - \delta v}{u + \delta u}$$

$$\Rightarrow m = \frac{v}{u} \quad (3.4)$$

$$\Rightarrow m = \frac{v}{D} \frac{D}{u},$$

y con (3.1) y (3.3):

$$m = \frac{\alpha}{\beta} \quad (3.5)$$

Ahora, de la ecuación gaussiana de las lentes,

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{f} - \frac{1}{u} \quad (3.6)$$

Derivando con respecto a  $u$ , con  $f$  constante:

$$\frac{dv}{du} = - \frac{v^2}{u^2} \quad (3.7)$$

Por medio de la derivada se ha obtenido el cambio en  $v$  (distancia entre  $L_p$  y el negativo) producido por un incremento en  $u$  (distancia entre el plano enfocado y  $L_p$ ). Haciendo  $\delta v = dv$  y  $\delta u = du$  y sustituyendo el valor de  $m$  dado por la ec. (3.4) se tiene,

$$\delta u = - \frac{\delta v}{m^2} \quad (3.8)$$

Por otro lado, sustituyendo (3.1) y (3.2) en (3.5) y resolviendo para  $\delta v$ :

$$\delta v = -m u \frac{\Delta}{D},$$

y sustituyendo en (3.8):

$$\delta u = \frac{\Delta u}{Dm}. \quad (3.9)$$

Ahora, sustituyendo (3.4) en (3.6) y resolviendo para  $u$ :

$$u = \frac{f(m+1)}{m}, \quad (3.10)$$

y sustituyendo en (3.9),

$$\delta u = \frac{\Delta f(m+1)}{Dm^2}.$$

Finalmente, la profundidad de campo es la distancia  $\delta u$  anterior y posterior al plano enfocado (esto por supuesto, si  $\delta u \ll u$ ), entonces:

$$F_c - 2 \delta u = 2 \frac{\Delta f(m+1)}{Dm^2} \quad (3.11)$$

Es importante hacer notar que la suposición  $\delta u \ll u$  no introduce un error significativo. Con el sistema desarrollado en el capítulo 4, se encuentra:

$$\delta u = \frac{u}{200}.$$

### 3.3. Significado de la profundidad de campo.

En un sistema óptico determinado, con  $f$  y  $m$  conocidas, se tiene, según la ec. (3.11),

$$P_C = K \frac{\Delta}{D}.$$

La profundidad de campo se determina en cuanto se conocen  $D$  (el diámetro de la imagen de la fuente luminosa al formarse sobre la lente principal  $L_p$ ) y el valor de  $\Delta$  (grado de nitidez mínimo aceptable por el sistema con el cual se observa o analiza la fotografía).

Nótese el parecido de la ec. (3.11) con la ec. (2.2). En esta última, el grado de nitidez se considera con un valor igual a  $f/10^3$ , mientras que en (3.11), el grado de nitidez ( $\Delta$ ) no ha sido aún determinado.

También es importante hacer notar otra diferencia: en la ec. (2.2), la profundidad de campo está determinada por el diámetro o abertura de la lente ( $d$ ); mientras que en la ec. (3.11), la profundidad de campo está determinada por  $D$ , independientemente del valor que tenga  $d$ , siempre y cuando  $D \leq d$ . Si  $D > d$ , los rayos extremos (o límites) que causan la pérdida de nitidez (sección 3.2) son entonces restringidos por  $d$ .

En otras palabras, en fotografía de sombra:

$$\begin{array}{l} \text{Si } D > d, \\ \text{y,} \end{array} \quad \begin{array}{l} P_C = 2 \frac{\Delta f (m + 1)}{d m^2} \\ \text{si } D \leq d, \\ P_C = 2 \frac{\Delta f (m + 1)}{D m^2} \end{array}.$$

### 3.3. Significado de la profundidad de campo.

En un sistema óptico determinado, con  $f$  y  $m$  conocidas, se tiene, según la ec. (3.11),

$$P_C = K \frac{\Delta}{D}.$$

La profundidad de campo se determina en cuanto se conocen  $D$  (el diámetro de la imagen de la fuente luminosa al formarse sobre la lente principal  $L_p$ ) y el valor de  $\Delta$  (grado de nitidez mínimo aceptable por el sistema con el cual se observa o analiza la fotografía).

Nótese el parecido de la ec. (3.11) con la ec. (2.2). En esta última, el grado de nitidez se considera con un valor igual a  $f/10^3$ , mientras que en (3.11), el grado de nitidez ( $\Delta$ ) no ha sido aún determinado.

También es importante hacer notar otra diferencia: en la ec. (2.2), la profundidad de campo está determinada por el diámetro o abertura de la lente ( $d$ ); mientras que en la ec. (3.11), la profundidad de campo está determinada por  $D$ , independientemente del valor que tenga  $d$ , siempre y cuando  $D \leq d$ . Si  $D > d$ , los rayos extremos (o límites) que causan la pérdida de nitidez (sección 3.2) son entonces restringidos por  $d$ .

En otras palabras, en fotografía de sombra:

$$\begin{array}{ll} \text{Si } D > d, & P_C = 2 \frac{\Delta f (m + 1)}{d m^2} \\ \text{y, si } D \leq d, & P_C = 2 \frac{\Delta f (m + 1)}{D m^2}. \end{array}$$

En ambos casos es posible obtener y modificar el valor de la profundidad de campo. Sin embargo, en el primer caso, cualquier modificación en el valor de  $d$  (por ejemplo, con un diafragma o pupila) trae consigo una alteración en la cantidad de luz que recibe el sistema; cambiando entonces las condiciones de iluminación. En el segundo caso, es posible modificar la  $P_c$ , modificando  $D$  en el intervalo:  $D_{\min} < D \leq d$ , sin alterar las condiciones de iluminación del sistema ( $D_{\min}$  es el valor mínimo, posible de obtener, del diámetro de la imagen de la fuente luminosa). Esto será tratado en la siguiente sección.

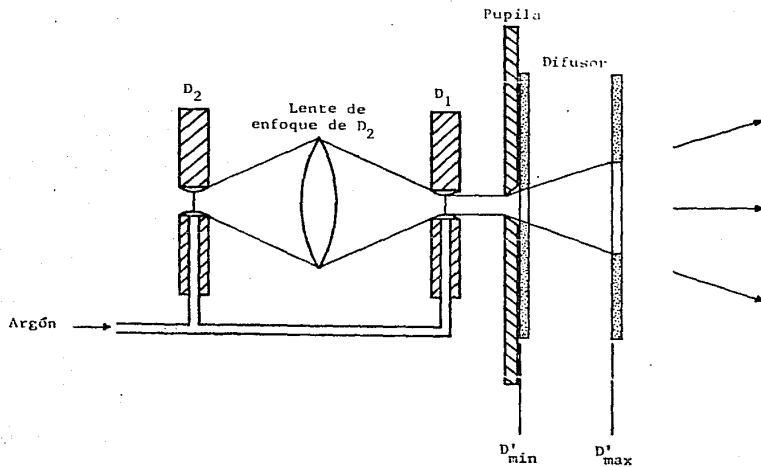
#### 3.4. Control sobre la Profundidad de Campo.

Se ha señalado, en la sección anterior, que para un valor fijo de  $\Delta$ , la  $P_c$  varía en forma inversamente proporcional al diámetro  $D$  de la imagen de la fuente luminosa. Entonces, al modificar este diámetro, se modifica la  $P_c$  del sistema.

La figura 3.3 muestra el dispositivo, aquí desarrollado, para cambiar el tamaño de la fuente luminosa y por consiguiente el valor de  $D$ .

El dispositivo consiste, básicamente, de una placa de vidrio finamente esmerilado, la cual es iluminada por el destello de las lámparas de chispa ( $D_1$  o  $D_2$ ) a través de la pupila. El diámetro de la zona iluminada en la placa de vidrio o difusor, depende de la distancia a la que se encuentra con respecto de la pupila. Esta zona iluminada, de forma circular, es ahora la fuente luminosa. Median-

ESCALA 1:1.



**FIGURA 3.3.** Dispositivo para cambiar la profundidad de campo. El difusor se muestra en dos distintas posiciones. Los diámetros, en estas posiciones, de la zona iluminada en el difusor son:  $D'_{min}=4.7$  mm y  $D'_{max}=22.7$  mm, y corresponden a los dos diámetros de la imagen de la fuente:  $D_{min}=7$ mm y  $D_{max}=34$  mm.



te experimentos con diferentes diámetros del orificio de la pupila se ha encontrado que el valor más adecuado, en cuanto a la iluminación del sistema (sensibilidad de la película), es de 4 mm.

Este método para variar la  $P_C$  es el más adecuado, pues la cantidad de luz que llega al sistema fotográfico, a través de la imagen de la fuente luminosa, está determinada por el diámetro del orificio de la pupila y éste, permanece constante. Por lo tanto, no es necesario cambiar las condiciones del sistema, como la intensidad de la fuente luminosa o la sensibilidad de la película. Recuerdese que en este método;  $D \leq d$ , por lo que la ecuación válida para  $P_C$  es (3.11).

#### 4. CONSTRUCCION DEL SISTEMA.

##### 4.1. Características de diseño.

El sistema se diseña según los fines específicos para los cuales se va a utilizar. En general, los parámetros que son necesarios considerar para el diseño del sistema son los siguientes.

- a. Velocidad del objeto ( $V$ ). Determina el intervalo de tiempo en el cual deben ocurrir, consecutivamente, los destellos de las lámparas. El objeto debe encontrarse dentro del campo de visión del sistema óptico durante la ocurrencia de los dos destellos. Véase la ecuación (2.1).
- b. Distancia de trabajo ( $u$ ). Es la distancia entre el objeto y la lente principal, determina el grado de acercamiento deseable o posible al objeto. Su valor está relacionado con la amplificación ( $m$ ) del sistema y la distancia entre la lente principal y la película ( $v$ ). Véase la ec. (3.4).
- c. Lente principal ( $L_p$ ). Su diámetro ( $d$ ) determina el diámetro máximo de la imagen de la fuente luminosa y en consecuencia, la profundidad de campo mínima del sistema (para algún valor dado de  $\Delta$ ). Su distancia focal ( $f$ ), determina la relación entre  $u$  y  $v$ . Véase la ecuación (3.6).

- d. Luminosidad del sistema. Es determinada por la intensidad del destello luminoso de la lámpara. La fracción de luz que entra al sistema fotográfico depende del diámetro de la lente de iluminación ( $L_1$ ). Ver figura 3.1.

#### 4.2. Sistema Óptico.

Supóngase que para una aplicación dada, por ejemplo, la que se realiza en el capítulo 5 de este trabajo, son necesarias dos amplificaciones diferentes:

$$m_1 = 1 \text{ y } m_2 = 3.$$

Ahora, supóngase también, que se posee una lente de alta calidad (libre de aberraciones). Por ejemplo, la APO-NIKKOR 305, cuyas características son:

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| Distancia focal, (f): | 305.0 mm. |
| Diámetro, (d):        | 34.0 mm.  |

Entonces, de las ecuaciones (3.10) y (3.4) se tiene,

$$u = f \left( 1 + \frac{1}{m} \right)$$

$$\text{y, } v = m u,$$

con las cuales, al sustituir los valores de  $m$  y  $f$  arriba mencionados, se obtienen las siguientes dos configuraciones:

AMPLIFICACION      DISTANCIA DE TRABAJO      DISTANCIA A LA PELICULA

|   |                           |                          |
|---|---------------------------|--------------------------|
| 1 | $u_1 = 610.0 \text{ mm.}$ | $v_1 = 610 \text{ mm.}$  |
| 3 | $u_2 = 406.7 \text{ mm.}$ | $v_2 = 1220 \text{ mm.}$ |

Las figuras 4.1 y 4.2 muestran las configuraciones ópticas respectivas.

