

CONVECCION NATURAL ENTRE DOS LOCALES: DETERMINACION DEL PERFIL DE VELOCIDADES EN UNA PUERTA POR FOTOGRAFIA DE TRAZAS

Maria del S. Vilte e Irene De Paul

INENCO-Fac. de Ciencias Exactas
Buenos Aires 177-Salta

Resumen

En el análisis del intercambio térmico por convección natural entre dos locales juega un papel relevante el perfil de velocidades que se establece en la abertura que los comunica.

Empleando modelos pequeños de locales, que tienen agua como elemento convectivo, se puso a punto una técnica sencilla para medir la velocidad del agua fotografiando las trazas que dejan pequeñas esferas de vidrio al ser iluminadas por un laser.

En el presente trabajo se describe la técnica desarrollada, sus ventajas y limitaciones. Se aplica dicha técnica a la determinación del perfil de velocidades que se establece en la puerta que comunica dos locales, al ser calentada una de las paredes con una potencia P y se discute la ubicación del punto de inversión de velocidades en distintas situaciones.

Introducción

Desde el punto de vista energético, es de interés conocer cuánta energía se transfiere dentro de un local por convección natural. Para cuantificar esta transferencia es necesario conocer el campo de velocidades que se establece dentro del local en diferentes condiciones geométricas y térmicas, y el empleo de modelos pequeños que usan agua como elemento convectivo constituye una técnica importante en el estudio del problema. El presente trabajo tiene por objeto la puesta a punto de una técnica relativamente sencilla para obtener el campo de velocidades en el interior de modelos pequeños de locales de vivienda. Los resultados se presentan en tablas donde figuran las coordenadas espaciales del punto en el que se mide la posición, la velocidad correspondiente y su error.

Método de trabajo

La técnica propuesta consiste en el empleo de esferas microscópicas de vidrio, huecas, de densidad próxima a 1, sembradas en agua desgasada con la que se llena un modelo de geometría cuadrangular construido en vidrio flotado. Las bolitas son arrastradas por el agua y al tener densidad similar podemos considerar que su velocidad es la velocidad del agua en el punto considerado.

El campo de velocidades en un instante de tiempo se puede determinar a través del registro fotográfico de la traza que dejan dichas esferas de vidrio al ser iluminadas por un laser. Para ésto se genera un plano de luz empleando un haz laser y una lente cilíndrica.

El haz ilumina las partículas en movimiento y se puede determinar su velocidad media en el plano iluminado como el cociente entre la longitud de la traza y el tiempo de exposición de la foto.

La imagen fotográfica es digitalizada con un Scanner y procesada con el programa Photo Styler para lograr niveles aceptables de contraste y definición de los bordes. La longitud de la traza se mide a partir de la posición del cursor en los extremos; estas medidas son los datos de entrada del programa **Fluid** que transforma la distancia medida en pixels en cm, calcula la velocidad, su error y genera la tabla de salida.

Descripción del dispositivo experimental

Para la puesta a punto de esta técnica, se construyó una caja cúbica de vidrio flotado de 10 cm de lado sobre una base de acrílico con techo también de acrílico. Se preparó el calefactor con alambre de constantán sobre una placa de fórmica y se lo adhirió a la caja en una de sus caras. La resistencia del calefactor es de 23.5Ω . Se utilizó una fuente de corriente continua cuyo voltaje no superaba los 21 V y por lo tanto la potencia disipada es de 18.8 W. Se empleó un láser de 3 mW y otro de 10 mW con el objeto de analizar la influencia de la potencia luminosa en el cálculo, y con una lente cilíndrica se generó un plano de iluminación vertical. Se llenó la caja con agua desgasada sembrada con esferitas de vidrio microscópicas.

Para obtener un plano de iluminación uniforme se armó el equipo nivelando los elementos y alineando el sistema caja, lente, laser, de manera tal que el haz se refleje sobre sí mismo mejorando la iluminación de las partículas. Se adhirió cartulina negra a la cara del fondo para optimizar la visualización de las partículas y una máscara de cartulina negra sobre la cara lateral de manera tal que sólo deje pasar el haz mejorando la definición del plano de iluminación. Los tiempos de exposición automáticos de la cámara variaron entre 1/15 s y 1s. Para tiempos de exposición mayores que un 1 seg. se usó con el diafragma abierto en forma manual, midiendo el tiempo de exposición con un cronómetro. Todos los registros se hicieron con la máxima abertura del diafragma.

