

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por FONDECYT mediante el Proyecto de Investigación 1990025.

## REFERENCIAS

- Brumley B. y G. Jirka. 1987. "Near-surface turbulence in a grid-stirred tank". Journal of Fluid Mechanics, vol. 183, pp. 235-263.
- Hopfinger E. y J. Toly. 1976. "Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 78, Part 1, pp. 155-175.
- Thompson S. y J. Turner. 1975. "Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid", Journal of Fluid Mechanics Vol. 67, Part 2, pp. 349-368.
- Muñoz A. 2001. "Características del flujo turbulento generado por microchorros en estanques". Memoria de Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Pujol J. 1999. "Estructura turbulenta de un flujo generado por microchorros". Memoria de Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile..

## SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

### XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

#### TRANSFERENCIA DE OXÍGENO EN UN ESTANQUE AGITADO POR MICROCHORROS Y SU RELACIÓN CON LA TURBULENCIA EN LA SUPERFICIE LIBRE

CLAUDIO ARAVENA<sup>1</sup>  
ALDO TAMBURRINO<sup>2</sup>

## RESUMEN

Se determina experimentalmente la relación entre la tasa de transferencia de oxígeno y la estructura turbulenta de la superficie libre de un flujo generado por microchorros en un estanque, en ausencia de esfuerzo de corte superficial. Para la cuantificación del flujo turbulento, se usó la técnica de digitalizar fotografías de la superficie libre en movimiento con la ayuda de partículas trazadoras de acrílico, obteniéndose campos de velocidad, campos de vorticidad, campos del gradiente vertical de la componente vertical de la velocidad, energía cinética turbulenta, RMS y funciones de densidad espectral. La concentración de oxígeno disuelto se determinó con la ayuda de un sensor con membrana microperforada, para la posterior determinación del valor del coeficiente de reaeración. El análisis de los datos permitió cuantificar y caracterizar la turbulencia en la superficie libre, mostrando la no existencia de direcciones preferenciales del flujo y la ausencia de estructuras dominantes que contengan gran parte de la energía de éste. Del análisis espectral, se muestra el sentido del estudio del fenómeno de la transferencia de oxígeno a través de la superficie libre en un estanque agitado, y además se demuestra que éste es dominado por las pequeñas estructuras del flujo, donde la viscosidad del fluido y la tasa de disipación de la energía cinética juegan un rol fundamental ("modelo de los pequeños vórtices"). Además, se determinó una frecuencia de renovación de la superficie que se ajusta a la teoría de la superficie de renovación de Dankwerts (1951). Finalmente, se hace una comparación de los datos obtenidos con mediciones realizadas en canales y en ríos.

<sup>1</sup> Ingeniero Civil (E). Ayudante de Investigación, División Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

<sup>2</sup> Ingeniero Civil, Ph.D., Profesor Asociado División Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El análisis de los procesos de transferencia de gases a través de la interfase aire-agua, como es el caso del oxígeno, requiere conocer la tasa de transferencia del gas a través de la superficie libre. Este proceso es controlado por las características de la fase líquida, fase gaseosa y del flujo, lo cual implica que es necesario conocer la interacción de las variables medio ambientales con la dinámica de la estructura turbulenta del flujo en el volumen de agua y en la superficie libre.

Dentro de este contexto, es necesario estudiar distintos mecanismos que se postulan como controladores del proceso de transferencia, los que involucran pequeños vórtices turbulentos, la película interfacial difusiva o los grandes vórtices. Además, en ausencia de esfuerzo de corte interfacial, se relaciona la transferencia de oxígeno con la frecuencia de eyecciones de masas de fluido que provienen de las regiones centrales del flujo y que alcanzan la superficie libre.

El tema provoca un mayor interés cuando se sabe que la turbulencia plenamente desarrollada es independiente del mecanismo que la genera. De este modo, se postula que es posible correlacionar la transferencia de oxígeno en flujos turbulentos en canales, con aquella que tiene lugar en un estanque agitado. Experimentalmente, el uso de este último tiene ventajas con respecto al uso de canales, ya que es posible generar distintos grados de turbulencia y tener mayores tiempos de residencia del gas disuelto, disminuyendo considerablemente los errores experimentales en la medición del coeficiente de transferencia.

El objetivo principal de este trabajo es determinar experimentalmente relaciones entre la transferencia de oxígeno a través de la interfase aire-agua y la turbulencia superficial, con algunas características globales del flujo turbulento generado por microchorros en un estanque.

## 2. ANTECEDENTES PRELIMINARES

La capacidad de reaireación de un curso de agua no es otra cosa que la capacidad de transferencia de oxígeno desde el aire a la masa líquida. Para una descripción analítica del fenómeno de transferencia de oxígeno a través de la superficie libre de un flujo de agua, se debe recurrir a la aplicación de los principios de conservación de la cantidad de masa y conservación de la cantidad de movimiento, junto con la ley de Fick, que predice el flujo de un compuesto por efecto de la difusión molecular.

