



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE  
BIOTECNOLOGÍA**

---

**DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LIQUIDO EN  
UN BIORREACTOR DE COLUMNA DE BURBUJEO**

TESIS PROFESIONAL

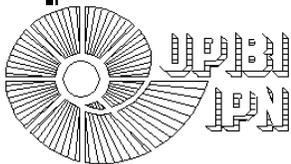
PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO BIOTECNÓLOGO

PRESENTA:

MARÍA GUADALUPE LÓPEZ MOLINA

DIRECTOR:

DR. SERGIO GARCÍA SALAS



México, D. F., 2009

**Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería de Biorreactores del Departamento de Bioingeniería, de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, bajo la dirección del Dr. Sergio García Salas.**

*En memoria de los que su cuerpo ya no está,  
gracias por su amor y eterna compañía.*

*A mi familia y amigos;*

*Por la bendición de su fe, fuerza, apoyo, inspiración y amor que me guían a la superación personal; mi amor y gratitud eternos.*

*Al profesor y amigo Sergio García Salas:*

*Por su paciencia, disposición y complicidad en la realización de este sueño...*

*Infinitas Gracias.*

*María. Guadalupe López Molina*

## INDICE

INDICE DE FIGURAS.....	5
1. RESUMEN .....	6
2. INTRODUCCIÓN .....	7
4. OBJETIVOS .....	17
4.1. General:.....	17
4.2. Específicos:.....	17
5. MÉTODOS Y MATERIALES .....	18
5.1 Aparato de medición .....	18
5.2 Electrodo.....	18
5.3 Aparato de recirculación para la obtención de curvas de intensidad de corriente vs voltaje.....	19
5.4 Columna de burbujeo y condiciones de operación .....	21
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	24
6.1 Curvas de intensidad de corriente vs voltaje (polarogramas).....	24
6.2. Curva de calibración .....	26
6.6. Distribución de la velocidad del líquido .....	27
6.3. Perfil axial de la velocidad del líquido .....	33
6.5 Relación de la velocidad del líquido y la fracción de gas retenido.....	39
7. CONCLUSIONES .....	41
8. RECOMENDACIONES.....	43
9. BIBLIOGRAFÍA .....	44

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Intensidad de corriente versus voltaje. ....	15
Figura 2. Sistema a temperatura constante para la obtención de los polarogramas a diferentes velocidades de líquido.....	20
Figura 3. Diseño de la columna de burbujeo. ....	22
Figura 4. Curvas de intensidad de corriente versus voltaje aplicado al cátodo, a diferentes velocidades del líquido .....	25
Figura 5. Curva de calibración de intensidad de corriente versus velocidad de líquido ...	27
Figura 6. Distribución de la velocidad de líquido empleando un difusor de 6 cm de diámetro, soluciones acuosas de KCl 0.01 M y 0.13 M, saturación de oxígeno disuelto al 100% a una presión de 578 mmHg y diferentes velocidades de aireación. $21^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .	29
Figura 7. Distribución de la velocidad de líquido empleando un difusor de 12 cm de diámetro, soluciones acuosas de KCl 0.01 M y 0.13 M, saturación de oxígeno disuelto al 100% a una presión de 578 mmHg y diferentes velocidades de aireación. $21^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$	30
Figura 8. Distribución de la velocidad de líquido empleando un diámetro de difusor de 12 cm y medios coalescentes y no coalescentes, a diferentes velocidades de aireación. ....	35
Figura 9. Perfiles axiales de velocidades del líquido empleando difusores de 6 y 12 cm de diámetro a diferentes alturas de la columna de burbujeo, con medio coalescente y no coalescente a velocidades de aireación de 0.27 cm/s .....	37
Figura 10. Perfiles de velocidad del líquido ( $\square$ ) y de fracción de gas retenido ( $\circ$ ), a velocidad superficial de aireación de 0.54 cm/s, con medio coalescente y no coalescente, empleando difusores de 6 y 12 cm de diámetro. ....	40

## 1. RESUMEN

La velocidad del líquido es una característica hidrodinámica importante en biorreactores porque está relacionada con la velocidad de corte a la que están sometidas las células, siendo su efecto determinante en la viabilidad de ellas o en su productividad. En este trabajo se midió la velocidad del líquido usando un método basado en la electrodifusión del oxígeno en la superficie de un sensor, generando una intensidad de corriente. A mayor intensidad de corriente, mayor velocidad del líquido. Una vez calibrado el sensor a velocidades de líquido conocidas, el método se aplicó en un biorreactor de columna de burbujeo de 14 L. La velocidad de aireación fue de 0.54 a 1.71 cm/s. Los líquidos empleados fueron soluciones acuosas de KCL 0.01 M y 0.13 M. Para cada condición de operación se hicieron mediciones locales en 25 posiciones diferentes del biorreactor. Con respecto a la precisión del método, la dispersión de datos fue de 2.5%. Los resultados muestran velocidades del líquido máximas en el centro de la columna del orden de 100 cm/s y valores menores en las zonas cercanas a la pared. Con el difusor de 6 cm de diámetro y velocidad de aireación de 1.08 cm/s, la velocidad del líquido fue 1.5 veces mayor en líquido coalescente en comparación con la obtenida en líquido no coalescente. Para líquido coalescente y velocidad de aireación de 1.08 cm/s, la velocidad del líquido obtenida con el difusor de 6 cm de diámetro fue 2.5 veces mayor que la obtenida con el difusor de 12cm de diámetro. Los perfiles experimentales de la velocidad del líquido fueron comparados con los de un modelo teórico. El modelo solamente describió los perfiles experimentales de la velocidad del líquido obtenidos a velocidades superficiales de aireación menores a 0.54 cm/s, debido principalmente a que el modelo fue obtenido en condiciones diferentes a las empleadas en este trabajo.

## 2. INTRODUCCIÓN

Los reactores de columna de burbujeo son ampliamente utilizados en la industria química en diversas operaciones de contacto gas-líquido, como por ejemplo en reacciones de síntesis. El uso de estos reactores es favorecido por su construcción y operación simple; bajos costos de inversión y operación; excelente transferencia de masa; altas velocidades de transferencia de calor por unidad de volumen (Shah y col., 1982; Guy y col., 1986). Estas características promovieron su empleo en la industria biotecnológica, denominándose biorreactores de columna de burbujeo.

Un biorreactor es un recipiente de desempeño controlado en cuanto a características de transferencia de momentum, masa y calor, en donde un biocatalizador (una enzima o una célula completa) expresa su actividad para producir un metabolito. El tipo y concentración de biocatalizador, así como las propiedades físicas del medio de biorreacción, dictan las magnitudes de las velocidades de transferencia de momentum, masa y calor, que un biorreactor debe alcanzar.

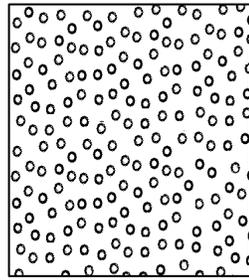
La transferencia de momentum o cantidad de movimiento en un biorreactor influye sobre la capacidad de transferencia de masa y de calor. En un biorreactor de columna de burbujeo la transferencia de momentum esta dirigida por el movimiento de las burbujas, el cual influye sobre el movimiento del líquido. Su magnitud determina las condiciones

hidrodinámicas, que se caracterizan por parámetros tales como: velocidad de corte, esfuerzo de corte, tiempo de mezclado, gas retenido, entre otros.

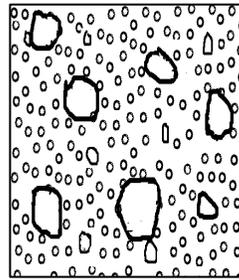
La velocidad de corte se define como el cambio de la velocidad del líquido en dirección perpendicular al flujo. La velocidad de corte y la viscosidad del líquido determinan los esfuerzos de corte o las fuerzas de cizalla que prevalecen en un biorreactor. Por lo tanto, conocer la velocidad del líquido es un primer requisito para el entender la hidrodinámica compleja en biorreactores de columna de burbujeo. (Deckwer, 1992; Joshi, 2001).

En las columnas de burbujeo se pueden distinguir regímenes de flujo homogéneo y heterogéneo dependiendo de la velocidad de aireación, propiedades físicas del líquido y dimensiones de la columna.