Para analizar la influencia del tipo de película fotográfica se empleó película Kodak PlusX Pan de 100 ASA, Tri-X-Pan de 125 ASA y 400 ASA de sensibilidad. Se empleó el Scanner con el programa Windows/Photo Styler en el procesamiento y medida de las fotos digitalizadas y el programa Matlab en el cálculo de velocidades.

Determinación de la velocidad de la partícula

Para determinar el valor de la velocidad es necesario medir la longitud de la traza dejada por la partícula.

En el sistema real, durante un tiempo de exposición t , la partícula se desplaza en el plano iluminado una distancia l (tal como se muestra en la figura 1), de manera que la velocidad media de la partícula es:

$$v = \frac{l}{t}$$

Durante el proceso de registro, copia y digitalización de la imagen, esta es ampliada generalmente hasta un tamaño próximo al de la pantalla de la computadora: la imagen de la traza tiene sobre la pantalla una longitud l' (fig.2).

La magnificación total m puede calcularse midiendo sobre la pantalla el ancho del plano iluminado L' que corresponde al ancho de las caras del modelo, $L=10$ cm.

$$m = \frac{L'}{L}$$

de donde resulta:

$$v = \left(\frac{L'}{L}\right) \frac{L}{t} \quad (1)$$

FIGURA 1. Imagen real

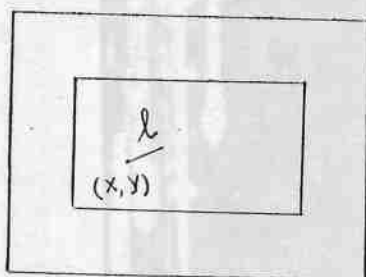
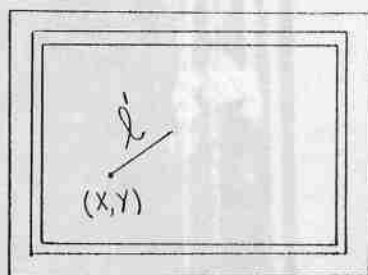


FIGURA 2. Imagen en la pantalla



Cálculo del error en la velocidad v

Aplicando la teoría de propagación de errores a la expresión (1) se obtiene:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta L'}{L'} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta L'}{L'} + \frac{\Delta t}{t}$$

El factor $\frac{\Delta t}{t}$ es despreciable en el caso en que el tiempo de exposición esté dado automáticamente por el diafragma. ($\Delta t \approx 0$). Para $t > 1$ s se mide t con un cronómetro de precisión 0.1s. Para tener en cuenta la velocidad de reacción del operador se adopta $\Delta t = 0.2$ s. El error $\Delta L'$ está dado por la apreciación en pixels, con que el operador puede ubicar dichos extremos. En este caso el error de apreciación corresponde a una longitud $\Delta L' = 0.2$ mm. Tanto el factor $\frac{\Delta L}{L}$ como $\frac{\Delta L'}{L'}$ son del orden de las centésimas por lo que los factores determinantes en el error de v son $\frac{\Delta L'}{L'}$ y $\frac{\Delta t}{t}$. Para tiempos de exposición menores que 1s, operados automáticamente por la cámara, el error relativo en la velocidad es del orden del 20 %, mientras que en el caso de operación manual ($t > 1$), el error llega al 50 %.

Ejemplo 1

Modelo: caja cúbica de 10 cm de lado.

Condiciones en la que fue tomada: Voltaje de calentamiento 20.5 V; Laser de 3 mW; Película TriX pan de 400 ASA de sensibilidad; Tiempo de exposición: 1 s.

Descripción del movimiento del fluido

El agua es calentada por la placa calefactora ubicada en la pared izquierda de la caja, sin el techo (superficie libre). Se observa que el agua asciende por la pared caliente

y se produce convección algo turbulenta en la parte superior del líquido. El sentido de circulación de izquierda a derecha está determinado por la diferencia de temperatura que se establece entre la pared fría a la derecha y la pared caliente a la izquierda (Foto 1).

FOTO 1. Flujo convectivo en un modelo de caja cuadrada.