Por otra parte, es necesario establecer para el sistema una profundidad de campo mínima. Esta, está determinada por el diámetro máximo que puede alcanzar la imagen de la fuente luminosa formada por la lente de iluminación. El diámetro máximo es justamente el diámetro de la lente principal. Es decir,

$$D_{\max} = d = 34 \text{ mm.}$$

Es necesario considerar que la distancia ( $v_i$ ) entre la lente de iluminación y la lente principal debe permitir la colocación del dispositivo o medio por el cual se moverá el objeto de interés (en algún caso, este medio puede ser el aire libre). En este caso, para los fines en que se va a utilizar este sistema, se considera apropiado el siguiente valor:

$$v_i = 800 \text{ mm.}$$

En el mercado nacional, se ha adquirido una lente biconvexa simple cuyas características son:

|                            |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| diámetro,                  | $(d_i) = 110 \text{ mm.}$ |
| distancia focal, ( $f_i$ ) | $= 320 \text{ mm.}$       |

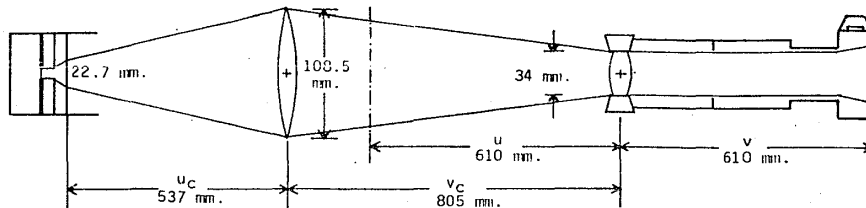


FIGURA 4.1. Configuración para  $m = 1$ .

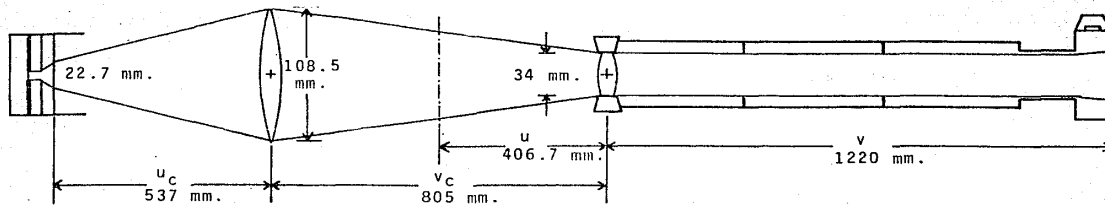


FIGURA 4.2. Configuración para  $m = 3$ .

Esta lente, aunque no es de gran calidad, produce imágenes satisfactorias de la fuente luminosa. Su falta de calidad, no influye en ninguna forma, en la calidad de la imagen del objeto de interés, ya que ésta sólo depende de la lente principal  $L_p$  (ver sección 3.1).

Sustituyendo los valores de  $v_i$  y  $f_i$  en la ec. (3.4) se obtiene:

$$u_i = 533 \text{ mm.}$$

La posición de la lente  $L_i$  y los valores  $u_i$  y  $v_i$  se muestran también en las figuras 4.1 y 4.2.

La intensidad luminosa producida por este sistema de i iluminación es suficiente para excitar película con sensibilidad de ASA 400 sin llegar a la saturación. Es decir, preservando las distintas tonalidades grises.

#### 4.3. Circuito de sincronía.

Para hacer posible la fotografía con doble exposición del objeto, por medio de este sistema, es necesario realizar los siguientes eventos:

1. Disparo del obturador de la cámara fotográfica.
2. Retardo para la sincronía de los destellos.
3. Disparo de la primera lámpara de destello.
4. Disparo de la segunda lámpara de destello.

Cada uno de estos eventos se controlan mediante pulsos eléctricos. Es por tanto necesario, el diseño y construcción de un circuito electrónico que realice, en el tiempo oportuno, la secuencia y duración de estos pulsos.

Supóngase que se conoce, ~~en forma aproximada,~~ la velocidad del objeto,

$$v = 50 \text{ m/seg.}$$

Este se fotografía, a través de un sistema óptico con amplificación:

$$m = 3.$$

La cámara fotográfica utiliza una película con formato de 24 mm X 35 mm, es deseable entonces que las dos impresiones del objeto estén separadas una distancia:

$$\Delta s = 10 \text{ mm.}$$

Con los valores de  $v$ ,  $m$  y  $\Delta s$  y la ecuación (2.1) se tiene:

$$\Delta t = 67 \text{ } \mu\text{seg.}$$

Por tanto, un orden de magnitud adecuado para  $\Delta t$ , se puede considerar como:

$$\Delta t \approx 100 \text{ } \mu\text{seg.}$$

Este valor de  $\Delta t$ , es el intervalo de tiempo que separa

los dos destellos.

La figura 4.3 muestra la forma en que suceden los pulsos eléctricos y la forma en que se producen los eventos. Su descripción es la que sigue.

**Pulso para la cámara.** Activa el obturador de la cámara fotográfica y éste permanece abierto por el propio mecanismo de la cámara. La velocidad de obturación de la cámara debe seleccionarse, de forma que permita la ocurrencia de los dos destellos. En este caso, se obtienen buenos resultados con la posición 1/30 (33.3 miliseg.).

**Pulso de Retardo.** No tiene efecto sobre los instrumentos. Su función es proporcionar el tiempo suficiente para sincronizar la ocurrencia de los destellos.

**Pulso para el destello 1.** Dispara la primera lámpara de destello ( $D_1$ ) y da el tiempo calculado ( $\Delta t = 100 \mu\text{seg.}$ ), para la ocurrencia del segundo destello.

**Pulso para el destello 2.** Dispara la segunda lámpara de destello ( $D_2$ ).

En la parte inferior de la figura 4.3, se observa la sincronía de los eventos, lograda con los pulsos descritos.

Como base para el diseño del circuito que efectúe los pulsos eléctricos de sincronía, se ha utilizado un multi vibrator monoestable. La duración del pulso, proporcionado por este multivibrador, se controla con los valores de capacidad y resistencia de los componentes que forman



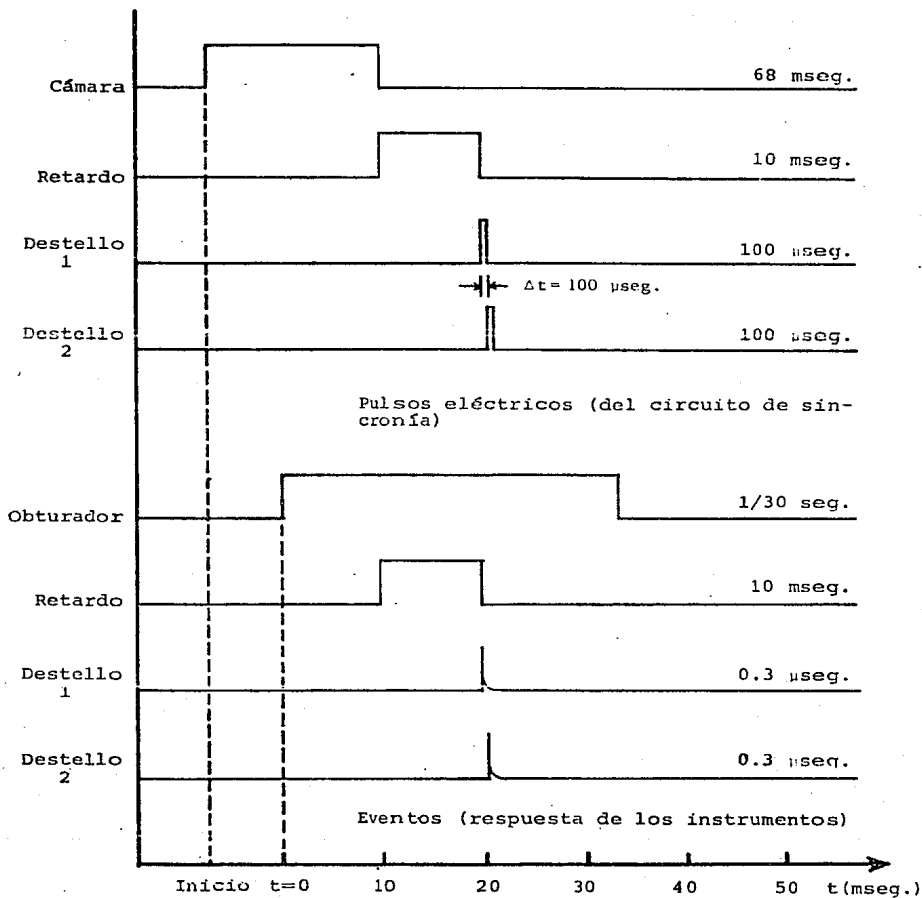


FIGURA 4.3. Diagrama de pulsos y eventos.

parte del mismo. La relación<sup>6</sup>,

$$\Delta t = \ln 2 (RC), \quad (4.1)$$

determina la duración del pulso. C es el valor de la capacidad en farads y R es el valor de la resistencia en ohms.

El circuito integrado número SN74121 es un multivibrador monoestable programable con los valores R y C de los componentes externos.

La figura 4.4 muestra el diagrama del circuito de sincronía. Consiste básicamente de cuatro circuitos SN74121 colocados en serie, de forma que el pulso de salida (pata número 6) del primero, excita la entrada (pata número 3) del segundo. Igual ocurre con los siguientes. El pulso de inicio se efectúa directamente sobre el circuito IC1, en la pata número 5, a través de un interruptor manual. El condensador C1 amortigua el ruido eléctrico producido por el contacto del interruptor.

Las salidas de cada monoestable alimentan los transistores Q1 a Q8. Los transistores Q1, Q3, Q5 y Q7 efectúan el disparo del dispositivo respectivo; mientras que Q2, Q4, Q6 y Q8 encienden los diodos luminosos (LED'S) L1, L2, L3 y L4, que indican la existencia del pulso correspondiente.