La aplicación de estos principios es válida para cualquier régimen de flujo, pero soluciones analíticas existen sólo para el caso laminar. Para el caso de régimen turbulento se presenta el problema de cierre de la teoría de la turbulencia. Pero el flujo turbulento no es un fenómeno puramente aleatorio superpuesto a ciertas características medio temporales del escurrimiento, sino que presenta cierta organización espacial y temporal, mostrando estructuras cuasi periódicas, denominadas estructuras coherentes.

Para flujos turbulentos, puede considerarse que la mayor parte de la masa líquida tiene concentración uniforme de oxígeno disuelto  $C_B$ , excepto en la superficie libre, donde se impone la condición de borde de concentración de saturación  $C_s$ . Por lo tanto, en la cercanía de la superficie libre se presenta un fuerte gradiente de concentración de oxígeno disuelto, generándose así una capa límite de concentración, tal como lo muestran los datos de la Fig. 4, capturados en el

presente estudio. Fuera de la capa límite de concentración, el transporte se debe a los efectos turbulentos del flujo, pero dentro de ésta, es de origen molecular. Considerando que la variación de la concentración es lineal dentro de la capa límite de concentración, la ley de Fick se reduce a:

$$F = K(C_s - C_B) \quad (1)$$

donde  $F$  es un flujo medio temporal-espacial (para aplicaciones prácticas es más útil trabajar con éste que con un flujo instantáneo) y  $K$  es un coeficiente global de transferencia de masa, denominado también coeficiente de transferencia de oxígeno, o coeficiente de reaireación.

Uno de los primeros modelos que relaciona la transferencia con las características del flujo es la teoría de la superficie de renovación (Dankwerts 1951). Ésta postula que el fluido en la superficie es periódicamente renovado por masas que vienen de más abajo, obteniéndose que:

$$K \propto \sqrt{D \cdot s} \quad (2)$$

donde  $D$  es el coeficiente de difusión molecular y  $s$  es la tasa de renovación de la superficie libre. También se han planteado modelos donde el coeficiente de reaireación se relaciona con otros parámetros del flujo. Es así como se tiene el modelo de los grandes vórtices (Fortescue y Pearson, 1967), según el cual los vórtices de gran escala son los responsables de transportar masas de agua hacia las cercanías de la superficie libre (Ec. 3). Por el contrario, existe el modelo de los pequeños vórtices (Lamont y Scott, 1970), donde la transferencia está dominada por los movimientos de menor escala asociados a la escala de Kolmogorov (Ec. 4),

$$\frac{K}{u_*} \propto Sc^{-1/2} \cdot R_*^{-1/2} \quad (3) \qquad \frac{K}{u_*} \propto Sc^{-1/2} \cdot R_*^{-1/2} \quad (4)$$

donde  $Sc$  es el número de Schmidt, definido como  $\nu/D$ ,  $R_*$  es un Reynolds friccional definido con la velocidad friccional  $u_*$ , la profundidad del canal  $H$  y la viscosidad cinemática  $\nu$  del fluido.

Una caracterización de la turbulencia homogénea en planos horizontales e isotrópica, en un estanque agitado por microchorros, fue realizada por Pujol (1999). En su análisis determinó una altura  $z_0$ , y una velocidad característica  $u_0$  asociadas al comienzo de la región con turbulencia homogénea, que coincide también con turbulencia isotrópica.

## 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

### 3.1 Instalación experimental

La instalación experimental consiste en un estanque de acrílico (de 11 mm de espesor), de base cuadrada de lado interior 95 cm y alto 70 cm. En el fondo del estanque se dispone de un arreglo de 18 por 18 boquillas de 2.9 mm de diámetro interior, separadas 5 cm entre sí en direcciones ortogonales y a 5 cm de las paredes laterales del estanque. El agua es inyectada a través de 162 mangueras y evacuada por 162 mangueras de 4.8 mm de diámetro, las cuales están conectadas a las boquillas en el fondo del estanque, las que están intercaladas entre sí. En la realización de las experiencias de cuantificación de la turbulencia en la superficie libre, el agua circula a través de un circuito cerrado, impulsada por una bomba de acero inoxidable de 1.5 kW de potencia. En cambio, para la realización de las experiencias de medición de la concentración de oxígeno disuelto, se conectan aguas abajo de la bomba, en forma paralela, un filtro y un intercambiador de calor. Un porcentaje del flujo impulsado por la bomba pasa por el filtro y el intercambiador de calor, para su enfriamiento con un flujo de agua potable, y finalmente se reincorpora al flujo que escurre a través de la tubería de impulsión, aguas arriba de la placa de orificio. El flujo de agua potable no se mezcla con el flujo de agua en estudio. El enfriamiento se produce mediante la difusión de calor entre ambos flujos independientes a través de placas delgadas que los separan y que están en el interior del intercambiador de calor. Ver Figuras 1, 2 y 3.