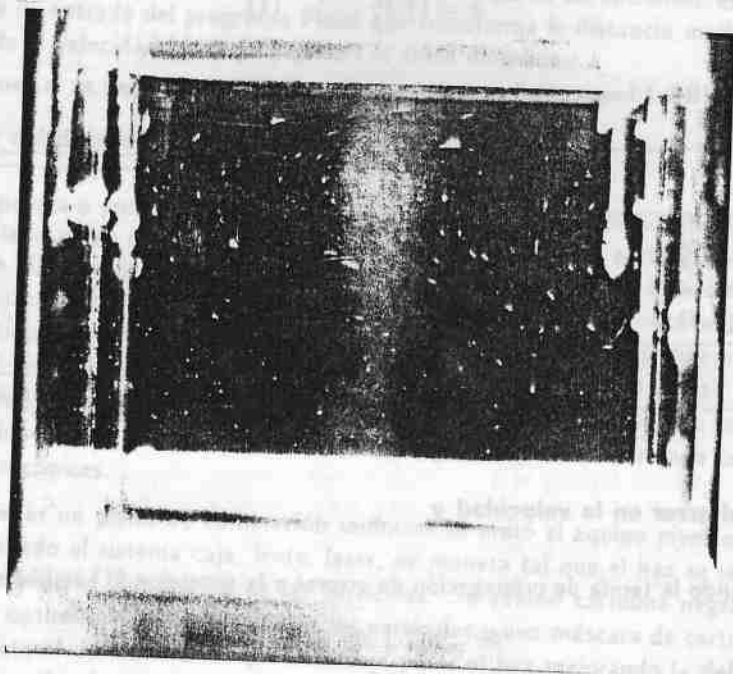
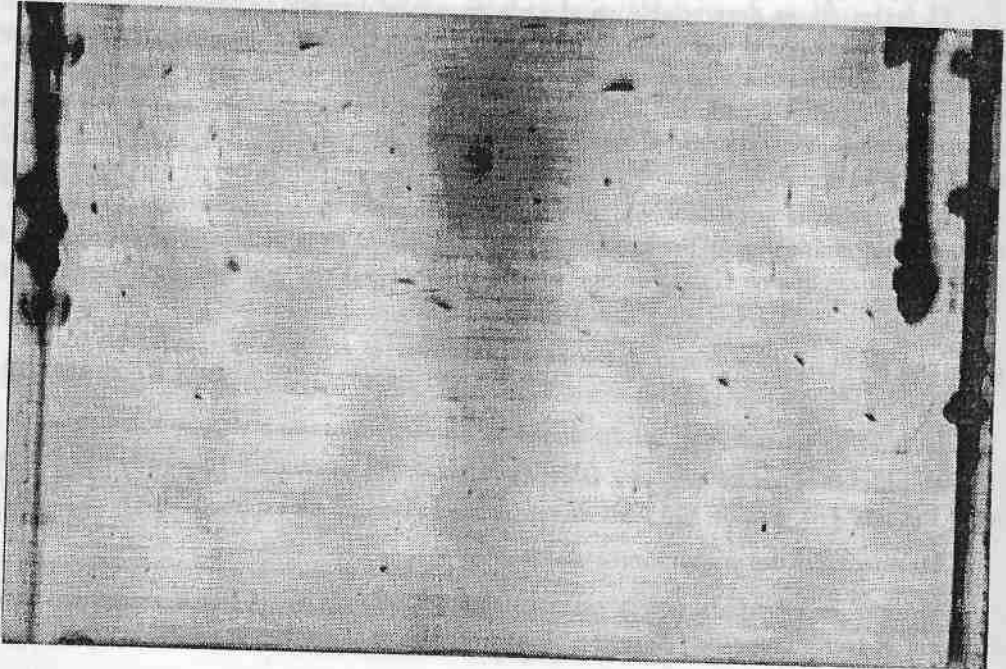


FIGURA 3. Imagen procesada de la Foto 1.



Se modificó el original, aumentando el brillo y el contraste en un 15%, luego se obtuvo el negativo. En el negativo se bajó el brillo en un 60% y se elevó el contraste en un 60% (Fig.3). Los datos numéricos procesados se muestran en la siguiente tabla.