La duración de los pulsos producidos por los monoestables está determinada por los valores de RT, RVT y CT; RT es una resistencia de valor fijo conectada en serie

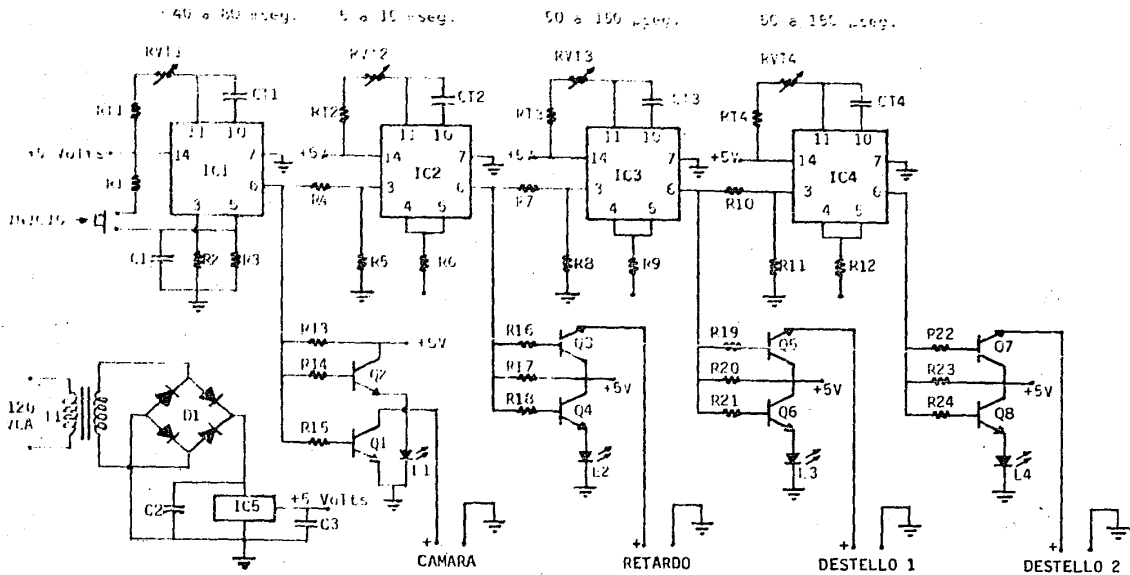


FIGURA 4.4. Diagrama esquemático del circuito de sincronía.

con una resistencia variable RVT. Utilizando la ecuación (4.1), se obtiene:

$$\Delta t = CT(RT + RVT) \ln 2. \quad (4.2)$$

La tabla 1 muestra los valores calculados con la ecuación (4.2). Estos corresponden a los pulsos mostrados en la figura 4.3.

| PULSO      | CT<br>( $\mu$ F) | RT<br>(ohms)      | RVT<br>(ohms)       | DURACION DEL PULSO<br>(mseg) |
|------------|------------------|-------------------|---------------------|------------------------------|
| CAMARA     | 5.8              | $10^4$            | $0 - 10^4$          | 40 - 80                      |
| RETARDO    | 3.1              | $2.2 \times 10^3$ | $0 - 5 \times 10^3$ | 5 - 15                       |
| DESTELLO 1 | 0.031            | $2.2 \times 10^3$ | $0 - 5 \times 10^3$ | 0.05 - 0.15                  |
| DESTELLO 2 | 0.031            | $2.2 \times 10^3$ | $0 - 5 \times 10^3$ | 0.05 - 0.15                  |

TABLA 1. Valores calculados de duración del pulso eléctrico.

Los valores definitivos de la duración de los pulsos se ajustan, en forma precisa, con las resistencias variables RVT's y el auxilio de un osciloscopio o contador de pulsos. Para la aplicación de este sistema, los valores son los que se muestran en la figura 4.3.

La figura 4.5 muestra los diferentes instrumentos que componen el sistema, interconectados a través del circuito de sincronía. Los detalles y características de los instrumentos, tanto construidos como adquiridos, se muestran en el APENDICE.

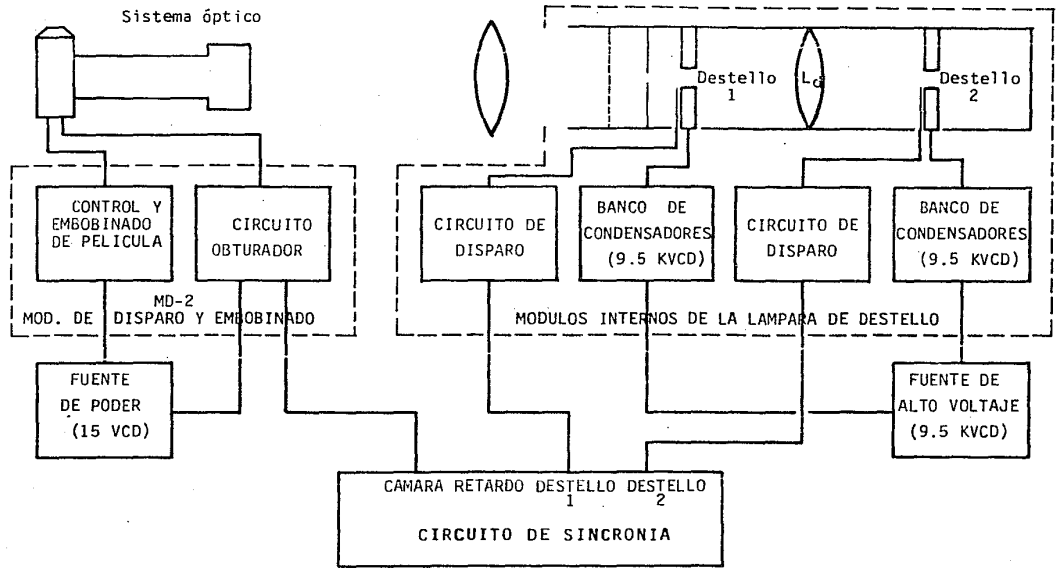


FIGURA 4.5. Diagrama a bloques del sistema.

#### 4.4. Calibración de la profundidad de campo del sistema.

Como se ha mencionado en la sección 3.3, para determinar la profundidad de campo de este sistema, es necesario establecer el grado de nitidez  $\Delta$ . Una vez establecido éste, la profundidad de campo se calcula directamente con la ecuación (3.11). El problema es entonces, establecer un valor apropiado de  $\Delta$ .

Si en un sistema óptico se establece un valor fijo de referencia  $\Delta_0$ , se puede afirmar:

$$\Delta \leq \Delta_0 \Rightarrow \delta u \leq \delta u_0;$$

el objeto se encuentra dentro de la distancia definida por la profundidad de campo del sistema.

$$\Delta > \Delta_0 \Rightarrow \delta u > \delta u_0;$$

el objeto se encuentra fuera de la distancia definida por la profundidad de campo del sistema.

Para establecer un valor apropiado  $\Delta_0$  es necesario tomar en cuenta los siguientes puntos:

El valor debe ser adecuado a las dimensiones del objeto. Es decir,  $\Delta_0$  no puede ser igual o mayor que las dimensiones de la imagen del objeto de interés. Esto restringe el valor máximo de  $\Delta_0$ .

El valor debe ser posible de observarse a través del sistema con el cual se analiza la fotografía. Aunque

existen instrumentos capaces de analizar este tipo de fotografías con resolución muy superior a la del ojo humano (Iac, Quantimet, Microvideomat, etc. Estos instrumentos digitalizan y procesan, con el auxilio de una computadora, la imagen de la fotografía obtenida con una cámara de TV); en este caso, la fotografía se analiza visualmente. Este punto restringe, por lo tanto, el valor mínimo de  $\Delta_0$ .

Para la calibración de la profundidad de campo del sistema, se realizó una serie de 25 fotografías, utilizando, en cada una de ellas, un solo destello y un diámetro máximo de la imagen de la fuente luminosa:

$$D_{\max} = d = 34 \text{ mm.}$$

En la figura 4.6 se muestra el arreglo experimental utilizado en el procedimiento. Las fotografías se realizaron utilizando como objeto una navaja de afeitar. El filo de ésta actúa como límite entre la zona iluminada y la zona de sombra (la propia navaja). Cada fotografía corresponde a una  $\delta u$  diferente, la cual aumenta gradualmente en intervalos de 0.65 mm. En la primera fotografía la navaja se encuentra en el plano enfocado, es decir,  $\delta u_1 = 0$ ,  $\Delta_1 = 0$ . Los incrementos en  $\delta u$  y su correspondiente  $\Delta$ , para esta serie de fotografías se listan en la tabla 2.

En la figura 4.7 se ilustran las fotografías. En éstas se observa la forma en que la pérdida de nitidez ( $\Delta$ ) aumenta conforme aumenta la distancia  $\delta u$ .

Si en esta serie de fotografías existe un  $\Delta_n$  apropiado, tal que  $\Delta_n = \Delta_0$ ; sería necesario medirlo directamente para conocer su valor. Este procedimiento es difícil ya que se

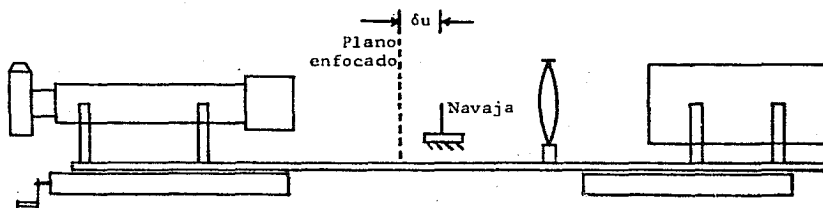


FIGURA 4.6. Sistema óptico en fotografías de calibración.

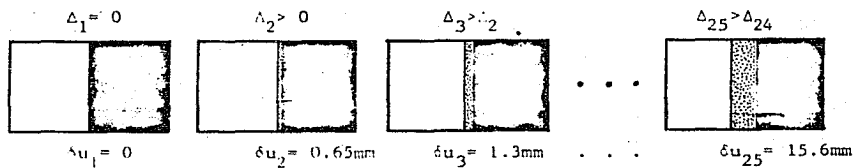


FIGURA 4.7. Ilustración de las fotografías de calibración.



| No. de fotografia | $\delta u$ (mm) | $\Delta$      |
|-------------------|-----------------|---------------|
| 1                 | 0.0             | $\Delta_1$    |
| 2                 | 0.65            | $\Delta_2$    |
| 3                 | 1.30            | $\Delta_3$    |
| 4                 | 1.95            | $\Delta_4$    |
| .                 | .               | .             |
| .                 | .               | .             |
| .                 | .               | .             |
| 25                | 15.60           | $\Delta_{25}$ |

TABLA 2. PRIMERA SERIE DE FOTOGRAFÍAS DE CALIBRACION  
 $D_{\max} = 34$  mm.

| No. de fotografia | $\delta u$ (mm) | $\Delta$       |
|-------------------|-----------------|----------------|
| 1                 | 0.0             | $\Delta'_1$    |
| 2                 | 0.65            | $\Delta'_2$    |
| 3                 | 1.30            | $\Delta'_3$    |
| 4                 | 1.95            | $\Delta'_4$    |
| .                 | .               | .              |
| .                 | .               | .              |
| .                 | .               | .              |
| 25                | 15.60           | $\Delta'_{25}$ |

TABLA 3. SEGUNDA SERIE DE FOTOGRAFÍAS DE CALIBRACION.  
 $D_{\max} = 7$  mm.

involucraría un error considerable producido precisamente por la falta de definición de  $\Delta_n$  (en sistemas automáticos de análisis de fotografías, como los anteriormente mencionados, esto no constituye mayor problema). Sin embargo, se puede aprovechar la capacidad natural de resolución del ojo humano para discernir, de entre las fotografías de la serie, la que empieza a exhibir un  $\Delta_n$  perceptible. Es decir, la que tiene un  $\Delta_n$  mínimo perceptible por el ojo ( $\Delta_{n,\min}$ ).

Si la observación de la fotografía es a través de algún dispositivo que la amplifique; por ejemplo, un proyector, microscopio, etc. Entonces,

$$\Delta_0 = \frac{\Delta_{n,\min}}{M}, \quad (4.3)$$

siendo  $M$ , la amplificación del dispositivo de observación.