### 3.2 Procedimiento experimental

Para el estudio de la turbulencia en la superficie libre de un estanque agitado por microchorros es necesario capturar datos de las velocidades instantáneas del flujo superficial. Se implementó la técnica de fotografiar el flujo turbulento en la superficie libre, capturando las trayectorias de partículas de acrílico, retenidas en la malla 100, y que trabajan como partículas trazadoras esparcidas en toda la superficie libre (Figura 5). Se debe oscurecer el agua con permanganato de potasio, y de esta forma se limita el paso de la luz hacia zonas por debajo de la superficie libre, quedando iluminada solamente ésta por la ubicación de un foco halógeno en la cara del estanque más cercana a la bomba y de otro en la cara opuesta, estableciendo un plano de luz que ilumina en forma uniforme la superficie libre. Se instalan dos flashes en costados opuestos, distintos a los ocupados por los focos, los que permiten captar el punto inicial de la trayectoria de cada partícula debido a un aumento en la intensidad de luz proyectada en la superficie libre. El tiempo de iluminación de los flashes (1/180 s) es muy pequeño en comparación con los tiempos de exposición de la película fotográfica para captar la trayectoria de las partículas. Una vez tomada la fotografía, se procede a su ampliación, y se digitaliza cada una de las trayectorias (Figura 6), con respecto a un sistema de referencia de ejes coordenados ubicado en una esquina del estanque.

Para las experiencias de oxígeno, el objetivo es medir la variación temporal de la concentración de oxígeno disuelto en el volumen de agua, con el fin de poder determinar el valor del coeficiente de reaeración para ciertas condiciones experimentales. Se hace uso del intercambiador de calor para mantener la temperatura del flujo. Además, se utiliza el filtro para impedir la obstrucción del intercambiador de calor debido a la posible presencia de pequeños elementos difíciles de eliminar del sistema. Al inicio de cada experiencia, se incorporan 50 g de sulfito de sodio al cuerpo de agua, con el propósito de disminuir la concentración de oxígeno disuelto a valores por debajo de 1 mg/L. Se utiliza además un catalizador, cloruro de cobalto, para acelerar el proceso. Se instala un sensor en el centro del volumen de agua contenido en el estanque, el cual debe estar conectado al microprocesador, y éste a su vez a la computadora, para registrar las mediciones de concentración de oxígeno disuelto y temperatura cada un segundo (Figs. 8 y 9). Además, se cubre la parte superior del estanque para evitar la depositación de polvo sobre la superficie libre durante el desarrollo de las experiencias, teniendo cuidado en no impedir el flujo de gas.

### 3.3 Método de análisis

Las fotografías de las partículas trazadoras en la superficie libre son digitalizadas para su posterior procesamiento computacional, pero antes de realizar la digitalización, y haciendo uso del método de mínimos cuadrados, se procede a la corrección de las fotografías, que sufren pequeñas deformaciones producto de la convexidad del lente de la cámara fotográfica y del problema de perspectiva debido a la distancia entre la cámara y la superficie libre. Haciendo uso de una malla cuadrada que cubre toda la superficie libre, se realiza una interpolación del campo vectorial de velocidades en cada nodo de la malla, bajo el método de Kriging (Figura 7). Los archivos de texto entregados por este método, que contienen los campos espaciales de velocidades en la superficie libre, son procesados a través de una serie de rutinas computacionales. Como resultado del procesamiento de los datos se generan campos espaciales de la vorticidad y de  $\beta$  en la superficie libre, y además se obtienen valores de la intensidad turbulenta (RMS), energía cinética turbulenta, funciones de densidad espectral, y áreas de isovorticidad e iso $\beta$ .

Haciendo uso de la malla de interpolación, el parámetro  $\beta$  se calculó de la siguiente forma:

$$\beta = \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{z=0} - \frac{\partial v}{\partial y} \Big|_{z=0} \approx \frac{\Delta u}{\Delta x} - \frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{(u_{i+1} - u_i)}{(x_{i+1} - x_i)} - \frac{(v_{j+1} - v_j)}{(y_{j+1} - y_j)} \quad (5)$$

donde  $(u,v,w)$  son las componentes del vector velocidad,  $(x,y,z)$  son las direcciones ortogonales respectivas y el símbolo  $\Delta$  denota la diferencia de magnitud de la variable entre dos nodos consecutivos de la malla en la dirección correspondiente (Fig. 10). La vorticidad también se calculó con la ayuda de la malla y de la forma descrita por la Ec. 6.

$$\omega \Big|_{z=0} = \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{z=0} - \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{z=0} \approx \frac{\Delta v}{\Delta x} - \frac{\Delta u}{\Delta y} = \frac{(v_{i+1} - v_i)}{(x_{i+1} - x_i)} - \frac{(u_{j+1} - u_j)}{(y_{j+1} - y_j)} \quad (6)$$

Dada la característica de flujo neto nulo en la superficie libre, los valores instantáneos de la velocidad, vorticidad y  $\beta$ , en cada nodo, son iguales a sus fluctuaciones espaciales respectivas.

Para determinar el valor del coeficiente de reaeración se utiliza la ecuación de continuidad integral junto con la Ec. (1) para obtener la siguiente relación:

$$C_s - C_B = cte \cdot e^{-\frac{A}{V} K t} \quad (7)$$

donde A es el área de la superficie libre, V es el volumen del cuerpo de agua contenido en toda la instalación, t es el tiempo y cte es una constante. Luego, se realiza un ajuste, con el método de mínimos cuadrados, a la serie temporal de datos de la concentración de oxígeno disuelto en el volumen de agua con la Ec. (7), obteniéndose de esta forma un sistema de ecuaciones que permite determinar el valor K.