El régimen de flujo homogéneo en general se presenta a velocidades de aireación menores a 0.05 m/s, para líquidos de viscosidad semejante a la del agua (Shah y col., 1982). Este régimen de flujo se muestra en la figura 1 y se caracteriza por una distribución uniforme de pequeñas burbujas en toda la columna. El patrón de flujo principal resulta de la superposición de múltiples celdas de circulación. Cada celda de recirculación es causada porque en la región central ascienden más burbujas que en la parte cercana a la pared, ocasionando una recirculación del líquido formando una celda, como se muestra en la figura 2.

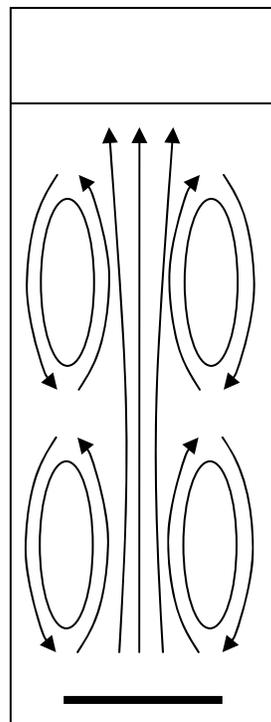


Homogéneo

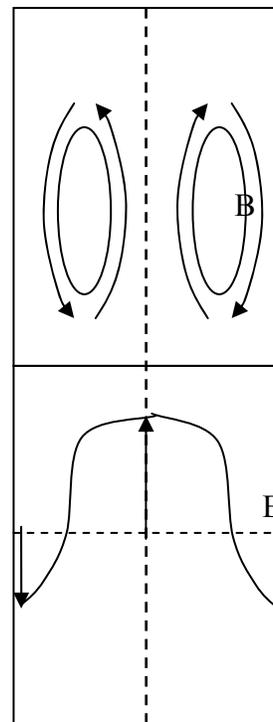


Heterogéneo

Figura 1. Regímenes de flujo en columna de burbuja.



Celdas de



Velocidad del líquido

Perfil de velocidad de líquido

Figura 2. Celdas de recirculación y perfil de velocidad de líquido.

El régimen de flujo heterogéneo se muestra en la figura 1 y se caracteriza por una distribución desigual de burbujas de muy diferentes tamaños.

En régimen de flujo homogéneo, las celdas de recirculación del líquido están relacionadas con el perfil de la velocidad de líquido. El perfil medido experimentalmente tiene un comportamiento parabólico como se ve en la figura 2 (Deckwer, 1992). En el centro de la columna se localiza la mayor velocidad ascendente del líquido, la cual disminuye a medida que se aleja radialmente hasta alcanzar un valor nulo, que corresponde a la del centro de la celda de recirculación, a partir de este punto empieza el líquido a descender hasta alcanzar una velocidad descendente máxima en la pared de la columna.

#### Modelo y perfiles de velocidad del líquido

Wu y Al-Dahhan (2001) propusieron un modelo para predecir la distribución de velocidad del líquido en una columna de burbujeo, el cual se representa mediante la ecuación 1.

$$\frac{v_L(r)}{v_{L0}} = 1 - 2.65n^{0.44}c \left[ \frac{r}{R} \right]^{2.65n^{0.44}c} \quad (1)$$

Donde:

$v_L(r)$ : velocidad del líquido en el radio  $r$

$v_{L0}$  : velocidad del líquido en el centro de la columna

$r$ : radio de la columna

$R$ : radio de la columna

Para resolver la ecuación (1), se utiliza la velocidad del líquido en el centro de la columna  $v_{L0}$  (ecuación 2), la pendiente del perfil de la fracción de gas retenido  $n$  (ecuación 3) y el valor de la fracción de gas retenido cerca de la pared  $c$  (ecuación 4).

$$v_{L0} = 0.21(gD)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{v_s^3 \rho}{g\mu} \right)^{\frac{1}{8}} \quad (2)$$

$$n = 2.188 \cdot 10^3 R_{eG}^{-0.598} F_{rG}^{0.146} M_{oL}^{-0.004} \quad (3)$$

$$c = 4.32 \cdot 10^{-2} R_{eG}^{0.2492} \quad (4)$$

Donde:

El número de Reynolds es:

$$R_{eG} = \frac{D v_s (\rho - \rho_G)}{\mu} \quad (5)$$

El número de Froude es:

$$F_{rG} = \frac{v_s^2}{g D} \quad (6)$$

El número de Morton es:

$$M_{oL} = \frac{g\mu^4}{(\rho - \rho_G)\sigma^3} \quad (7)$$

Donde:

$D$ : diámetro de la columna

$\mu$ : viscosidad del líquido

$\rho$ : densidad del líquido

$\rho_G$ : densidad del gas

$\sigma$ : tensión superficial del líquido

$g$ : constante de la gravedad

$v_s$ : velocidad superficial del gas

La circulación del líquido se debe a la existencia del perfil radial de la fracción de gas retenido. Ambos están íntimamente ligados y dependen de la velocidad superficial del gas, del diámetro de la columna y de las propiedades físicas del sistema gas-líquido. De acuerdo a la ecuación 1, el perfil de velocidad del líquido tiene valores positivos (corrientes hacia arriba) en la región central de la columna de burbujas y valores negativos (corrientes descendentes) en la zona de la pared.

## Métodos para determinar velocidad del líquido en biorreactores

A continuación se mencionan los métodos reportados en la literatura para la determinación de la velocidad del líquido en biorreactores.

### Presión diferencial

Este método determina una velocidad del líquido promedio y se basa en un balance de energía cinética hecho a partir de la diferencia de presión entre dos compartimientos de un tubo, conocido como tubo de Pavlov (Hills, 1974).

### Anemometría de hilo/película caliente

Este método determina velocidades del líquido locales y se basa en el cambio de resistencia eléctrica asociado al cambio de temperatura que experimenta un hilo/película debido al paso de una corriente de líquido. A mayor cambio de temperatura, mayor velocidad del líquido (Theofanous, 1982).

### Anemometría de turbina

Este método determina velocidades del líquido promedio en una zona que abarca el ancho de la turbina. El movimiento de la turbina es proporcional a la velocidad del líquido (Nottenkamper y col., 1983).

De los métodos antes mencionados, el de anemometría de hilo caliente es el que proporciona valores de la velocidad del líquido local. Otro método que también mide velocidades del líquido locales es el de electrodifusión, el cual se explica en seguida.

### Electrodifusión

La velocidad de líquido puede medirse haciendo uso del principio de electrodifusión. Este principio consiste en la difusión de una sustancia, denominada polarizador, a través de la película líquida que rodea al cátodo, que es impulsada por un voltaje impuesto entre un cátodo y un ánodo. En el momento en el que el polarizador llega a la superficie del cátodo, dicha sustancia se reduce y libera electrones, generando una intensidad de corriente eléctrica.

La elección del polarizador tiene la mayor importancia. En efecto, su presencia no debe influir de ninguna manera sobre el proceso biológico. En los procesos aerobios, el oxígeno es un elemento susceptible de ser reducido al contacto con un cátodo y es, por lo tanto, el mejor candidato para utilizarlo en este trabajo.

La figura 3 muestra un ejemplo de la relación entre la intensidad de corriente generada y el voltaje aplicado a un sensor (cátodo) (Fatt, 1982). Esta relación se conoce como polarograma. En los polarogramas se observa, típicamente, una región en la cual la corriente medida es independiente del voltaje aplicado. Esta región corresponde a la

meseta de la curva, e indica que la corriente medida depende exclusivamente del flujo de oxígeno que llega al cátodo. Bajo esta condición, la corriente es llamada "corriente límite" y el voltaje aplicado es llamado "voltaje de polarización". A valores de voltaje inferiores al de polarización, la corriente es controlada no solamente por el flujo de oxígeno, sino también por la transferencia de electrones entre el cátodo y el ánodo, resultando en una señal difícil de interpretar. A valores de voltaje superiores al de polarización, la corriente es superior a la correspondiente al flujo de oxígeno que llega al cátodo (Bard y col., 1980). Por lo tanto, el cátodo debe utilizarse preferentemente a condiciones de corriente límite.