TABLA 1.Tabla de salida con los valores de velocidad y su error para el ejemplo 1

coordenada X	coordenada y	velocidad v	error relativo en v
0.71	8.55	4.42	0.06
1.01	6.90	1.47	0.15
1.53	7.81	1.17	0.18
1.87	8.54	1.86	0.12
1.90	7.19	1.56	0.14
2.51	9.62	4.39	0.06
3.36	8.86	2.65	0.09
3.89	8.14	1.25	0.17
4.35	8.14	1.38	0.16
4.62	6.07	2.06	0.11
5.03	5.82	2.32	0.10
5.19	8.52	1.79	0.11
5.61	5.55	2.41	0.10
5.79	8.41	1.67	0.14
5.92	9.23	3.52	0.07
6.69	5.54	2.10	0.11
6.76	6.04	2.44	0.10
6.86	8.46	4.79	0.06
7.25	9.10	2.96	0.08
7.55	6.20	2.00	0.12
7.81	6.13	2.00	0.12
8.34	5.01	1.54	0.15
8.93	3.25	1.27	0.17
8.93	6.18	3.42	0.08
9.08	7.14	2.08	0.11
9.21	5.34	1.93	0.12
9.81	4.64	4.30	0.06
9.81	5.90	3.61	0.07
10.03	5.89	1.39	0.16
10.42	4.19	1.56	0.14

Influencia de los distintos factores en los resultados

Si la densidad de las partículas es pequeña no se alcanza a visualizar el movimiento del agua en todo el plano. Pero el exceso de partículas difunde demasiado la luz en el plano iluminado, con lo cual disminuye la iluminación relativa de las trazas respecto del fondo, mermando la definición de la traza.

El tiempo durante el cual permanece abierto el diafragma depende de la velocidad con que se mueve el agua. En procesos convectivos suaves un tiempo de exposición corto no permite obtener trazas sino puntos luminosos difusos. Al usar el laser de 10 MW fue necesario disminuir los tiempos de exposición respecto a los empleados con el laser de 3 MW, dado que la potencia del haz sobreexponía las fotos debido a la intensidad de la luz que se refleja en los distintos elementos del dispositivo experimental. En general, se obtuvieron buenos registros empleando un láser de 3 mW con tiempos de exposición de 1/15 s a 1s. Se obtuvieron registros fotográficos de las trazas para películas de 100,125 y 400 ASA de sensibilidad con distintos tiempos de exposición, usando el láser de 10 mW.

Cuando se usó película PlusX Pan de 100 ASA (baja sensibilidad), se observó que para tiempos de exposición cortos ($t \leq 1s$), la definición de las trazas es escasa. Para $1s \leq t \leq 5s$, las trazas son visibles a simple vista en las fotos, pero el procesador digital de imágenes no alcanza a resolverlas ya que las trazas observadas son muy tenues y se esfuman sobre el fondo oscuro del plano de iluminación.

En los registros obtenidos para películas de 125 ASA de sensibilidad se observa el mismo efecto. La exposición óptima para esta película resultó de 1/8 s. La película TriX Pan de 400 ASA de mayor sensibilidad necesita menor iluminación para impresionarse. Los tiempos de exposición óptimos varían de 1/15 s a 1/8 s.