### 3.4 Series experimentales

En la Tabla N° 1, se muestran las condiciones experimentales de las ocho experiencias realizadas, las cuales fueron seleccionadas y utilizadas por Pujol (1999), bajo el criterio de obtener distintos grados de turbulencia en la cercanía de la superficie libre y abarcar dos ciclos logarítmicos de la energía cinética turbulenta, respectivamente. Además, se muestran los valores de los RMS, la escala integral de longitud, la frecuencia de renovación de la superficie libre y del coeficiente de reaeración. En la tabla, H es la altura de la columna de agua en el estanque, Q es el caudal de recirculación,  $V_{ch}$  la velocidad de inyección de los chorros,  $t_{exp}$  es el tiempo de exposición de cada fotografía,  $\langle RMS \rangle$  es el promedio de los RMS de la velocidad,  $RMS_u$  es el RMS de la vorticidad,  $RMS_b$  es el RMS de b, L es la escala de longitud integral, f es la frecuencia de renovación y K es el coeficiente de reaeración.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 Análisis de la turbulencia en la superficie libre

Con el fin de cuantificar las características del flujo turbulento en la superficie libre, se utilizó los valores obtenidos en cada nodo de la malla de interpolación. La discretización de la malla es de 0,5 cm en ambas direcciones, definiéndose bajo el nombre de fila y columna a las series de datos ordenados en la dirección del eje X e Y para un determinado valor del eje Y e X respectivamente. Mediante el análisis de los RMS de la velocidad en filas y columnas (Figura 11) se determinó una zona influida por la presencia de las paredes del estanque, equivalente para todas las experiencias y cuyo ancho es de 5 cm. En la determinación de los espectros de velocidad, vorticidad y b, no se considera la zona influida por las paredes.

En la Figura 12 se muestra, como ejemplo, el promedio de los espectros de  $u^3$  según el eje X y de  $v^4$  según el eje Y para la experiencia A2. La Figura 13 muestra el promedio de los espectros de las fluctuaciones de la vorticidad espacial según el eje X e Y para la experiencia A2. En las figuras se aprecia una igualdad entre los espectros, que se presenta en todas las experiencias. Esta igualdad indica que el flujo no tiene una dirección preferencial dada la geometría del

<sup>3</sup>  $u^3$  denota la fluctuación espacial de la componente de velocidad en la dirección del eje X.  
<sup>4</sup>  $v^4$  denota la fluctuación espacial de la componente de velocidad en la dirección del eje Y.

estanque. Además, no se observa ningún máximo en los espectros, indicando la no existencia de estructuras dominantes y que contengan la mayor parte de la energía del flujo, permitiendo un paso continuo de la energía desde las grandes estructuras hacia las pequeñas. En los espectros de la velocidad, se observa una zona de producción de energía cinética turbulenta, conjunto de valores que en un gráfico log-log siguen una tendencia lineal con una pendiente igual a  $-5/3$ , tal como se señala en el trabajo de Kellay et al. (1998). Además, se observa la presencia del rango subinercial donde se cumple la ley de Kolmogorov para el caso de turbulencia en dos dimensiones. Este rango está caracterizado por el conjunto de valores del espectro de velocidad que siguen una tendencia lineal con una pendiente igual a  $-3$ . En general, se observa que el rango subinercial comienza para un número de onda aproximadamente igual a  $1,5 \text{ cm}^{-1}$ , lo que es equivalente a decir que los vórtices de mayor tamaño que posee el rango subinercial son del orden de los 4 cm de longitud. Los espectros de las fluctuaciones de la vorticidad indican un decaimiento con una pendiente igual a  $-3$ , en concordancia con los trabajos experimentales de Kellay et al. (1998). En la Fig. 14 se muestra, como ejemplo, el promedio de los espectros de  $\beta^s$  según el eje X e Y para la experiencia A2. Los espectros de  $\beta^s$  siguen igual tendencia que en el caso de canales abiertos, tanto en la superficie libre como en el fondo del canal. El ajuste está dado en el trabajo de Tamburrino (1994) para el análisis del espectro de  $\beta^s$  en canales. El hecho que los espectros de  $\beta^s$  sigan igual tendencia que flujos en canales otorga sentido al estudio de la transferencia de oxígeno a través de la superficie libre de cuerpos de agua contenidos en estanques agitados.