Las fotografías (negativos) de la serie fueron proyectadas en una pantalla con una amplificación  $M = 7.2$  y analizadas por un observador  $X$  situado a una distancia conocida de la pantalla; en este caso, junto al proyector. El objetivo del proyector es facilitar al observador, el análisis visual de las fotografías.

Mediante el análisis, el observador percibió que la falta de nitidez de la imagen de la navaja iniciaba en la fotografía número 4. O sea,

$$\Delta_{n,\min} = \Delta_4$$

que corresponde, según la tabla 2, a:

$$\delta u_4 = 1.95 \text{ mm.} \quad (4.4)$$

Por lo tanto, la profundidad de campo mínima del sistema, con el observador X es,

$$P_{c,\min} = 2 \delta u_4 = 3.90 \text{ mm.} \quad (4.5)$$

Resolviendo la ecuación (3.11) para  $\Delta$  y sustituyendo los valores de  $f$ ,  $m$ ,  $D_{\max}$  y  $P_c$ , se obtiene:

$$\Delta_0 = 0.5 \text{ mm.} \quad (4.6)$$

Este es el valor real de la pérdida de nitidez en la película o negativo, perceptible por el observador.

La amplificación del proyector, con respecto a la fotografía original (negativo), es  $M = 7.2$ . Entonces, con la ecuación (4.3),

$$\Delta_{n,\min} = 3.6 \text{ mm.}$$

Este es el grado de nitidez mínimo, perceptible por el observador, en la pantalla, analizando la fotografía amplificada por el proyector.

Se puede decir ahora, que la profundidad de campo del sistema ha sido calibrada con respecto de un observador. En este caso ha sido la profundidad de campo mínima, ya que se ha utilizado el valor  $D_{\max} = 34 \text{ mm.}$  Con idénticas condiciones se deben analizar posteriormente las fotografías obtenidas durante la aplicación del sistema

fotográfico en algún experimento dado. El observador podrá discernir si el o los objetos fotografiados se encuentran dentro de la profundidad de campo, con solo observar su  $\Delta_{n,\min}$  asociado. En otras palabras, si  $\Delta_{n,\min}$  es imperceptible, el objeto se considera dentro de la  $P_C$ ; si  $\Delta_{n,\min}$  es perceptible, el objeto se considera fuera de la  $P_C$ .

Como una comprobación a este método de calibración, se realizó una segunda serie de 25 fotografías manteniendo las mismas condiciones, excepto, el diámetro de la imagen de la fuente luminosa, que en este caso fue el mínimo:

$$D_{\min} = 7 \text{ mm.}$$

La tabla 3 lista los incrementos en  $\delta u$  y su correspondiente  $\Delta$ , para esta segunda serie de fotografías. Esta serie fue sometida al análisis del observador X, quien observó,

$$\Delta_{n,\min} = \Delta'_{14}$$

que corresponde, según la tabla 3, a:

$$\delta u_{14} = 8.45 \text{ mm.},$$

lo que implica que,

$$P_{C,\max} = 16.9 \text{ mm.} \quad (4.7)$$

Este resultado indica que la profundidad de campo ha cambiado radicalmente con respecto a la obtenida en la primera serie (ec. (4.5)). Ahora, de la ecuación (3.11), pa

ra  $f$  y  $m$  constantes, y suponiendo también la misma capacidad de resolución del observador ( $\Delta_{n,\min} = \text{cte}$ , implica  $\Delta_0 = \text{cte}$ ) se obtiene:

$$\frac{P_{c,\max}}{P_{c,\min}} = \frac{\delta u_{14}}{\delta u_4} = \frac{D_{\max}}{D_{\min}}$$

Calculando los cocientes, con los valores correspondientes (ecs. (4.5) y (4.7)):

$$\frac{P_{c,\max}}{P_{c,\min}} = 4.3$$

$$\frac{D_{\max}}{D_{\min}} = 4.86$$

La correspondencia entre ambos valores (considerando los errores involucrados), indica que la profundidad de campo del sistema ha cambiado en la misma proporción en que se ha cambiado el diámetro de la imagen de la fuente luminosa; esto, sin alteración en las condiciones de iluminación. Este resultado concuerda con lo mencionado en la sección 3.4.

## 5. APLICACION EN EL ANALISIS DE UN AEROSOL.

### 5.1. Introducción.

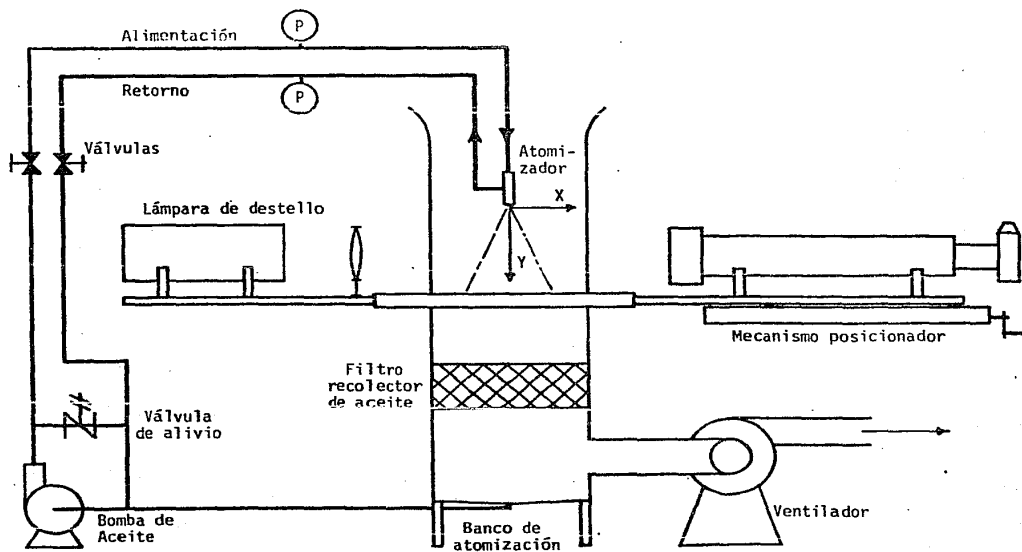
El estudio de los aerosoles (aquí aerosol o "spray" se entiende como una nube de pequeñas gotas o partículas), es de gran importancia debido a su utilización en la generación de energía.

Aproximadamente el 70% de la energía eléctrica que se produce en el país proviene de centrales termoeléctricas. En éstas, el combustible se atomiza para producir un aerosol que asegure un buen mezclado con el aire de combustión y se obtenga por lo tanto una combustión eficiente.

El conocimiento de las características de los aerosoles, producidos por los diferentes atomizadores; como son: la distribución de tamaño de gotas, velocidad de las gotas y densidad del aerosol (número de gotas o partículas por unidad de volumen); son indispensables en los estudios encaminados a optimizar la combustión.

Uno de los objetivos, para el cual fue diseñado y construido este sistema, es su aplicación en el estudio de estos aerosoles. Aquí, no se intenta estudiar propiamente el aerosol, sino demostrar la funcionabilidad y utilidad del sistema.

La figura 5.1 muestra el arreglo experimental utilizado. El banco de atomización está situado entre



**FIGURA 5.1.** Arreglo experimental utilizado para la fotografía del aerosol.

la lente principal ( $L_p$ ) y la lente de iluminación ( $L_i$ ). El sistema óptico, las lámparas y la lente de iluminación se encuentran sujetos al mecanismo posicionador. Con este mecanismo es posible modificar la distancia (eje x) entre el sistema óptico y el aerosol. La altura (eje y) entre el atomizador y el eje óptico es también posible de modificarse.

El aerosol se produce al forzar, mediante la bomba, el paso del aceite simulador a través del atomizador. Este aceite simula determinado tipo de combustible en términos de su viscosidad y densidad.

El ventilador produce una corriente de aire en el sentido del aerosol, para conducir a éste al filtro recolector de aceite y evitar que regrese a la atmósfera.

La fotografía 1 muestra el aerosol fotografiado con este sistema. Las condiciones bajo las cuales fue realizada la fotografía se muestran en la tabla 4.

## 5.2. Diámetro de partícula y densidad del aerosol.

Las fotografías 2 a la 8 muestran las partículas en diferentes zonas del aerosol. Las fotografías fueron tomadas a una distancia  $y = 30$  mm por debajo del atomizador, iniciando en la orilla del aerosol ( $x = 12$  mm) y avanzando 2 mm en cada fotografía, hasta el centro del aerosol ( $x = 0$ ). Las condiciones en las cuales se realizaron las fotografías se muestran en la tabla 5.

El diámetro de las partículas es posible de medirse



tomando en cuenta la amplificación involucrada al realizar la impresión. El diámetro real  $\phi_r$  está dado por,

$$\phi_r = \frac{\phi_i}{m M_i}$$

con:

$\phi_i$  = diámetro de la partícula en la impresión.

$m$  = amplificación del sistema óptico.

$M_i$  = amplificación de la impresión.

En este caso,

$$\phi_r = \frac{\phi_i}{21.6}$$

Por otra parte, si se conocen las dimensiones del campo visual ( $C_v$ , zona observada por el sistema óptico) y la profundidad de campo ( $P_c$ ), es posible determinar el volumen de exploración ( $V_e$ ) del sistema. Entonces,

$$V_e = C_v P_c.$$

Pero  $C_v$  es la superficie del formato de la película (35 mm X 24 mm), dividido por la amplificación del sistema óptico ( $m = 3$ ). Entonces,  $C_v = 280 \text{ mm}^2$ . Además, con el valor de  $P_c$  dado por la ec. (4.5), se obtiene:

$$V_e = 1092 \text{ mm}^3 = 1 \text{ cm}^3.$$

Basta entonces que el observador cuente, en la fotografía, las partículas que exhiban una pérdida de nitidez ( $\Delta$ ) imperceptible, para conocer el número de partículas

dentro del volumen de exploración. Así se obtiene la densidad del aerosol (no. de partículas/cm<sup>3</sup>) en alguna zona en particular del mismo.

Conociendo el diámetro de las partículas y la densidad; el aerosol se puede clasificar, con respecto a la posición observada (x, y), y obtener así histogramas que lo caractericen.