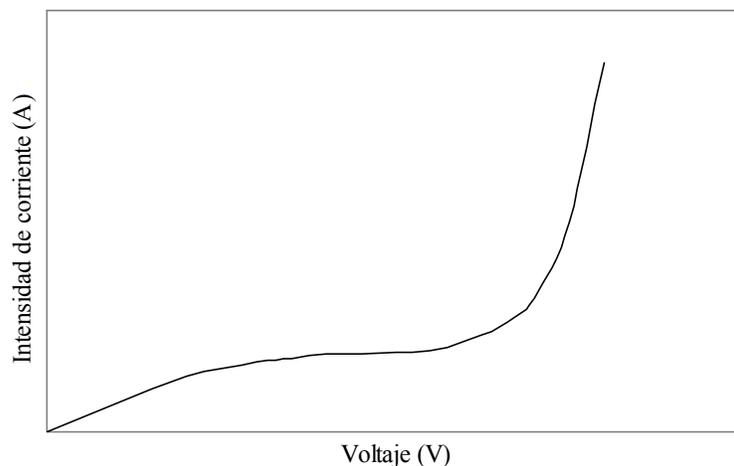


Figura 3. Intensidad de corriente versus voltaje.

Para un voltaje aplicado constante, a mayor cantidad de polarizador reducido, mayor es la intensidad de corriente generada. También, para una concentración constante de

polarizador en el líquido, el flux o la velocidad con la que el polarizador atraviesa la película líquida para llegar a la superficie del cátodo, depende de las condiciones de flujo.

Las condiciones de flujo, sean turbulencia o velocidad de líquido, influyen sobre el espesor de la película líquida que rodea al cátodo. En esta película el movimiento del polarizador es por difusión. De acuerdo con la primera ley de difusión de Fick, en sistemas diluidos el flux de la sustancia ( $J$ ) está relacionado con el coeficiente de difusión ( $D$ ), el gradiente de concentración ( $\Delta C$ ) y el espesor de la película líquida, también conocido como la distancia que separa el origen del destino de la difusión ( $\delta$ ), como muestra la ecuación 8 (Fatt, 1982). Al aumentar la turbulencia o la velocidad de líquido  $\delta$  disminuye y al permanecer constantes  $D$  y  $\Delta C$ , entonces el flux aumenta. Este aumento se traduce en que la velocidad con la que se reduce el polarizador aumenta y aumenta también la intensidad de corriente eléctrica.

$$J = \frac{D}{\delta} \Delta C \quad (8)$$

Para determinar la velocidad de líquido en un biorreactor, es necesario calibrar previamente el sistema de medición. La calibración consiste en hacer pasar velocidades de líquido conocidas sobre el cátodo y medir las intensidades de corriente resultantes. Con esos datos se obtiene una ecuación que se puede usar para calcular la velocidad del líquido, a partir de la medición de la intensidad de corriente generada por el cátodo, al colocarlo en una de las zonas de un biorreactor.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Caracterizar la velocidad del líquido local en un biorreactor es determinante en su diseño y operación, ya que permite investigar como es el perfil de velocidades del líquido, para desarrollar modelos predictivos del comportamiento de parámetros hidrodinámicos, tales como la velocidad y esfuerzos de corte que pueden prevalecer en las diferentes zonas de un biorreactor, lo cual es de importancia en el cultivo de células vegetales y animales.

### 4. OBJETIVOS

#### 4.1. General:

Determinar la velocidad de líquido local en un biorreactor de columna de burbujeo.

#### 4.2. Específicos:

Medir la intensidad de corriente en función de la velocidad de líquido de acuerdo al principio de electrodifusión.

Medir velocidades del líquido locales en un biorreactor de columna de burbujeo empleando 2 difusores de diámetro distinto a diferentes condiciones de operación.

## 5. MÉTODOS Y MATERIALES

### 5.1 Aparato de medición

La intensidad de corriente ( $I$ ) que se genera en el cátodo, debido a la reducción del oxígeno, es del orden de  $\mu\text{A}$ . Las intensidades de corriente cercanas a  $10 \mu\text{A}$  y la complejidad de impedancias que se generan en el sistema, hacen recomendable el uso de un potenciostato con tres electrodos: un cátodo, un ánodo y un electrodo de referencia. El potenciostato, como su nombre lo indica, mantiene un potencial constante entre el cátodo y el ánodo, mientras que entre el cátodo y el electrodo de referencia se establece la intensidad de corriente (Bard y col., 1980).

### 5.2 Electrodo

Es una práctica común usar electrodos de metales nobles, como el Platino, para evitar la reducción de iones metálicos en la superficie del cátodo, situación que podría distorsionar la medición. El cátodo elegido fue una esfera de Platino de 1 mm de diámetro, con una superficie de  $0.0235 \text{ cm}^2$ . El ánodo fue un alambre de Platino en espiral con área de  $20 \text{ cm}^2$ . El electrodo de referencia fue un electrodo de Calomel (Radiometer Analytical, Francia).

Como protocolo de mantenimiento preventivo de los electrodos, para evitar la formación de películas de sustancias que interfirieran en la medición, así como para que la superficie de los electrodos al inicio de cada experimento estuviera siempre en las mismas condiciones, lo que se hizo fue que antes de cada experimento, el cátodo y el ánodo se sumergían durante 5 minutos en una solución de HCl 0.05 M, para lavarlos, enjuagándose después con agua destilada.

### 5.3 Aparato de recirculación para la obtención de curvas de intensidad de corriente vs voltaje

Como se mencionó en la introducción, la intensidad de corriente medida depende de la velocidad del líquido en la vecindad de la película líquida que está sobre el cátodo, por esta razón, fue necesario mantener velocidades de líquido constantes para obtener las curvas de intensidad de corriente vs voltaje. Diseñamos por lo tanto un equipo que nos permitió obtener curvas de intensidad de corriente vs voltaje bajo condiciones definidas de velocidad de líquido, representativas de la agitación que pueda existir en un biorreactor de columna de burbuja de nivel de laboratorio. La literatura menciona que la velocidad local del líquido en una columna de burbujeo (del tamaño de la que fue usada en este trabajo) puede ser de hasta 100 cm/s (Wu y Al-Dahhan 2001; Onken y Sobolik 1991). Por lo anterior, diseñamos un aparato de recirculación para obtener curvas de intensidad de corriente vs voltaje en el intervalo de velocidad de líquido de 0 a 100 cm/s.

La figura 4 muestra el aparato de recirculación utilizado para la obtención de las curvas de intensidad de corriente vs voltaje a diferentes velocidades del líquido. El cátodo se colocó justo a la salida de un tubo de acrílico de 1.9 cm de diámetro interior, conectado a una bomba centrífuga de 1/20 HP, 125 W (Little Giant Pump, USA). El flujo del líquido de recirculación fue controlado mediante una válvula de bola (Cole Parmer, USA) y medido con un rotámetro (Cole Parmer, USA). Las curvas de intensidad de corriente vs voltaje fueron obtenidas utilizando como líquido una solución acuosa de KCl 0.13 M. Esta solución tiene características no coalescentes, es decir, las burbujas formadas en ella no se unen para formar burbujas más grandes, por lo que prácticamente mantienen su tamaño. Antes de cada experimento, el medio líquido se saturó con oxígeno a presión atmosférica. Los experimentos fueron realizados a una temperatura de  $21^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . La intensidad de corriente se midió con un potenciostato y se registró en una computadora, mediante un convertidor analógico/digital (PCL-818HD, Advantech Co. USA) a frecuencia de 100 Hz.

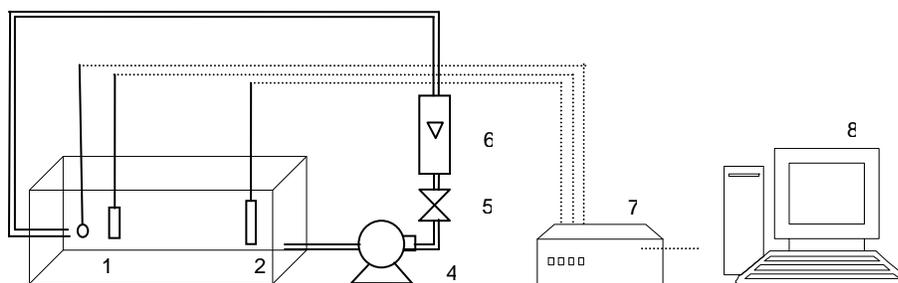


Figura 4. Sistema a temperatura constante para la obtención de los polarogramas a diferentes velocidades de líquido. Cátodo de Platino (1), electrodo de referencia (2), ánodo de Platino (3), bomba de recirculación (4), válvula (5), rotámetro (6), potenciostato (7), computadora (8).