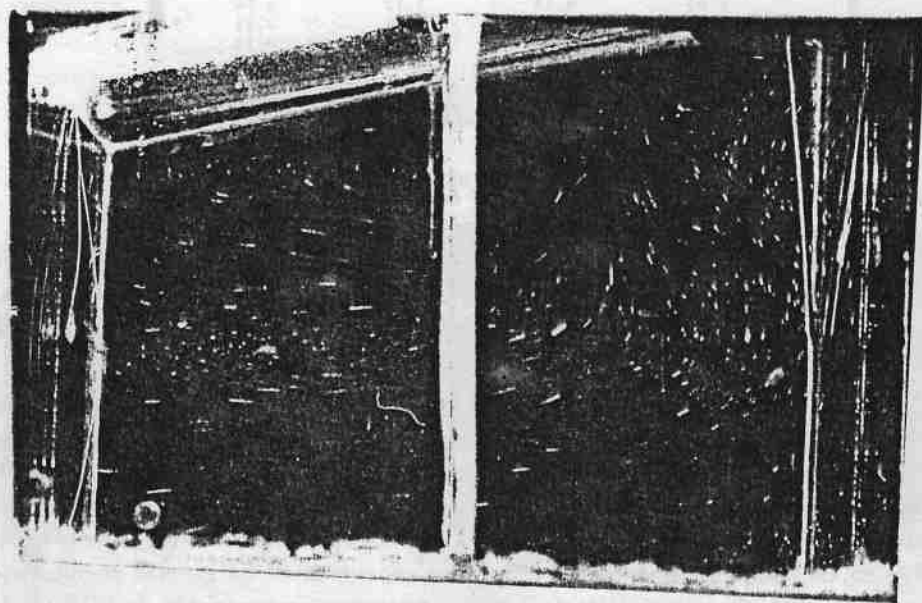
Aplicación

La técnica expuesta anteriormente se aplicó a la determinación del perfil de velocidades que se establece en la puerta que comunica dos ambientes (foto 2). Las dimensiones del modelo son: $12 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, la altura de la puerta es de 5.6 cm.

Se calienta el sistema a través de un calefactor adherido a la pared exterior del local más pequeño y cuya resistencia es de 74.8Ω . Dicho calefactor se conecta a una fuente que proporciona alrededor de 55 V, por lo que la potencia entregada es 40.4 W.

El movimiento de las partículas comienza rápidamente entre los 5' y 10' después de iniciado el calentamiento, en el ambiente más pequeño, extendiéndose luego al segundo local. Es notable como al atravesar la puerta las partículas son bruscamente absorbidas hacia la parte superior del otro local, descendiendo luego por la parte más alta para luego atravesar nuevamente la puerta regresando al primer local y cerrando de esta manera el ciclo convectivo (Foto 2).

FOTO 2. Foto que se visualiza el flujo convectivo en la puerta entre dos locales.



La foto 2 fué procesada, modificandose en el original el brillo y contraste en 15%, y al obtenerse el negativo se le aplica equalización que muestra con mayor detalle las trazas (Fig. 4). La tabla 2 muestra los resultados obtenidos.

FIGURA 4. Imagen procesada de la Foto 2.

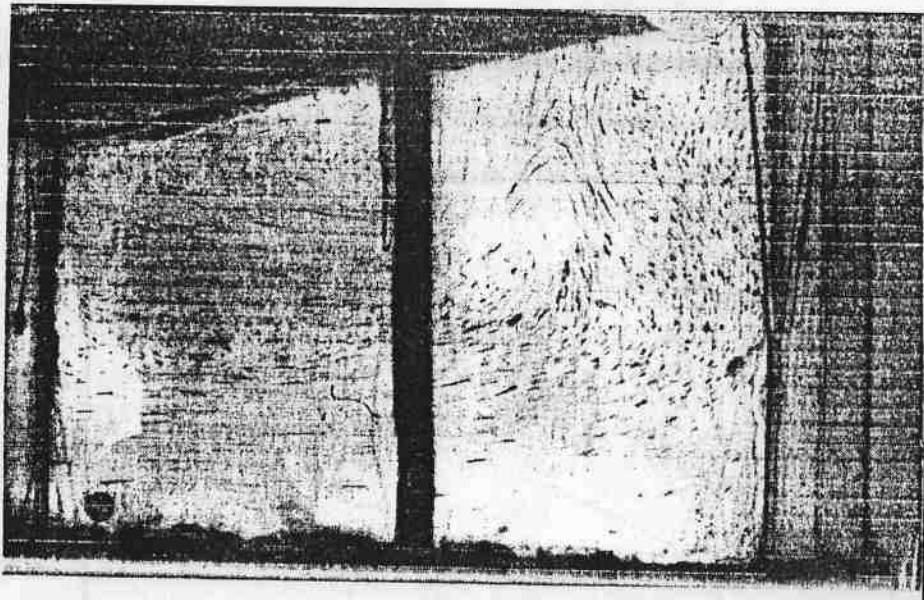
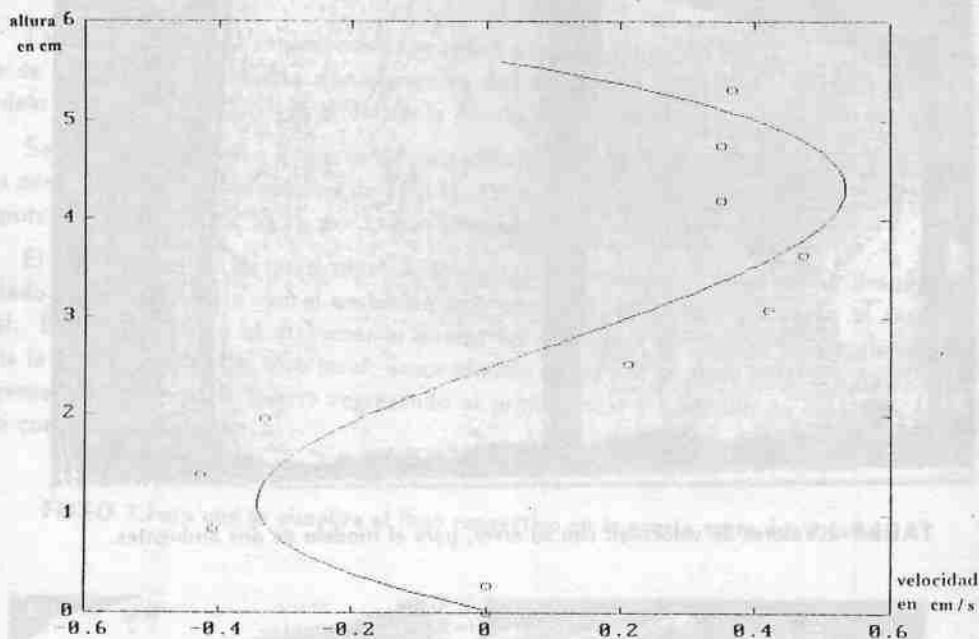