### 5.3. Velocidad de partícula.

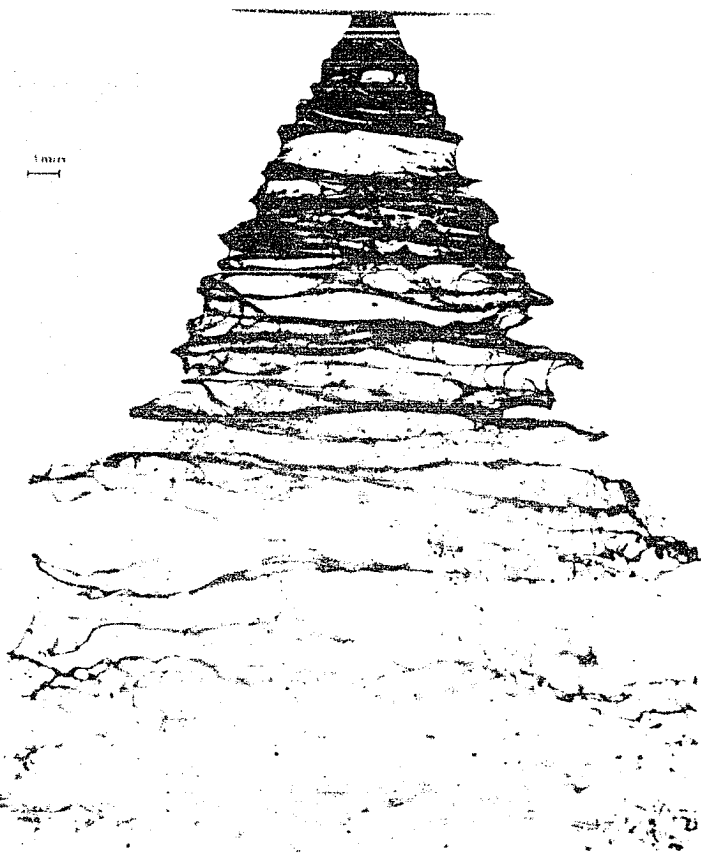
Las fotografías 9 a la 12 muestran el aerosol fotografiado en diferentes zonas. Las fotografías fueron realizadas con doble exposición y bajo las condiciones mostradas en la tabla 6.

La imagen de cada partícula aparece dos veces, la separación ( $\Delta s$ ) entre estas imágenes depende de la velocidad de la partícula.

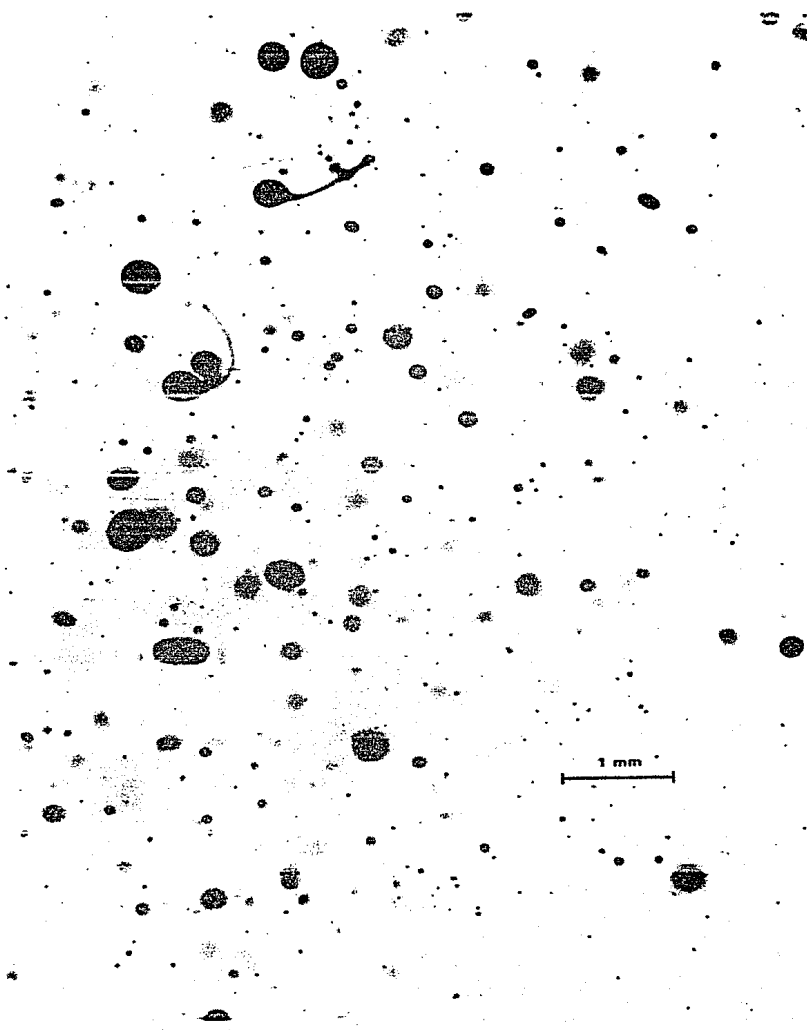
En la fotografía 9 se han trazado algunas de las trayectorias descritas por las partículas, durante su recorrido en el intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ) entre los destellos de las lámparas. La longitud de los trazos es la distancia recorrida  $\Delta s$ .

En la ec. (2.1), con  $M = mM_i = 21.6$  y  $\Delta t = 10^{-4}$  seg, se obtiene la velocidad de la partícula:

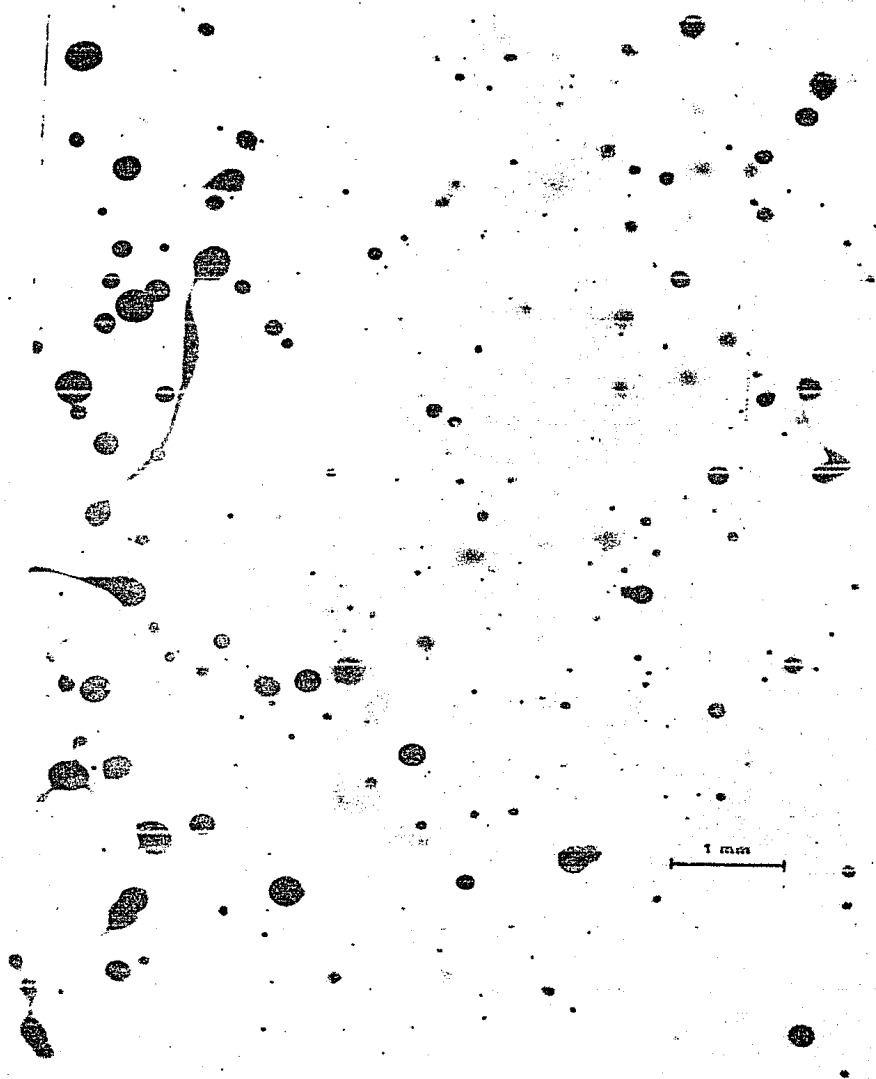
$$v = 463 \Delta s (\text{seg}^{-1}).$$



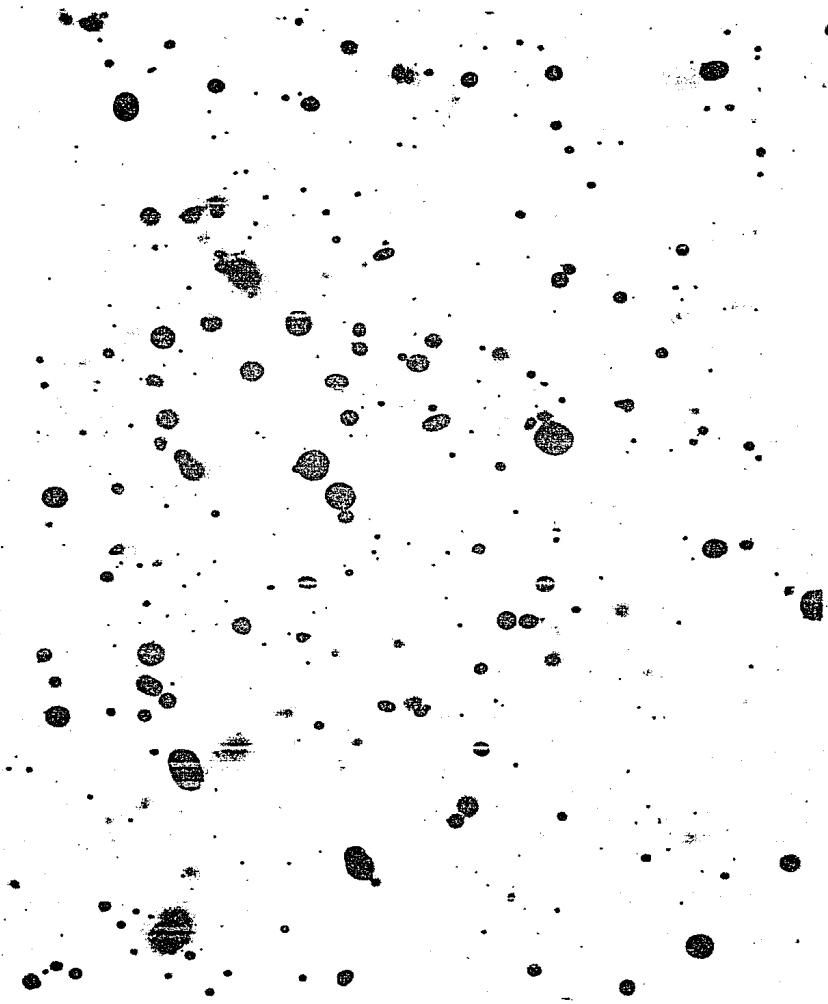
FOTOGRAFIA 1.  $X = 0$ ,  $Y = 17$  mm.