#### 5.4 Columna de burbujeo y condiciones de operación

La figura 5 muestra la columna de burbujeo de 14 L usada en este trabajo. Esta columna tiene un diámetro interno de 12 cm y una altura de 160 cm, posee 7 tomas de muestra, ubicadas cada 20 cm y un difusor poroso en el fondo. Los difusores probados fueron de vidrio sinterizado de 6 y 12 cm de diámetro, con diámetros de poro de 100 a 160  $\mu\text{m}$  (Schott, Alemania). La velocidad superficial del gas  $v_s$  fue de 0.25 a 1.7 cm/s. El flujo de aire se controló con una válvula de aguja y se midió con un rotámetro de área variable (Cole Parmer, USA).

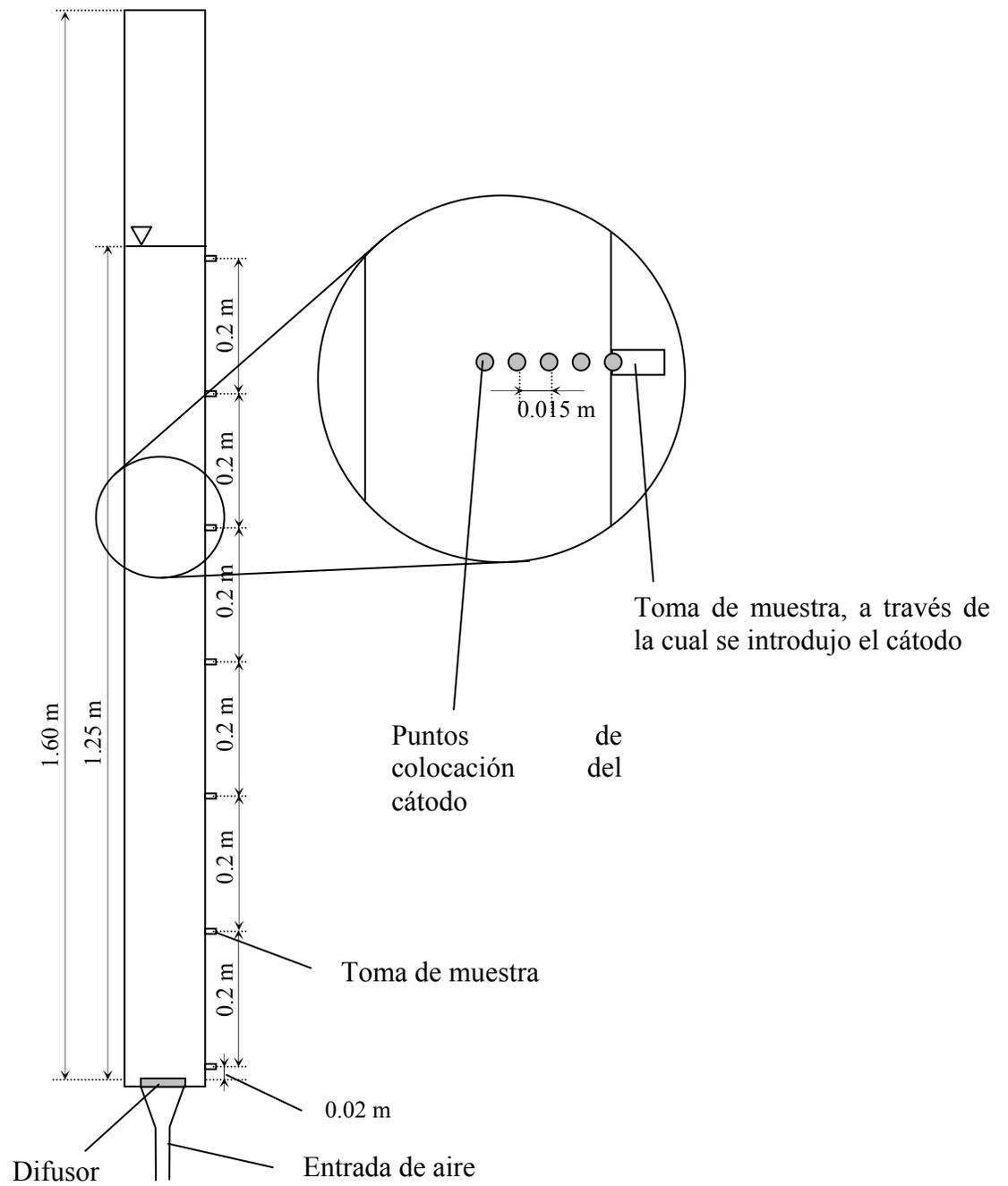


Figura 5. Diseño de la columna de burbujeo.

Los medios líquidos fueron soluciones acuosas de KCl 0.01 M y 0.13 M, como líquidos no coalescente y coalescente, respectivamente. En efecto, el cátodo no puede funcionar en un líquido que no presente conductividad y por lo tanto, no podría funcionar en agua destilada (medio 100 % no coalescente). Sin embargo, una solución con una concentración de 0.01 M, se comporta como un medio coalescente (Pannek y col., 1994). Por esta razón, los resultados obtenidos con la solución de KCL 0.01 M, podrían considerarse semejantes a los que se obtendrían usando agua destilada. Con respecto a la solución acuosa de KCL 0.13 M, tenemos que su fuerza iónica es de 0.130 Mol/L. A este respecto, Matsumara y col. (1982), así como Robinson y Wilke (1973), encontraron que fuerzas iónicas por arriba de 0.125 Mol/L, no cambian el valor de  $k_L a$ . La explicación dada por Keitel y Onken (1982), es que a fuerzas iónicas superiores a 0.13 Mol/L, existe un efecto limitado sobre el diámetro promedio de burbuja de Sauter.

Durante todos los experimentos, se consideró que la concentración de oxígeno disuelto es igual a 6.1 mg/L, que es la concentración de saturación a la presión atmosférica de la ciudad de México (72.3 kPa).

El volumen de trabajo en la columna de burbujeo fue de 14 L. La altura de la dispersión gas-líquido se mantuvo constante en  $H/D = 10.4$ , donde  $H$  es la altura de la dispersión gas-líquido y  $D$  es el diámetro de la columna.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Curvas de intensidad de corriente vs voltaje (polarogramas)

Antes de medir la velocidad del líquido en el biorreactor de columna de burbujeo fue necesario conocer el voltaje de polarización del cátodo, por esa razón, el primer paso es la determinación de las curvas de intensidad de corriente vs voltaje aplicado al cátodo, también conocidas como polarogramas. La figura 6 muestra las curvas de intensidad de corriente vs voltaje obtenidas a varias velocidades de líquido, empleando una solución acuosa de KCL 0.13 M, a  $21 \pm 0.5$  °C. Las mediciones se hicieron por triplicado y las desviaciones estándar fueron en promedio de 2.5%. Las desviaciones estándar no se muestran para mayor claridad de la figura. Se puede notar que existen incrementos en la intensidad de corriente cuando aumenta la velocidad del líquido, situación que Onken y Sobolik (1991) atribuyen a la disminución del espesor de la capa límite de líquido localizada alrededor del cátodo. Estos resultados muestran que el cátodo desarrollado es capaz de convertir en corriente eléctrica no solamente los cambios de velocidad del líquido, sino también indirectamente, el espesor de la película líquida de la interfase líquido-sólido, lo cual es una primera confirmación de la factibilidad de medir directamente la velocidad del líquido utilizando el cátodo.