#### 4.2 Análisis de la transferencia de oxígeno

En la Figura 15 se indica la relación entre un número de Reynolds ( $Re_0 = u_0 H_0 / \nu$ ) y el producto entre el número de Stanton ( $St_0 = K/u_0$ ) y el número de Schmidt, donde  $u_0$  es el promedio horizontal de los RMS de la velocidad en la zona donde comienza la turbulencia isotrópica definida por Pujol (1999) y  $H_0$  es la altura de esta zona. Claramente, los datos que se ajustan perfectamente al modelo de pequeños vórtices corresponden a las experiencias con 44 y 33 cm de altura de agua en el estanque. Los puntos con menor número de Reynolds, y que se sitúan entre ambos modelos, corresponden a las experiencias con una altura de agua igual a 22 cm. Los pequeños vórtices (escala de Kolmogorov) rigen el fenómeno de transferencia de oxígeno en las experiencias con menor intensidad turbulenta en la superficie libre, es decir, las estructuras de escalas pequeñas dominan la renovación de la superficie libre, donde la tasa de disipación viscosa y la viscosidad del fluido juegan un rol fundamental. Sin embargo, se observa que a medida que aumenta la intensidad turbulenta, el fenómeno tiende a regirse por una combinación entre ambos modelos, lo cual hace pensar que grandes vórtices provenientes de zonas más profundas comienzan a influir en la renovación de la superficie libre.

Utilizando los espectros de velocidad, fue posible determinar valores de la escala integral de longitud. Tomando como velocidad característica el promedio de los RMS de la velocidad en la superficie libre, es posible calcular una escala de tiempo integral cuyo inverso se puede considerar como una frecuencia de renovación de la superficie ( $f = \langle \text{RMS} \rangle / L$ ). En la Figura 16 se indica el ajuste entre K y el producto del coeficiente de difusión molecular D y la frecuencia de renovación f (Ec. 8).

$$K = 0,68(D \cdot f)^{0,56} \quad (8)$$

Al realizar el ajuste sin considerar la experiencia C2 se obtiene una relación muy cercana a lo predicho por la teoría (Ec. 2). Entonces, se puede concluir que las escalas de tiempo calculadas para las experiencias A, B y C1 son mayores pero muy cercanas al tiempo real de renovación de la superficie libre. La experiencia C2 tiene la característica de ser la que posee mayor intensidad turbulenta en la superficie libre, por lo tanto, es de esperar que la frecuencia de renovación sea bastante alta, mayor que la frecuencia estimada con la escala integral de tiempo. En conclusión, se puede afirmar que para las experiencias A, B y C1 los valores de la frecuencia están bastante cercanos a los valores reales de la tasa de renovación.

<sup>3</sup>  $\beta^s$  denota la fluctuación espacial de  $\beta$ .

En la Fig. 17 se realiza una comparación de los datos obtenidos en el presente estudio con datos presentados en estudios de reaireación en canales experimentales y en ríos. Se puede apreciar que los resultados del presente estudio están en el rango de los valores asociados a mediciones en canales.

#### 5. CONCLUSIONES

La utilización de una cámara fotográfica para la captura del movimiento de partículas trazadoras, durante un pequeño lapso de tiempo, permitió realizar una descripción detallada del flujo turbulento en la superficie libre. La resolución de la película fotográfica permite excelentes visualizaciones de las estructuras del flujo. Con el uso del sensor de oxígeno fue posible medir concentraciones de oxígeno con una frecuencia de un dato por segundo, lo cual permitiría a futuro realizar estudios orientados al análisis de las fluctuaciones del coeficiente de reaireación. La aplicación del proceso de digitalización a las fotografías, junto con el algoritmo de Kriging como método de interpolación, permitieron calcular el campo vectorial de velocidad en la superficie libre. Con estos datos fue posible calcular parámetros estadísticos como los RMS y funciones de densidad espectral para la velocidad, vorticidad y para el gradiente vertical de la componente vertical de la velocidad  $b$ . Además, con los espectros de velocidad se determinaron escalas de longitud integral para cada experiencia, permitiendo el cálculo de una escala de tiempo integral. De las experiencias de oxígeno se determinó el valor medio espacio-temporal del coeficiente de reaireación.

Del análisis espectral de las fluctuaciones de la velocidad, se observó un decaimiento del espectro con una pendiente igual a  $-3$  en la zona del subrango inercial, tal como lo predice la ley de Kolmogorov para el caso de turbulencia en dos dimensiones. Además, se determinó una zona inicial de los espectros relacionada con la producción de energía cinética turbulenta y que se ajusta con una pendiente igual a  $-5/3$ . Del análisis espectral de las fluctuaciones de  $\beta$ , se comprobó que los espectros se ajustan a la relación analítica dada por Tamburrino (1994) para flujo en la superficie libre de canales abiertos, otorgando validez al estudio de la transferencia de oxígeno en un estanque agitado por microchorros. Del análisis espectral no se determinó la existencia de una estructura dominante que concentrara gran parte de la energía cinética turbulenta.

El cálculo de los valores del coeficiente de reaireación permitió determinar relaciones entre algunos parámetros del flujo y este coeficiente, demostrando que el fenómeno de transferencia de oxígeno para estanques agitados por microchorros se ajusta de buena forma con el modelo de los pequeños vórtices. Al aumentar la intensidad turbulenta en la superficie libre, los grandes vórtices comienzan a tomar cierto protagonismo en la dinámica del fenómeno, pero siempre con menor influencia que los pequeños vórtices.

Usando como frecuencia de renovación de la superficie el inverso de la escala integral de tiempo, se determinó una relación entre el coeficiente de reaireación y dicha frecuencia elevada a un exponente muy cercano a 0,5. Lo anterior indica que la tasa de renovación es cercana a los valores de la frecuencia utilizada. Para la experiencia con mayor intensidad turbulenta esto deja de ser válido.