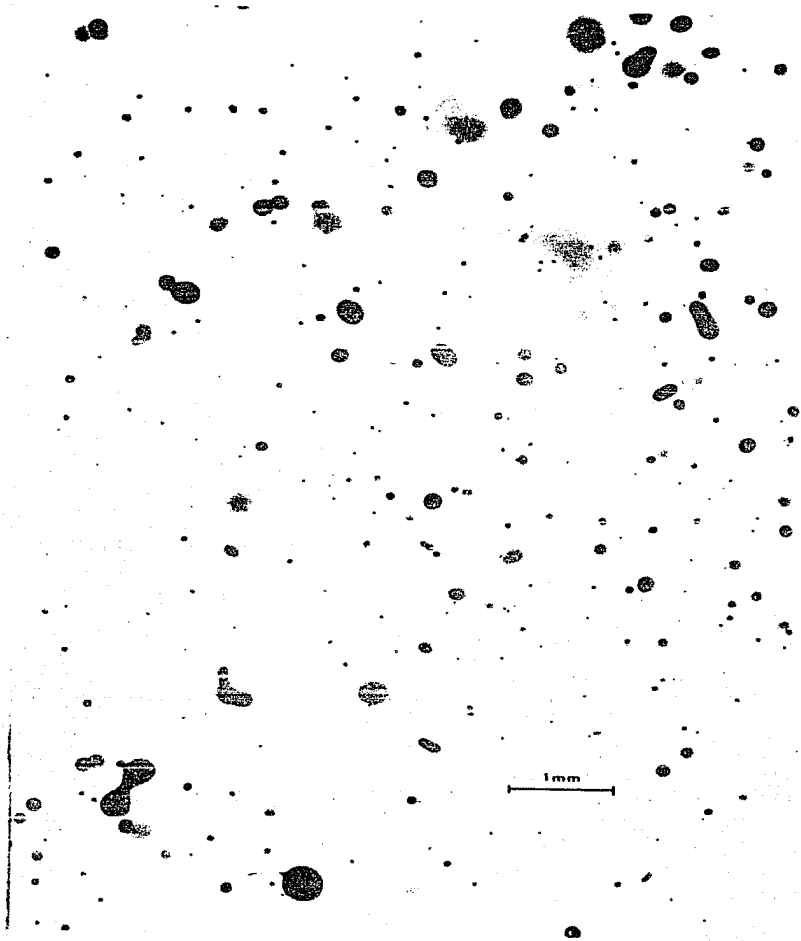
FOTOGRAFIA 2. X = 12 mm, Y = 30 mm.



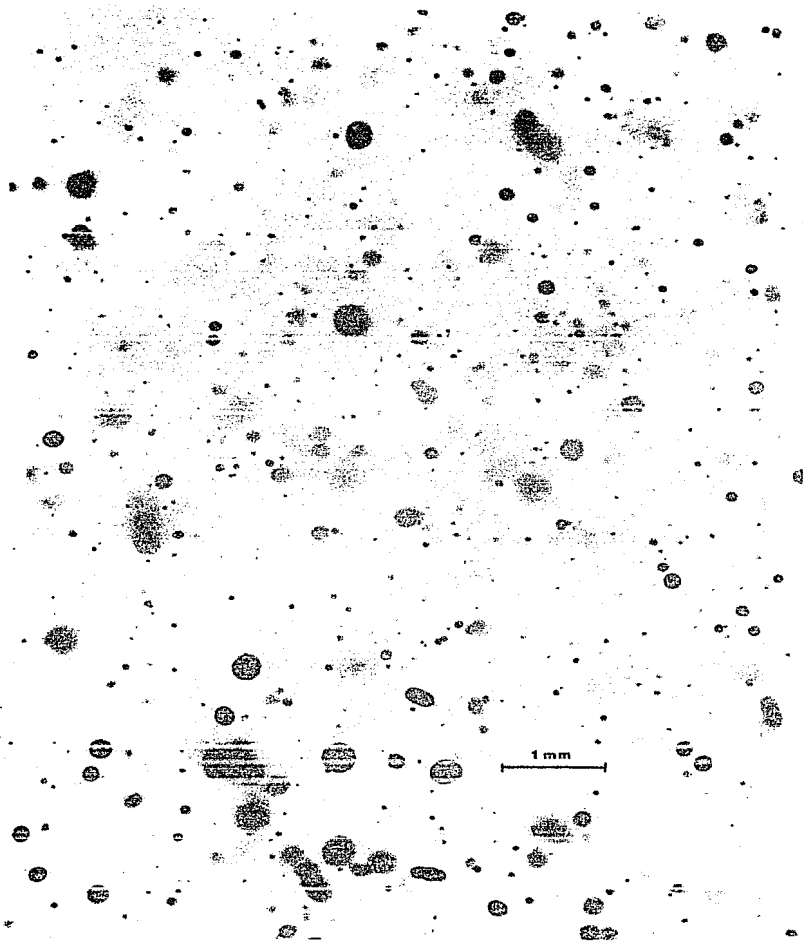
FOTOGRAFIA 3. X = 10 mm, Y = 30 mm.



FOTOGRAFIA 4. X = 8 mil, Y = 30 mil.

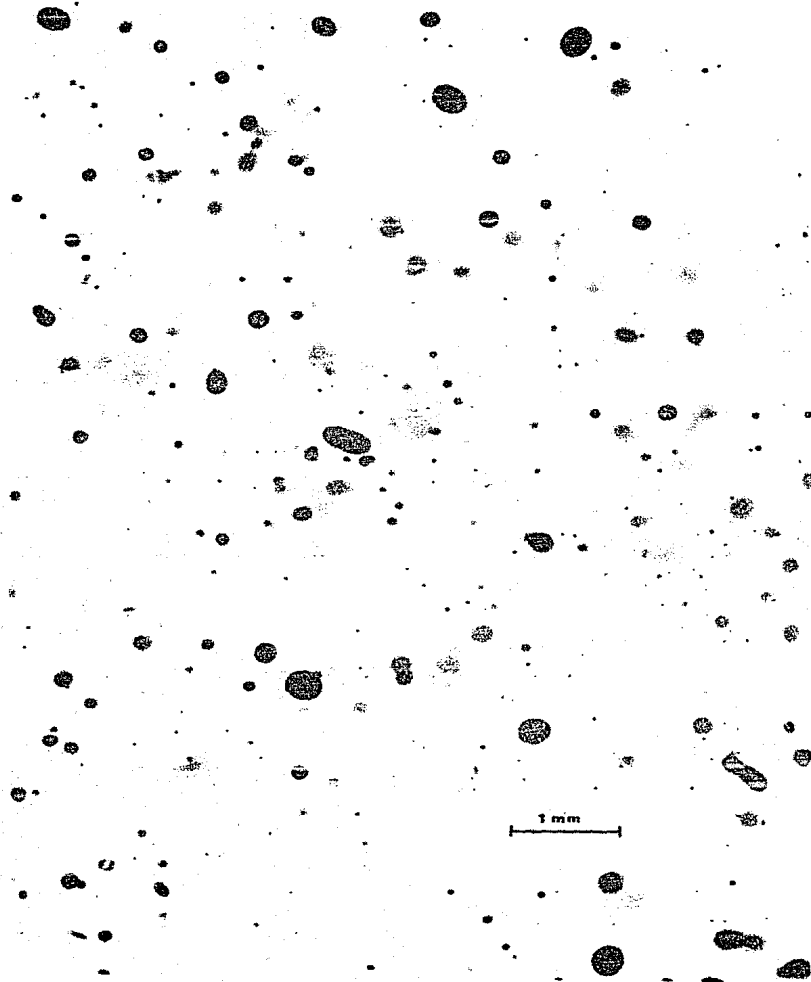


FOTOGRAFIA 5. X = 6 mm, Y = 30 mm.

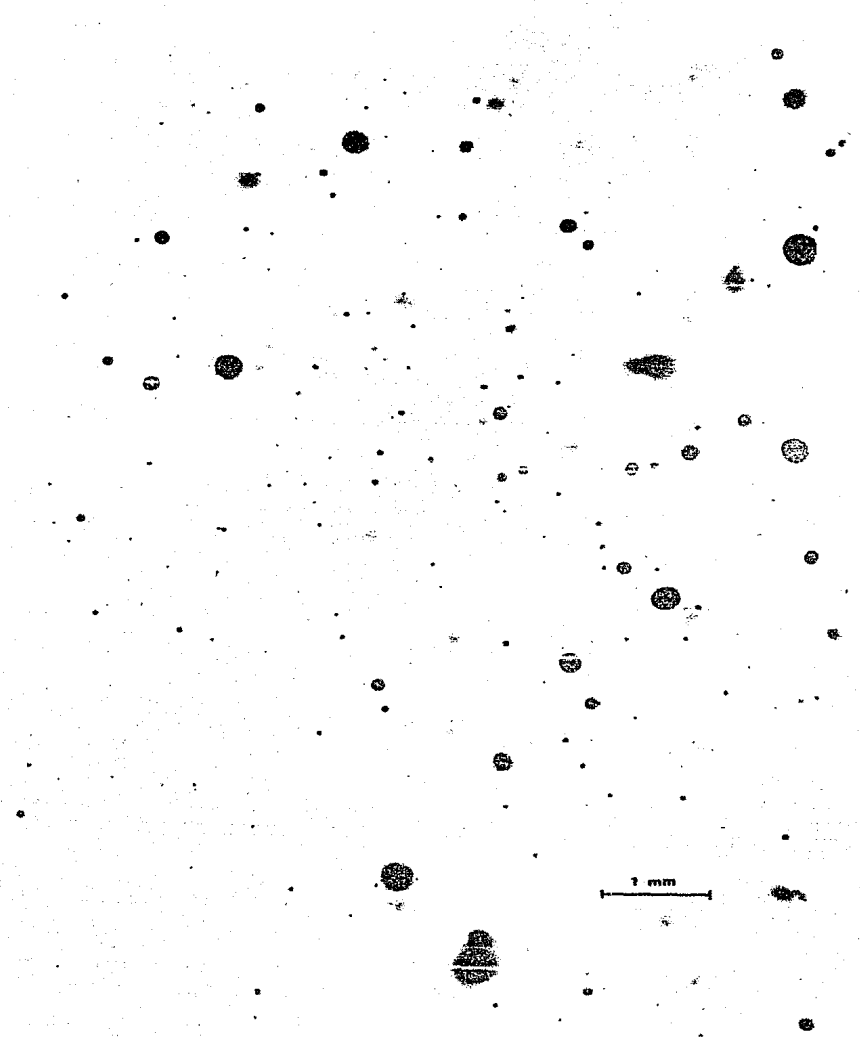


FOTOGRAFIA 6. X = 4 mm, Y = 30 mm.