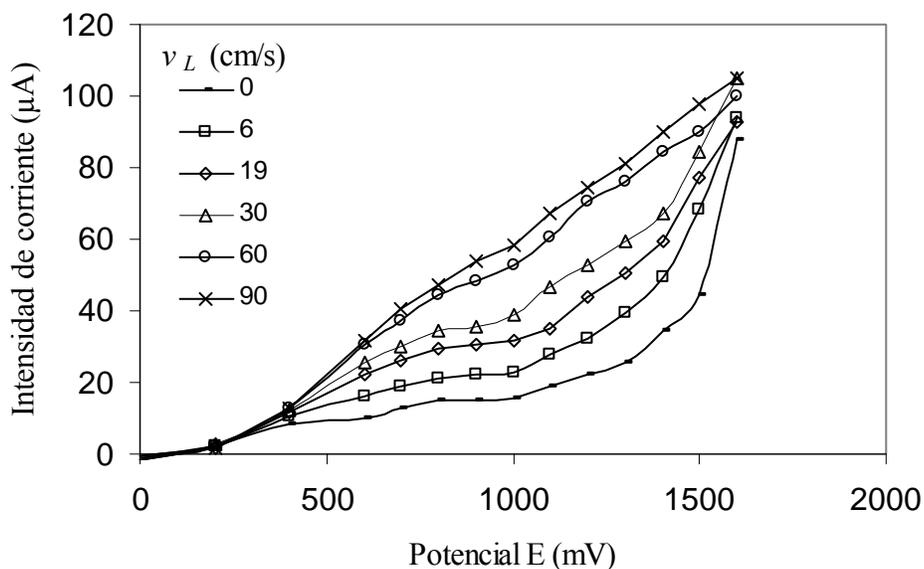


Figura 6. Curvas de intensidad de corriente versus voltaje aplicado al cátodo, a diferentes velocidades del líquido ( $v_L$ ), empleando una solución acuosa de KCl 0.13 M, a  $21^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ .

En la figura 6 se puede notar la ausencia de regiones de meseta bien definidas. Los polarogramas correspondientes a velocidades de líquido menores a 30 cm/s, tienen una región de pendiente mínima entre 800 y 1000 mV. Sin embargo, al aumentar la velocidad del líquido, también aumentó la pendiente en este intervalo de voltaje. Por ejemplo, a la velocidad de 90 cm/s, la pendiente  $\Delta I/\Delta E$  alcanza un valor de  $68 \mu\text{A/V}$ . Este valor es menor a  $95 \mu\text{A/V}$ , que fue presentado por Onken y Sobolik (1991), quienes utilizaron un cátodo polarográfico para medir la velocidad del líquido. En efecto, cabe subrayar que la existencia de una meseta no es una condición necesaria. Por lo tanto, a partir de las curvas de intensidad de corriente vs voltaje de la figura 6, el voltaje de polarización seleccionado para realizar los siguientes experimentos fue de 900 mV.

## 6.2. Curva de calibración

La figura 7 muestra la curva de calibración de la intensidad de corriente obtenida a las diferentes velocidades de líquido que se hicieron pasar sobre el cátodo, utilizando un voltaje de polarización de 900 mV. Las velocidades de líquido probadas en el aparato de recirculación descrito en la sección 3.3, estuvieron en el intervalo de 0 a 100 cm/s, que es el intervalo de velocidades de líquido esperado en biorreactores de tamaño semejante al utilizado en este trabajo y operando bajo condiciones de operación normales, es decir, a velocidades superficiales de aireación de entre 0.24 y 1.7 cm/s. La relación entre la intensidad de corriente y la velocidad del líquido es lineal, con un coeficiente de correlación de 0.9906 y una desviación estándar de 0.025  $\mu\text{A}$ . Estos resultados indican que la ecuación obtenida de la curva de calibración mostrada en la figura 7, puede ser utilizada para calcular la velocidad de líquido en algún punto dentro del biorreactor, una vez que se mida la intensidad de corriente generada en el sensor (cátodo), al colocarlo en dicho punto. Así, la ecuación 9 es la que se utilizó para calcular la velocidad del líquido.

$$v_L = \frac{I - 21.314}{0.4197} \quad (9)$$

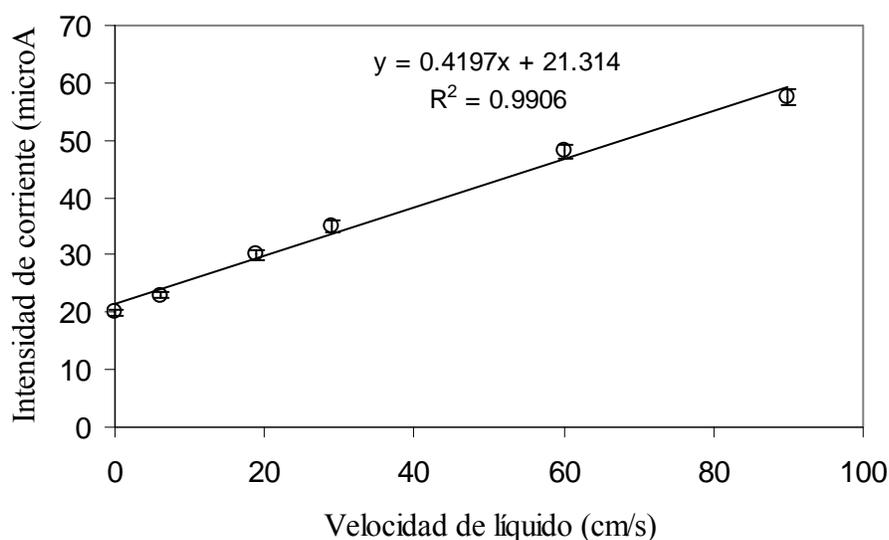


Figura 7. Curva de calibración de intensidad de corriente versus velocidad de líquido, obtenida en el aparato de recirculación descrito en la sección 3.3, obtenida empleando solución acuosa de KCl 0.13 M, a  $21^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  y saturación de 100% de oxígeno disuelto a una presión de 578 mmHg. El voltaje de aplicado fue de 900 mV.

#### 6.6. Distribución de la velocidad del líquido

Las figuras 8 y 9 muestran la distribución de la velocidad de líquido en el biorreactor de columna de burbujeo de 14 L, empleando un difusor de 6 cm y 12cm de diámetro, respectivamente, para soluciones acuosas de KCl 0.01 M y 0.13 M, saturación de oxígeno disuelto al 100% a una presión de 578 mmHg, velocidades superficiales de aireación de 0.27 cm/s a 1.71 cm/s y  $21^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .

En términos generales, las figuras 8 y 9 muestran lo siguiente:

i. Velocidad del líquido en las diferentes zonas de la columna de burbujeo

La velocidad del líquido es mayor en la zona central y menor cerca de la pared de la columna. Este comportamiento es acorde a la distribución de la fracción de gas retenido y del diámetro de burbuja en bioreactores de columna de burbujeo, reportadas por Hernández (2006) y Vital (2006). En ambas distribuciones, las mayores fracciones de gas retenido y diámetros de burbuja se localizan en la zona central; mientras que las menores fracciones de gas retenido y diámetros de burbuja se localizan cerca de la pared de la columna.

ii. Velocidad del líquido en función de la velocidad de aireación

Al aumentar la velocidad de aireación, aumenta la velocidad del líquido. Esto es debido a la relación directa que existe entre la fracción de gas retenido y el diámetro de burbuja con la velocidad de aireación. En efecto, a mayor cantidad de aire suministrada a la columna de burbujeo, mayor fracción de gas retenido y mayor diámetro de burbuja, los cuales provocarán un mayor impulso al líquido, generando mayores velocidades del líquido. Por otro lado, conforme aumenta la altura de la columna, la velocidad del líquido tiende a disminuir. Este hecho también está relacionado con la disminución de la fracción de gas retenido en la parte superior de la columna (Hernández, 2006).