#### REFERENCIAS

- Dankwerts, P.V. 1951. "Significance of liquid-film coefficients in gas adsorption". Ind. and Engrg. Chem., Vol 43, N° 6, pp. 1460-1467.
- Fortescue, G.E., y P.R.E. Pearson. 1967. "On gas adsorption into a turbulent liquid". Chem. Eng. Sci., Vol 22, p.1163.

Lamont, J.C., y D.C. Scott. 1970. "An eddy cell model of mass transfer into a surface of a turbulent liquid", *AIChE Journal*, Vol.16, pp. 513-519.

Kellay, H., X.L. Wu, y W.I. Goldburg. 1998. "Vorticity measurements in turbulent soap films". *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 80, N°2, pp. 277-280.

Pujol J. 1999. "Estructura Turbulenta de un Flujo Generado por Microchorros", Memoria de Título, Depto. Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Tamburrino A. 1994. "Free surface kinematics and its relationship to gas transfer", Ph.D. Theses, University of Minnesota.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por Fondecyt, a través del Proyecto de Investigación n° 1990025.

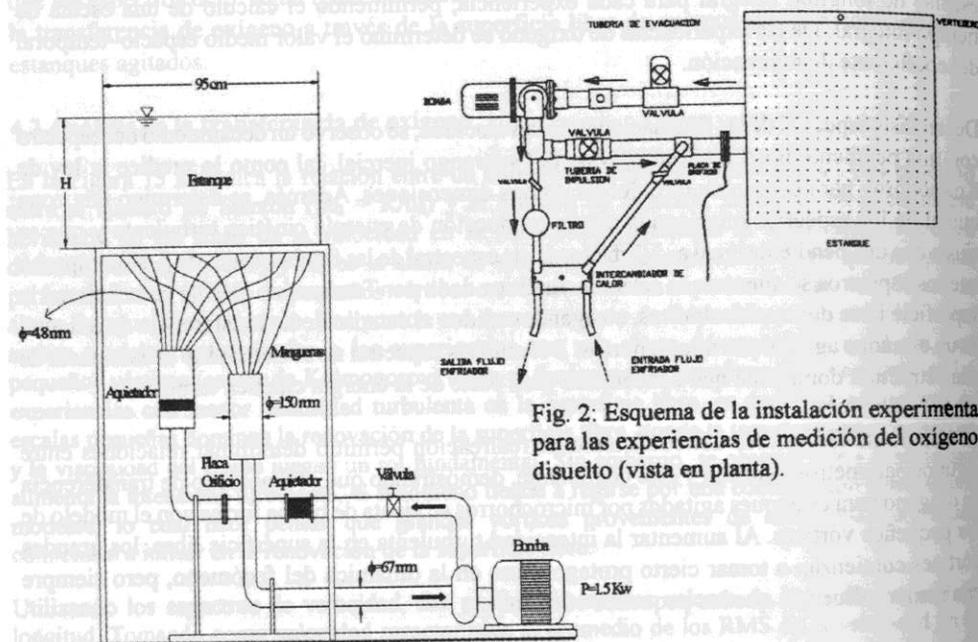


Fig. 2: Esquema de la instalación experimental para las experiencias de medición del oxígeno disuelto (vista en planta).

Fig. 1: Esquema de la instalación experimental para las experiencias de cuantificación de la turbulencia.

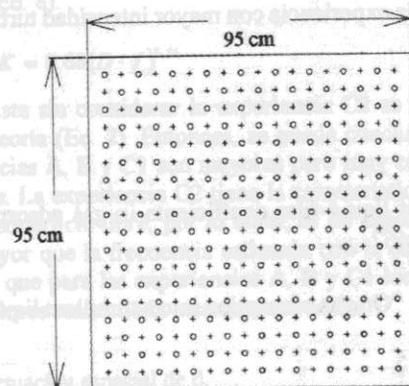


Fig. 3: Distribución de boquillas en la base del estanque.

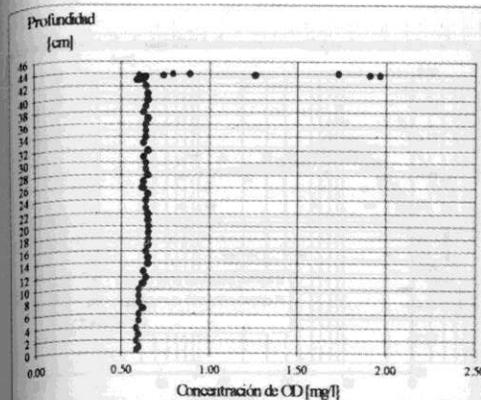


Fig. 4: Perfil vertical de la concentración de OD.