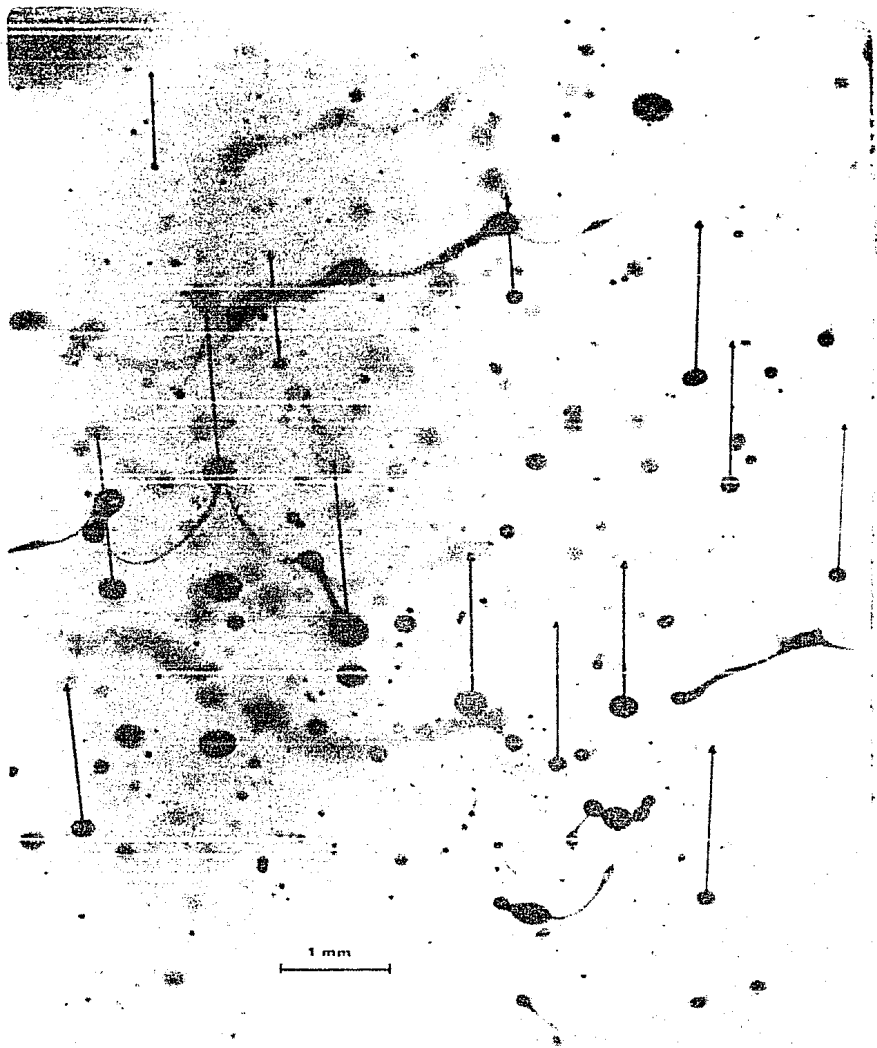




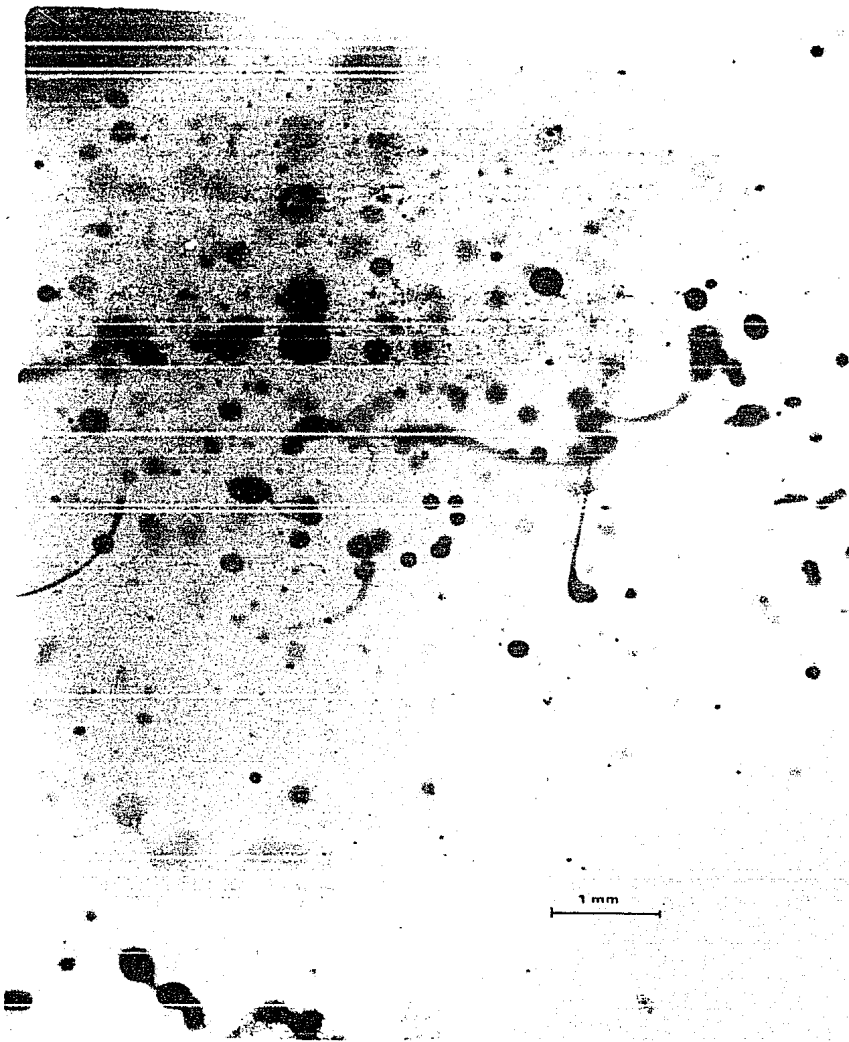
FOTOGRAFIA 7. X = 2 mm, Y = 30 mm.



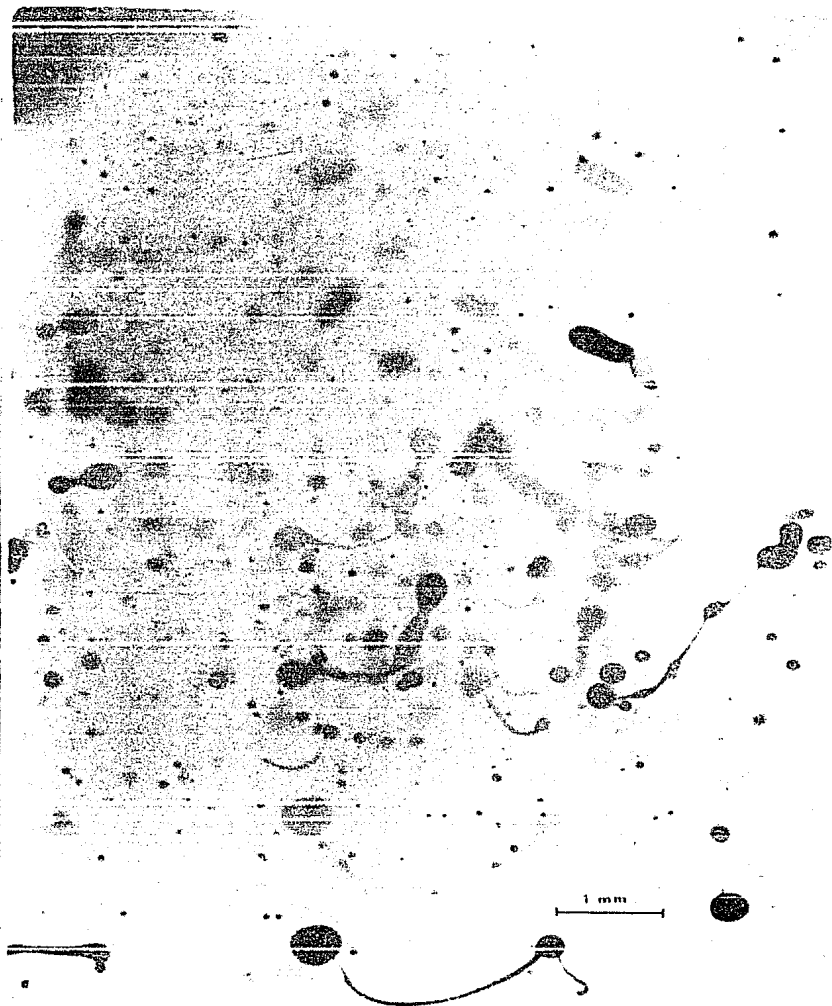
FOTOGRAFIA 8.  $X = 0$  mm,  $Y = 30$  mm.



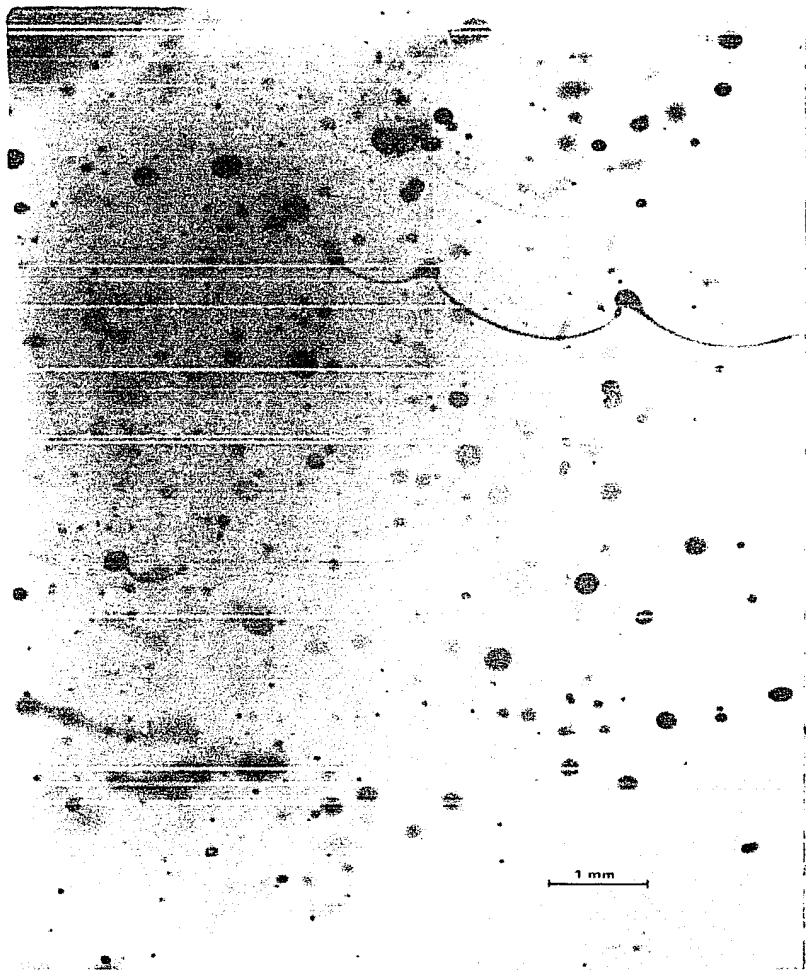
FOTOGRAFIA 9. X = 9 mm, Y = 20 mm.



FOTOGRAFIA 10. X = 6 mm, Y = 20 mm.



FOTOGRAFIA 11. X = 3 mm, Y = 20 mm.



FOTOGRAFIA 12. X = 0, Y = 20  $\mu$ m.