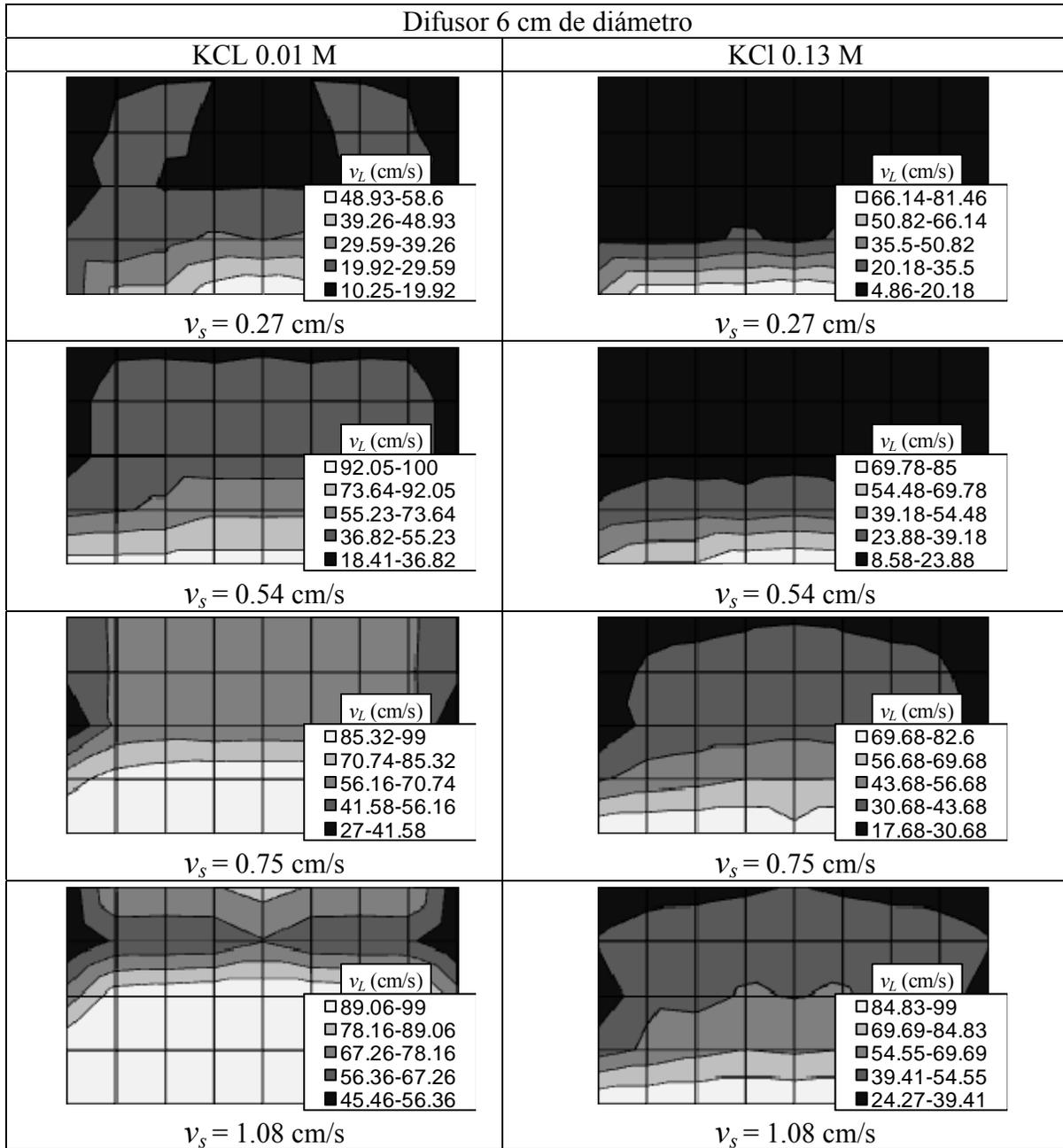


Figura 6. Distribución de la velocidad de líquido empleando un difusor de 6 cm de diámetro, soluciones acuosas de KCl 0.01 M y 0.13 M, saturación de oxígeno disuelto al 100% a una presión de 578 mmHg y diferentes velocidades de aireación.  $21^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Eje x: posición radial/radio de la columna de burbujeo ( $r/R=-1, -0.75, -0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ ). Eje y: relación de altura a diámetro en donde se hicieron las mediciones ( $H/D=0.22, 0.42, 0.62, 0.85, 1.02$ ).

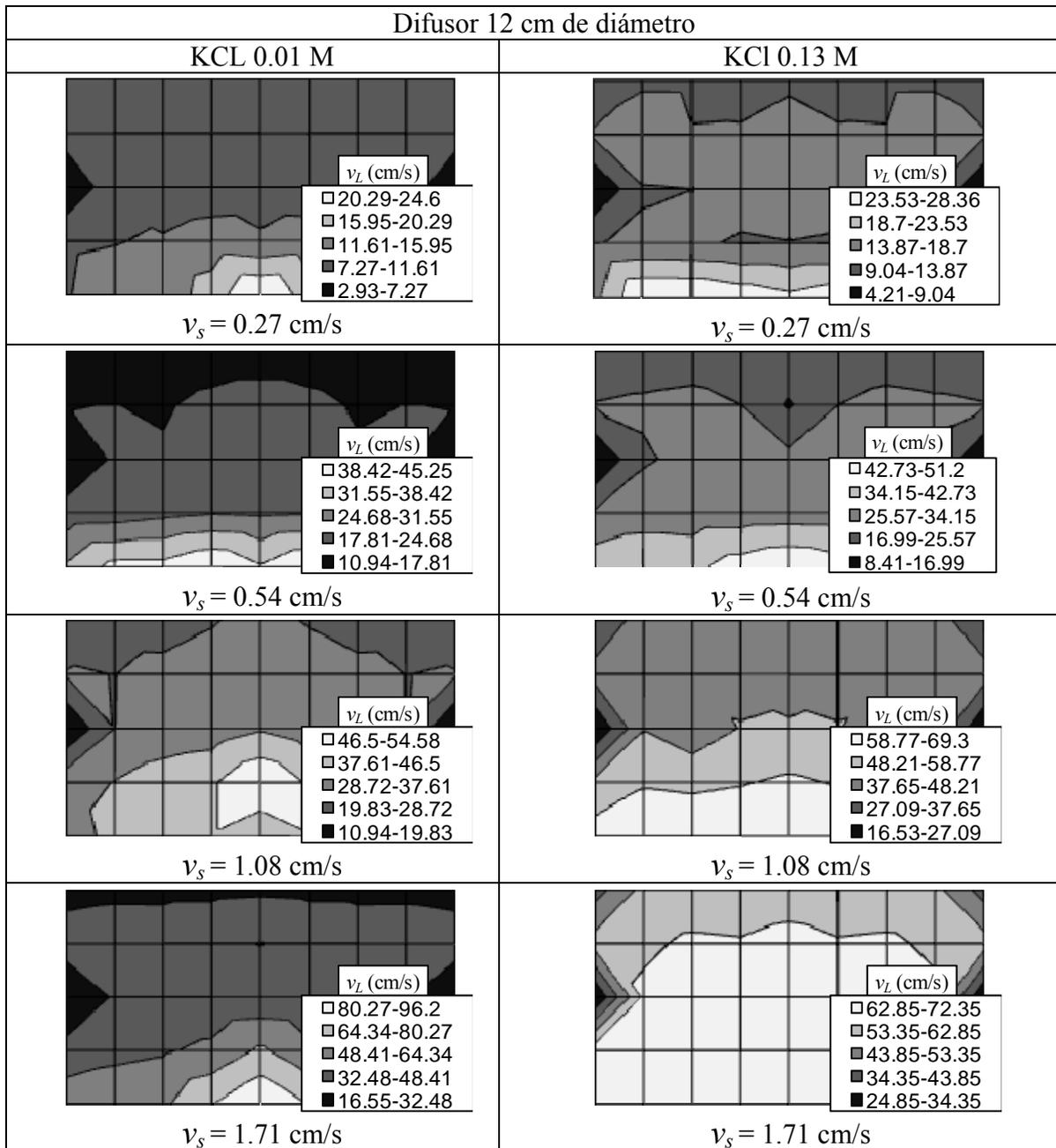


Figura 7. Distribución de la velocidad de líquido empleando un difusor de 12 cm de diámetro, soluciones acuosas de KCl 0.01 M y 0.13 M, saturación de oxígeno disuelto al 100% a una presión de 578 mmHg y diferentes velocidades de aireación.  $21^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Eje x: posición radial/radio de la columna de burbujeo ( $r/R=-1, -0.75, -0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ ). Eje y: relación de altura a diámetro en donde se hicieron las mediciones ( $H/D=0.22, 0.42, 0.62, 0.85, 1.02$ ).