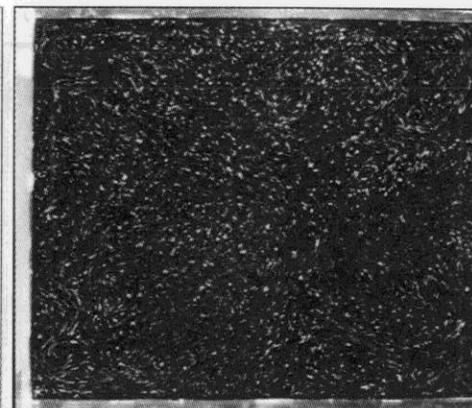


Fig. 5: Fotografía de la superficie libre, experiencia A2.

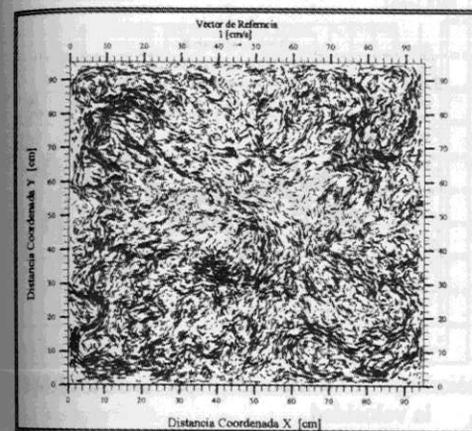


Fig. 6: Digitalización experiencia A2.

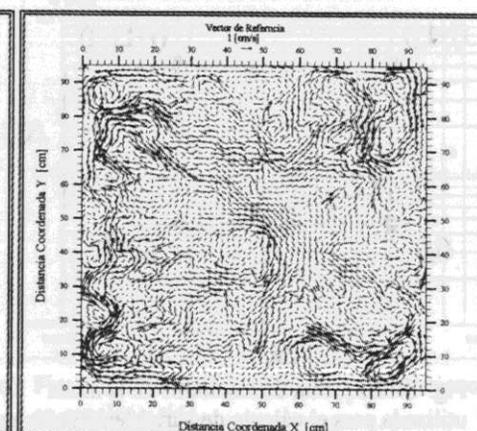


Fig. 7: Interpolación Foto experiencia A2.

Tabla n° 1: Condiciones experimentales.

Serie	H [cm]	Q [l/s]	V <sub>ch</sub> [m/s]	t <sub>exp</sub> [s]	<RMS> [cm/s]	RMS <sub>ω</sub> [1/s]	RMS <sub>□</sub> [1/s]	L [cm]	f [1/s]	K [cm/hr]
A1	44	0,77	0,72	2,0	0,25	0,16	0,06	3,4	0,07	1,31
A2	44	1,25	1,17	1,0	0,45	0,40	0,19	2,4	0,20	1,68
A3	44	1,81	1,69	0,7	0,55	0,61	0,38	2,1	0,25	2,07
B1	33	0,76	0,71	0,7	0,40	0,31	0,14	3,1	0,13	1,37
B2	33	1,22	1,14	0,5	0,60	0,46	0,25	3,1	0,20	1,95
B3	33	1,81	1,72	0,5	0,75	0,54	0,30	3,4	0,25	2,70
C1	22	0,71	0,69	0,5	0,75	0,70	0,40	2,6	0,33	3,12
C2	22	1,24	1,16	0,3	1,10	1,04	0,61	2,4	0,50	4,76

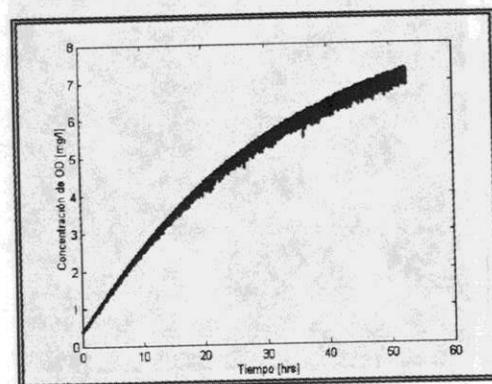


Fig. 8: Mediciones de OD, experiencia A1.

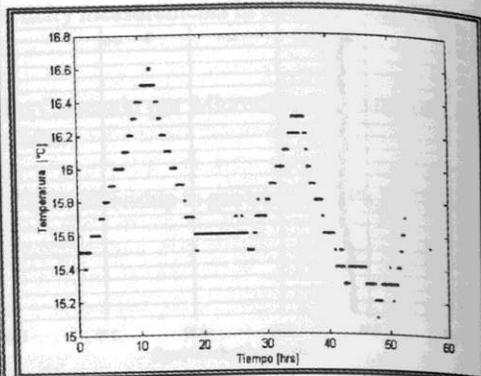


Fig. 9: Temperatura del agua, experiencia A1.

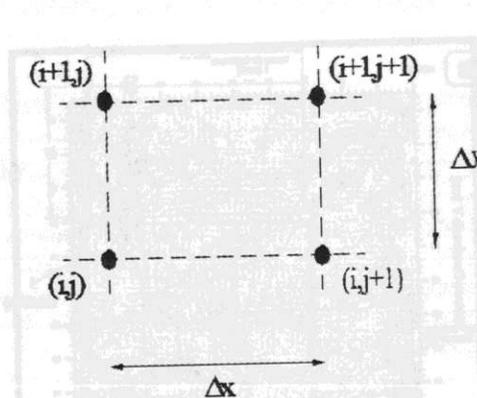


Fig. 10: Esquema de los nodos de la malla utilizada para el cálculo de variables espaciales.