TABLA 2. Valores de velocidad con su error, para el modelo de dos ambientes.

coordenada X (cm)	coordenada Y (cm)	velocidad v (cm)	error m
7.25	1.13	0.19	0.07
5.71	1.24	0.70	0.06
7.81	1.71	0.61	0.07
7.81	1.71	0.61	0.07
9.69	1.90	0.46	0.07
8.38	2.08	0.44	0.08
7.95	2.20	0.59	0.07
9.95	2.22	0.34	0.09
8.75	2.34	0.46	0.07
7.91	2.43	0.63	0.07
8.25	2.86	0.64	0.07
8.82	2.97	0.13	0.09
7.33	2.98	0.05	0.06
8.03	3.03	0.45	0.08
8.31	3.27	0.37	0.08
5.92	3.56	0.45	0.08
7.92	3.57	0.54	0.07
7.68	3.64	0.52	0.07
9.70	3.97	0.26	0.10
7.67	3.90	0.55	0.07
8.42	4.06	0.48	0.07
7.30	4.14	0.31	0.09
5.75	4.22	0.36	0.08
8.97	4.18	0.32	0.09
3.98	4.25	0.41	0.08
5.67	4.31	0.56	0.07
3.98	4.26	0.42	0.08
9.61	4.36	0.29	0.09
4.95	4.36	0.71	0.06
7.36	4.38	0.25	0.10
9.25	4.44	0.42	0.08
8.27	4.46	0.28	0.09
9.58	4.47	0.24	0.10
9.40	4.53	0.38	0.08
4.42	4.75	0.45	0.08
9.42	4.91	0.49	0.07
8.05	5.23	0.52	0.07
3.11	5.36	0.56	0.07
4.54	5.61	0.08	0.06
8.40	6.11	0.15	0.08
5.00	5.39	0.23	0.08
4.25	6.43	0.28	0.09

La figura 5 muestra los valores medidos de velocidad en función de la altura y la curva de ajuste realizada con un polinomio de 3^{er} grado.

FIGURA 5. Valores medidos de velocidad vs. altura. Ajuste de los puntos por un polinomio de 3^{er} grado.



Conclusiones

Como resultado del presente trabajo se puede concluir que la determinación de la velocidad de un fluido por medio del análisis de trazas en modelos pequeños que emplean agua como elemento convectivo, es una técnica factible, pudiendo medirse velocidades con un error del 20% al 50%.

Los elementos a emplear dependerán del rango de velocidades que se quiere medir: laser de baja potencia (3 mW) y tiempos de exposición relativamente grandes (1 a 2 s) para bajas velocidades; laser de mayor potencia (10 mW) y tiempos de exposición más cortos (de 1/8 a 1/15 s) para movimientos más rápidos.