### iii. Velocidad del líquido en función del diámetro del difusor

Para el medio coalescente e igual velocidad de aireación, la velocidad del líquido es mayor al usar el difusor de 6 cm de diámetro en comparación con la obtenida con el difusor de 12 cm de diámetro. Una explicación a estos comportamientos, es que para la misma velocidad de aireación, la velocidad lineal que tiene el aire a la salida del difusor de 6 cm de diámetro es 4 veces mayor que la velocidad lineal que tiene el aire a la salida del difusor de 12 cm de diámetro, ocasionando una mayor velocidad del líquido. Por lo tanto, para difusor de 6 cm de diámetro, la mayor velocidad del líquido junto a la coalescencia del medio, generan burbujas más grandes y por lo tanto, mayores velocidades del líquido.

### Velocidad del líquido en función de la coalescencia del líquido

Con respecto a la influencia de la coalescencia sobre la velocidad del líquido, la figura 8 muestra que para difusor de 6 cm de diámetro y considerando la misma velocidad de aireación, la velocidad del líquido es mayor en líquido coalescente (solución de KCl 0.13 M) en comparación con las velocidades del líquido obtenidas en medio no coalescente (solución de KCl 0.01 M). Por ejemplo, a velocidad de aireación de 1.08 cm/s la velocidad del líquido fue 1.5 veces mayor en líquido coalescente en comparación con la obtenida en líquido no coalescente (ver figura 10). Este comportamiento corresponde a un régimen heterogéneo que resulta del suministro de aire a través de un área menor a la sección transversal de la columna y la coalescencia de las burbujas, promoviendo el incremento de la velocidad del líquido (Guy y col., 1986).

La figura 9 muestra que para el difusor de 12 cm de diámetro y líquido no coalescente, la velocidad del líquido es mayor en comparación con la obtenida con el líquido coalescente. Por ejemplo, para velocidad de aireación de 1.71 cm/s, la velocidad del líquido fue 1.4 veces mayor en líquido no coalescente con respecto a la obtenida en líquido coalescente (ver figura 10). Este comportamiento corresponde a un régimen homogéneo que resulta del suministro de aire a través de un área igual a la sección transversal de la columna y a la no coalescencia de las burbujas, haciendo que la fracción de gas retenido predomine sobre el efecto de la coalescencia, en el incremento de la velocidad del líquido (Guy y col., 1986).

La figura 10 muestra el promedio de velocidades del líquido obtenidas con difusores de diámetro de 6 cm y 12 cm de diámetro, en soluciones de KCL 0.01 M y 0.13 M. Para líquido coalescente y velocidad de aireación de 1.08 cm/s, la velocidad del líquido obtenida con el difusor de 6 cm de diámetro fue 2.5 veces mayor que la obtenida con el difusor de 12cm de diámetro. En el caso de líquido no coalescente y velocidad de aireación de 1.71 cm/s, la velocidad del líquido obtenida con el difusor de 6 cm de diámetro fue 1.16 veces mayor que la obtenida con el difusor de 12cm de diámetro. Para diámetros de difusor menores al diámetro de la columna y líquido coalescentes favorecen un régimen de flujo heterogéneo, potencializando el incremento de la velocidad del líquido.

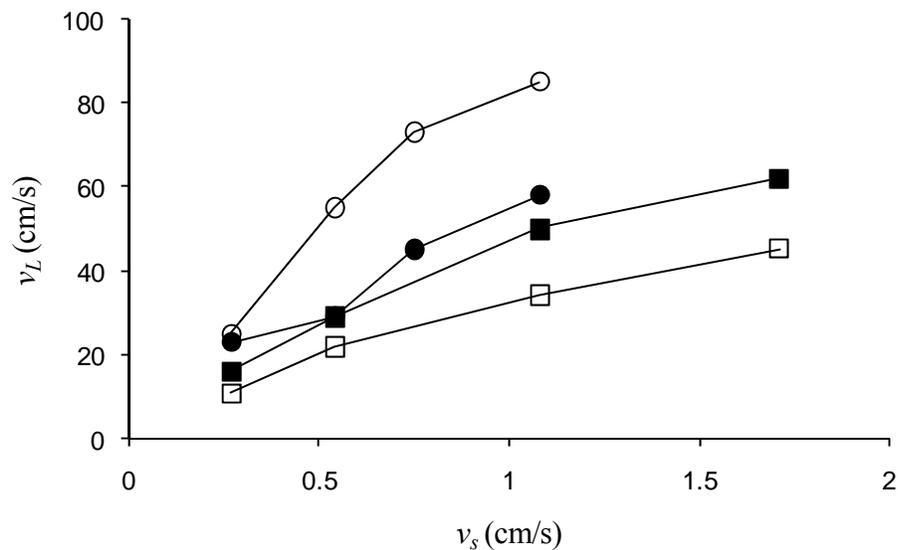


Figura 10. Promedio de velocidades del líquido obtenidas con difusores de diámetro de 6 cm y solución de KCL 0.01 M ( $\circ$ ) y solución de KCl 0.13 M ( $\bullet$ ). Para difusor de 12 cm de diámetro y solución de KCL 0.01 M ( $\square$ ) y solución de KCl 0.13 M ( $\blacksquare$ ).

### 6.3. Perfil axial de la velocidad del líquido

La figura 11 muestra los perfiles axiales de la velocidad del líquido a diferentes alturas de la columna de burbujeo, al utilizar medios coalescentes y no coalescentes, así como difusores de 6 cm y 12 cm de diámetro y, velocidades de aireación de 0.27 cm/s a 1.71 cm/s. Es necesario aclarar que en este trabajo únicamente se midió la magnitud de la velocidad, puesto que el método empleado no tiene la capacidad de determinar la dirección de la velocidad.

La figura 11 y las figuras 8 y 9 se complementan, permitiendo un análisis más detallado del comportamiento de la velocidad de líquido bajo las condiciones de operación empleadas. Mientras que las figuras 8 y 9 muestran zonas en la columna, de intervalos de los valores de la velocidad del líquido, la figura 11 muestra valores puntuales de la velocidad del líquido.

Al observar la figura 11, en algunos casos existen comportamientos que se salen de las descripciones anteriores. La explicación a estos casos se debe a variaciones en las corrientes del líquido creadas azarosamente en diferentes direcciones, por la influencia de diferentes fracciones de gas retenido y tamaños de burbujas en diferentes planos, sobre todo en los niveles cercanos al difusor. Es bien conocido que el movimiento del líquido en biorreactores de columna de burbujeo, se dice que es de naturaleza azarosa en cuanto a magnitud y dirección (Weiland y Onken, 1981; Kulkarni y col., 2004).