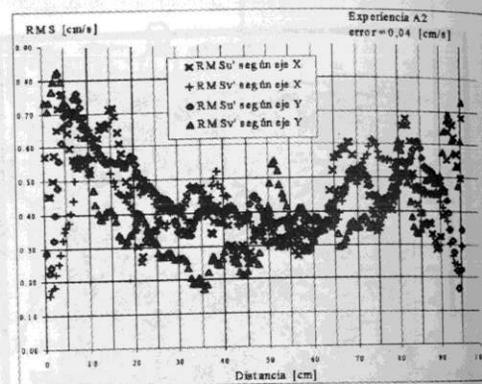


Fig. 11: Distribución espacial de los RMS de la velocidad.

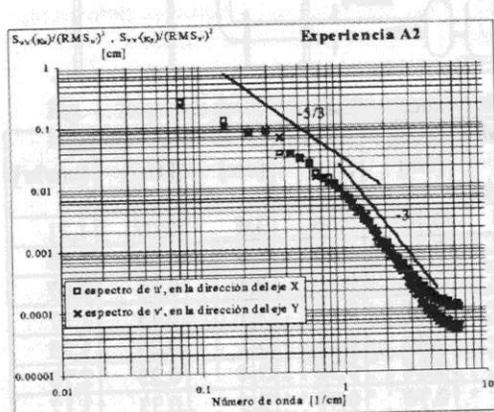


Fig. 12: Espectros promedios de las fluctuaciones de la velocidad.

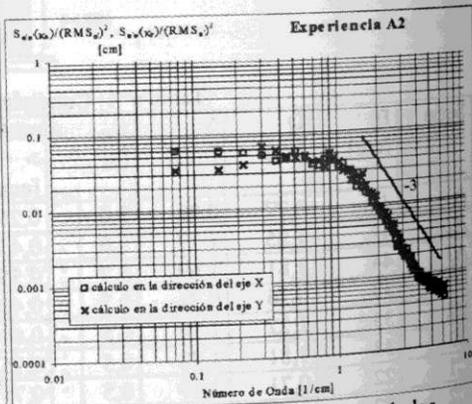


Fig. 13: Espectros promedios de las fluctuaciones de la vorticidad.

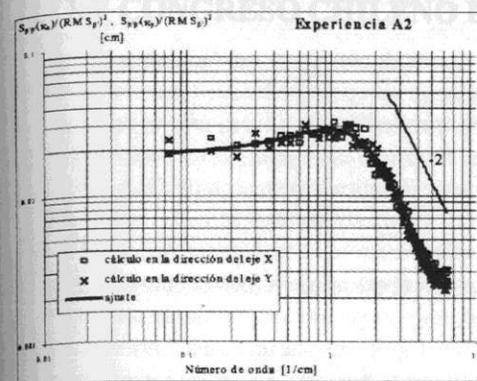


Fig. 14: Espectros promedios de  $\beta'$ .

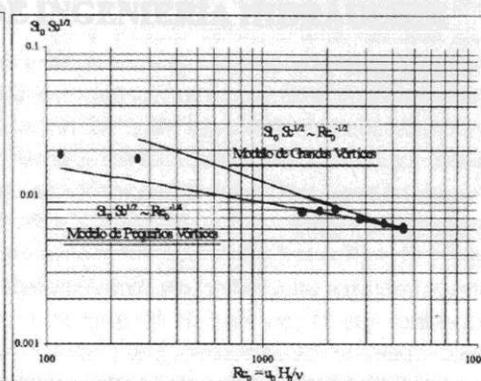


Fig. 15: Ajuste al modelo de pequeños vórtices.

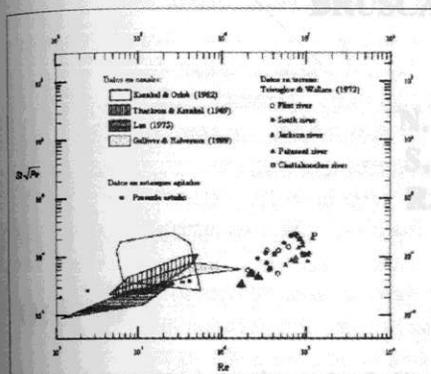


Fig. 16: Relación de K con la tasa de renovación de la superficie.

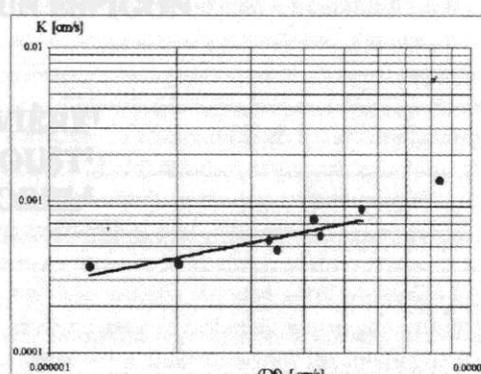


Fig. 17: Comparación de datos con experiencias en canales y ríos.