Cuando se trabaja con poca iluminación y tiempos de exposición largos, puede ser más conveniente emplear película de alta sensibilidad Kodak Tri X Pan de 400 ASA, a pesar de que se pierde definición por tener grano más grueso. En general se obtienen buenos registros fotográficos con película Tri X Pan de 125 ASA.

Respecto a la influencia de la potencia sobre el valor del punto de inversión z_0 , parecería que z_0 aumenta con P , pero los resultados no son concluyentes. Un factor que aparentemente también incide en z_0 es la turbulencia que se genera en el extremo inferior derecho del local grande. Es necesario realizar más medidas al respecto.

Esta técnica puede mejorarse empleando sistemas de obturación automáticos programables y realizando el proceso de medición de las trazas empleando computadoras.

Referencias Bibliográficas

- I. De Paul, M. Vilte, G. Lesino "Modelo de circulación de aire en locales cerrados". Actas 16va. Reunión ASADES. 7mo. Congreso ALES. La Plata 1993.
- W. Merzkirch "Flow visualization". Academic Press, Inc. 1974.
- R. Gleiser y A. Maiztegui "Introducción a las mediciones de laboratorio". Ed. Kapeluz.

Resumen

El presente trabajo surge como consecuencia de la necesidad de disponer de un sistema auxiliar de energía en el Depto. de Física, y por otra parte de controlar el mismo del sistema fotovoltaico propuesto.

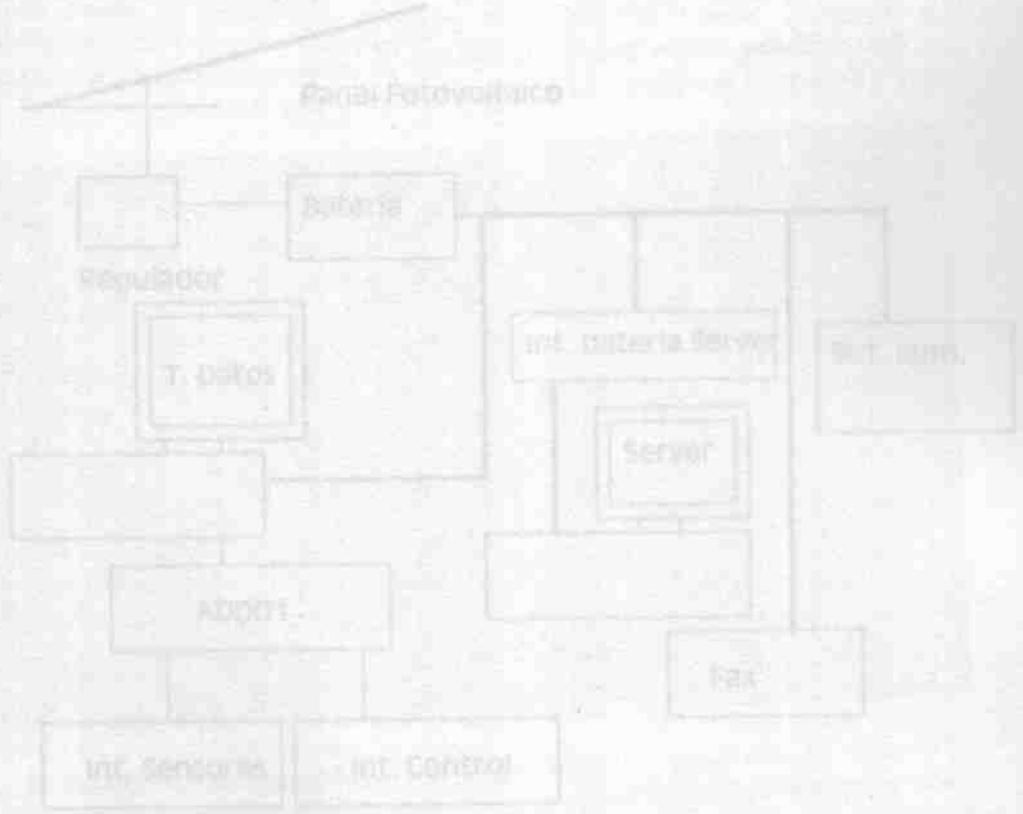


Figura 1: Esquema general

La energía auxiliar es obtenida en este caso por almacenamiento del excedente de una pila NiMH. La distribución auxiliar es realizada por potencia del edificio, una computadora auxiliar para control de datos control y un fax.

1. Generador auxiliar y computadora