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| Amplificación del sistema óptico (m)                   | 1                           |
| Amplificación de la impresión ( $M_i$ )                | 7.2                         |
| Distancia debajo del atomizador                        | $y = 17$ mm.                |
| Plano enfocado   | Eje del aerosol ( $x = 0$ ) |
| Prof. de campo (según (3.11), con $\Delta_0 = 0.5$ mm) | 18 mm.                      |
| Sensibilidad de la película                            | ASA 400.                    |
| Aceite simulador                                       | Nal. Templar compuesto.     |
| Temperatura del aceite                                 | 38 °C.                      |
| Presión de alimentación del aceite                     | 100 lb/pulg <sup>2</sup> .  |
| Presión de retorno del aceite                          | 37.5 lb/pulg <sup>2</sup> . |
| Flujo de aceite  | 0.45 lt/min.                |
| Atomizador   | Delavan 45°.                |

**TABLA 4.** CONDICIONES EN QUE FUE REALIZADA LA FOTOGRAFIA 1.

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| Amplificación del sistema óptico (m)    | 3                           |
| Amplificación de la impresión ( $M_i$ ) | 7.2                         |
| Distancia debajo del atomizador         | $y = 30$ mm                 |
| Plano enfocado                          | $x = 12, 10, , , 2, 0$ (mm) |
| Profundidad de campo (ec. (4.5))        | 3.9 mm.                     |
| Sensibilidad de la película             | ASA 400.                    |
| Aceite simulador                        | Nal. Templar compuesto.     |
| Temperatura del aceite                  | 38 °C.                      |
| Presión de alimentación del aceite      | 100 lb/pulg <sup>2</sup> .  |
| Presión de retorno del aceite           | 37.5 lb/pulg <sup>2</sup> . |
| Flujo de aceite                         | 0.45 lt/min.                |
| Atomizador                              | Delavan 45°.                |

**TABLA 5.** CONDICIONES EN QUE FUERON REALIZADAS LAS FOTOGRAFIAS 2 A LA 8.

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| Amplificación del sistema óptico (m)    | 3                           |
| Amplificación de la impresión ( $M_i$ ) | 7.2                         |
| Distancia debajo del atomizador         | $y = 20$ mm.                |
| Plano enfocado                          | $x = 9, 6, 3, 0$ (mm).      |
| Profundidad de campo (ec. (4.5))        | 3.9 mm.                     |
| Sensibilidad de la película             | ASA 400.                    |
| Tiempo entre destellos                  | $\Delta t = 10^{-4}$ seg.   |
| Aceite simulador                        | Nal. Templar compuesto.     |
| Temperatura del aceite                  | 30°C.                       |
| Presión de alimentación del aceite      | 100 lb/pulg <sup>2</sup> .  |
| Presión de retorno del aceite           | 37.5 lb/pulg <sup>2</sup> . |
| Flujo de aceite                         | 0.45 lt/min.                |
| Atomizador                              | Delavan 45°.                |

**TABLA 6. CONDICIONES EN QUE FUERON REALIZADAS LAS FOTOGRAFÍAS 9 A LA 12.**



## 6. CONCLUSIONES.

El concepto de grado de nitidez, importante para la determinación de la profundidad de campo de algún sistema óptico, no está uniformemente establecido. Algunos autores sugieren el valor  $f/10^3$  mientras que otros el valor  $\tan(f/1720)$ , como se puede ver en las ecuaciones (2.2), (2.3) y (2.4).

Por otra parte, la ecuación (3.11) establece claramente la relación entre el grado de nitidez ( $\Delta$ ) y los parámetros del sistema, con la profundidad de campo; lo cual permite su calibración. Esto es suficiente para los propósitos del sistema de Fotografía de Sombra desarrollado.

Las ecuaciones (2.2) y (3.11) serían idénticas si el valor  $\Delta = f/10^3$  (en el caso  $D = d$ ). Es posible que esto ocurra en algún determinado proceso de calibración, mas esto sería irrelevante. Lo importante es que el  $\Delta$  obtenido durante la calibración es un valor propio de este procedimiento y depende de muchos factores, como son: el observador, la amplificación del sistema de observación, los parámetros del sistema óptico, etc., los cuales se deben mantener iguales durante el análisis de - las fotografías obtenidas en algún experimento dado.

## 7. APENDICE.

### Detalles de Construcción.

#### 7.1. Sistema Óptico.

En la figura 7.1 se muestra un dibujo a escala de la estructura, y las características, de la lente principal ( $L_p$ ).

En la figura 7.2 se muestra un dibujo a escala del sistema óptico con sus características.

Las características de la cámara fotográfica utilizada son las siguientes.

|                                 |                |
|---------------------------------|----------------|
| Marca:                          | Nikon.         |
| Modelo:                         | AF-2.          |
| Módulo de disparo y embobinado: | MD-2.          |
| Formato de película:            | 35 mm X 24 mm. |

#### 7.2. Lente de iluminación ( $L_i$ ).

##### Características.

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| Marca:                     | Tasco.  |
| Diámetro ( $D_i$ ):        | 110 mm. |
| Distancia focal ( $f_i$ ): | 320 mm. |

ESCALA 1:1

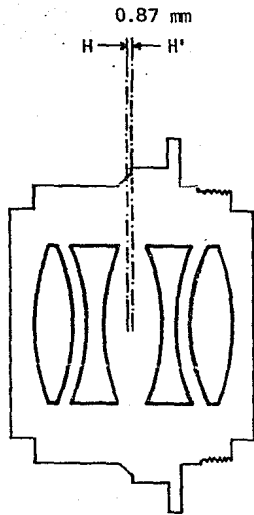


FIGURA 7.1. Dimensiones de la lente APPO NIKKOR 305 F9. H y H' son los planos nodales anterior y posterior respectivamente (definidos para lentes gruesas); la separación entre estos planos es 0.87 mm (según el fabricante). Para fines prácticos, H y H' se pueden con siderar como un solo plano nodal.

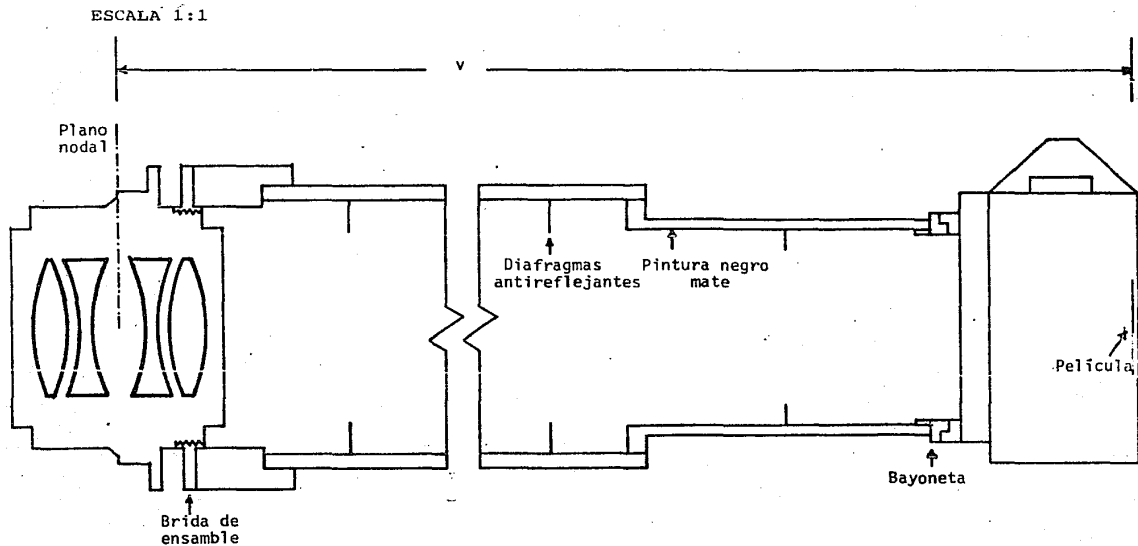


FIGURA 7.2. Sistema Óptico.

### 7.3. Lámpara de destello ("argon jet stabilised spark gap").

#### Características.

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Marca:                         | Pulse (Instrumentation and Controllers) Ltd. |
| Número de destellos (chispas): | 2 (independientes).                          |
| Duración del destello:         | 300 nanoseg.                                 |
| Energía del destello:          | 2.5 joules.                                  |
| Voltaje de descarga:           | 9.5 Kilovolts CD.                            |
| Espacio entre electrodos:      | 5 mm.  |
| Pulso de disparo:              | 5 volts CD (TTL).                            |

### 7.4. Circuito de sincronía.

La figura 7.3 muestra el circuito impreso del circuito de sincronía (el diagrama esquemático se muestra en la figura 4.4). Los componentes se describen a continuación.

#### Lista de componentes.

|                               |                    |                  |
|-------------------------------|--------------------|------------------|
| CI1, CI2, CI3, CI4            | Circuito integrado | SN74121          |
| CI5                           | " "                | LM7805           |
| T1                            | Trans. de voltaje  | 12 VCA .5A       |
| D1                            | Puente de diodos   | W02M             |
| Q1                            | Transistor         | 2N3569           |
| Q2, Q3, Q4, Q5, Q6,<br>Q7, Q8 | "                  | 2N2222           |
| L1, L2, L3, L4                | Led                | GaAs             |
| C1                            | Capacitor          | 1 $\mu$ F, 40V   |
| C2                            | "                  | 100 $\mu$ F, 40V |

|  |                    |                        |
|--|--------------------|------------------------|
| C3   | Capacitor          | .1 $\mu$ F, 40V        |
| CT1  | "                  | 5.8 $\mu$ F, 40V       |
| CT2  | "                  | 3.1 $\mu$ F, 40V       |
| CT3, CT4   | "                  | .031 $\mu$ F, 40V      |
| R1, R4, R7, R10, R13,<br>R14, R16, R17, R18, R19,<br>R20, R21, R22, R23, R24 | Resistencia        | 100 $\Omega$ , 1/4 W   |
| R2, R3, R15  | "                  | 1 K $\Omega$ , 1/4 W   |
| R5, R8, R11  | "                  | 4.7 K $\Omega$ , 1/4 W |
| R6, R9, R12  | "                  | 2.7 K $\Omega$ , 1/4 W |
| RT1  | "                  | 10 K $\Omega$ , 1/4 W  |
| RT2, RT3, RT4  | "                  | 2.2 K $\Omega$ , 1/4 W |
| RVT1   | Resis. var. lineal | 10 K $\Omega$          |
| RVT2, RVT3, RVT4   | "                  | 5 K $\Omega$           |

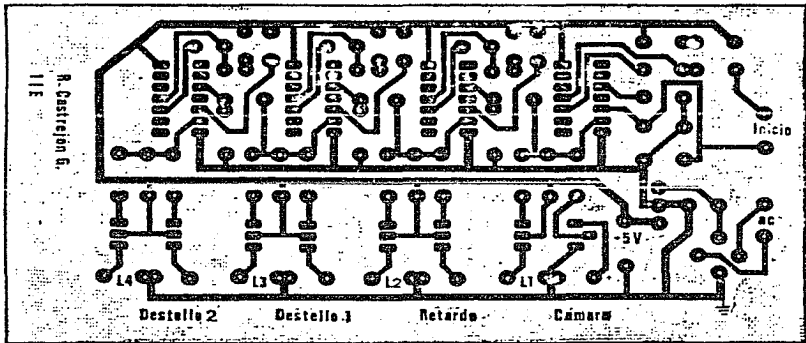


FIGURA 7.3. Circuito impreso del circuito de sincronía.

## 8. BIBLIOGRAFIA.

1. Jones, A. R., "A Review of Drop Size Measurement. The Application of Techniques to Dense Fuel Sprays". Progress in Energy and Combustion Sciences. Vol. 3, 1977, pp. 225-234.
2. Mac Creath, C. G.; Roett, M. F. and Chigier, N. A., "A Technique for Measurement of Velocities and Size of Particles in Flames". Journal of Physics E. Scientific Instruments. Vol 5, 1972.
3. York, J. L. and Stubbs, H. E. "Photographic Analysis of Sprays". Transactions of the ASME. October, 1952.
4. Van Nostrand's Scientific Encyclopedia. Van Nostrand Reinhold Co., 5th edition, pp. 763-764.
5. Enciclopedia Ilustrada de Fotografia Amateur. Ediciones Omega, S. A., Barcelona, 1975, pp. 564-569.
6. Texas Instruments Incorporated. "The TTL Data Book for Design Engineers". Third printing, 1981, pp. 6.64-6.76.