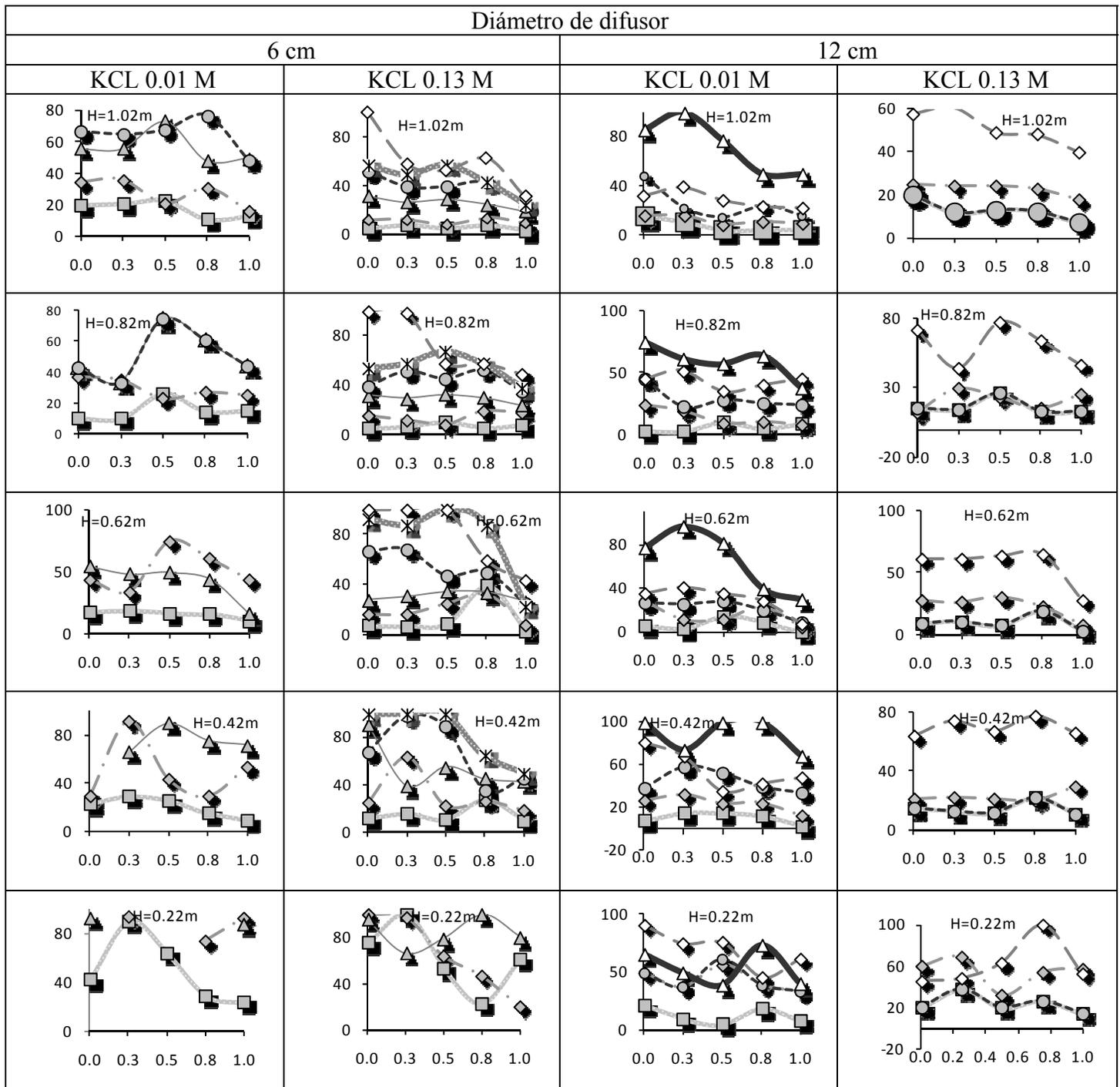


Figura 11. Distribución de la velocidad de líquido empleando un diámetro de difusor de 12 cm y medios coalescentes y no coalescentes, a diferentes velocidades de aireación.  $v_s=0.27$  cm/s (■),  $v_s=0.54$ cm/s (◆),  $v_s=1$  cm/s (▲),  $v_s=1.08$  cm/s (●),  $v_s=1.67$  cm/s (\*),  $v_s=1.71$  cm/s (◇),  $v_s=2.47$  cm/s (△). Eje x:  $r/R$  (-), eje y:  $v_L$  (cm/s).

#### 6.4. Modelo y perfiles de velocidad del líquido

Las figuras 12 y 13 muestran los perfiles de la velocidad del líquido a diferentes alturas de la columna de burbujeo, obtenidos en este trabajo con los calculados con el modelo, al utilizar medios coalescentes y no coalescentes, velocidades de aireación de 0.27 a 1.71 cm/s y con difusores de 6 y 12 cm de diámetro, respectivamente. Es necesario aclarar que a los valores experimentales de la velocidad del líquido correspondientes a las posiciones  $r/R$  de 0.75 y 1.0, se les puso signo negativo (en este trabajo únicamente se midió la magnitud de la velocidad, no su dirección), pues en las zonas cercanas a la pared de la columna, las corrientes del líquido van hacia abajo ((Deckwer, 1992; van't Riet, 1991).

Los perfiles de velocidades del líquido generados por el modelo solamente describen relativamente bien ( $r^2 > 0.70$ ) a la mayoría de los perfiles experimentales de velocidad de líquido, obtenidos a bajas velocidades de aireación (0.27 cm/s y 0.54 cm/s), localizados en todas las alturas donde se midió la velocidad del líquido. La no predicción del modelo a velocidades de aireación más altas, probablemente se deba a que el modelo fue desarrollado para datos obtenidos en un intervalo de velocidad superficial de 2 a 60 cm/s, en columnas de burbujeo de 0.1 a 0.63 m de diámetro, que son comparativamente mayores a la velocidad de aireación y al diámetro de la columna utilizados en este trabajo. Además, en el modelo se simplificaron las ecuaciones al no considerar la fracción de gas retenido, restringiendo así su intervalo de aplicación.

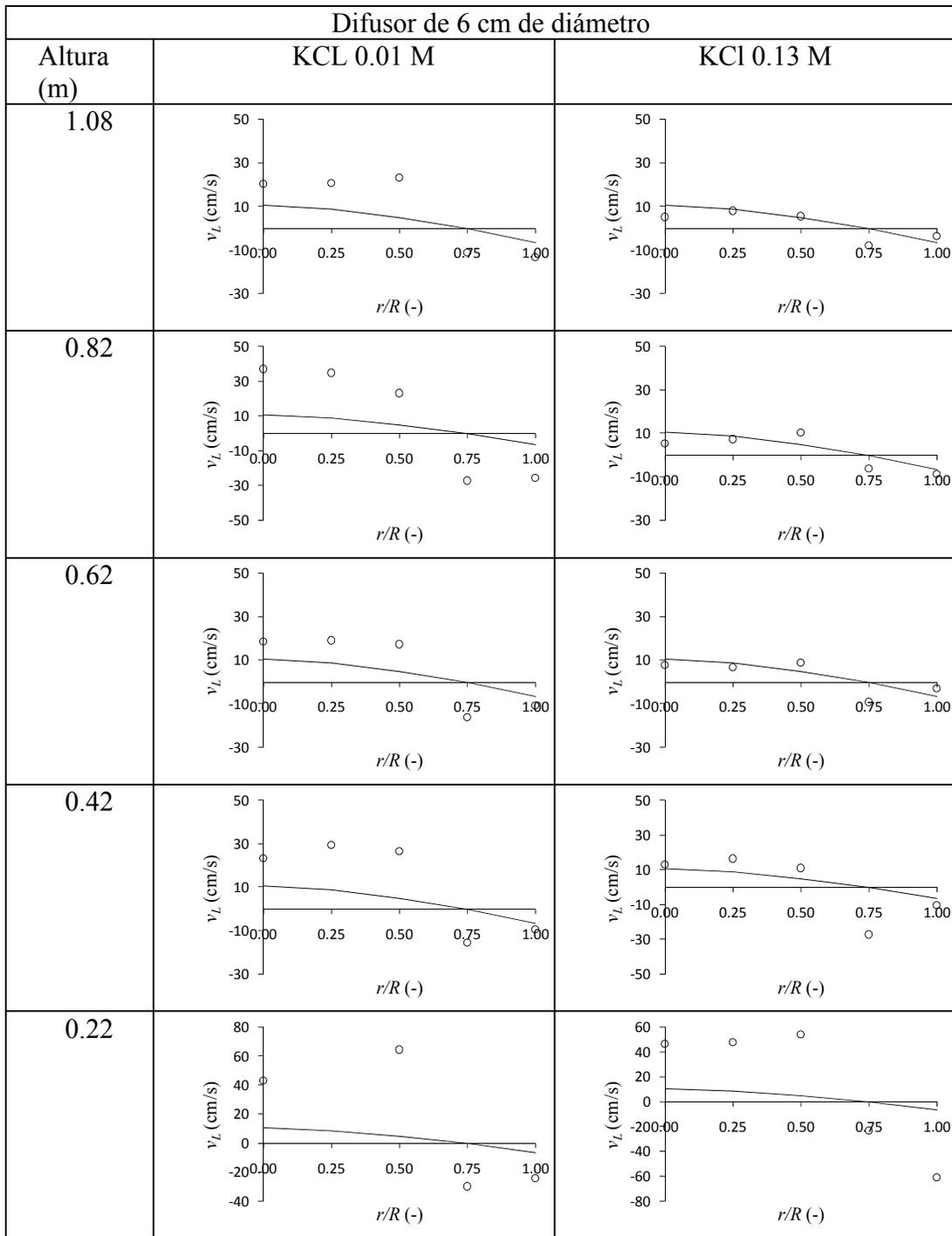


Figura 12. Perfiles de velocidades del líquido empleando difusor de 6 cm de diámetro a diferentes alturas de la columna de burbujeo, con medio coalescente y no coalescente, a velocidades de aireación de 0.27 cm/s. Datos experimentales ( $\circ$ ), modelo ( $\text{—}$ ).

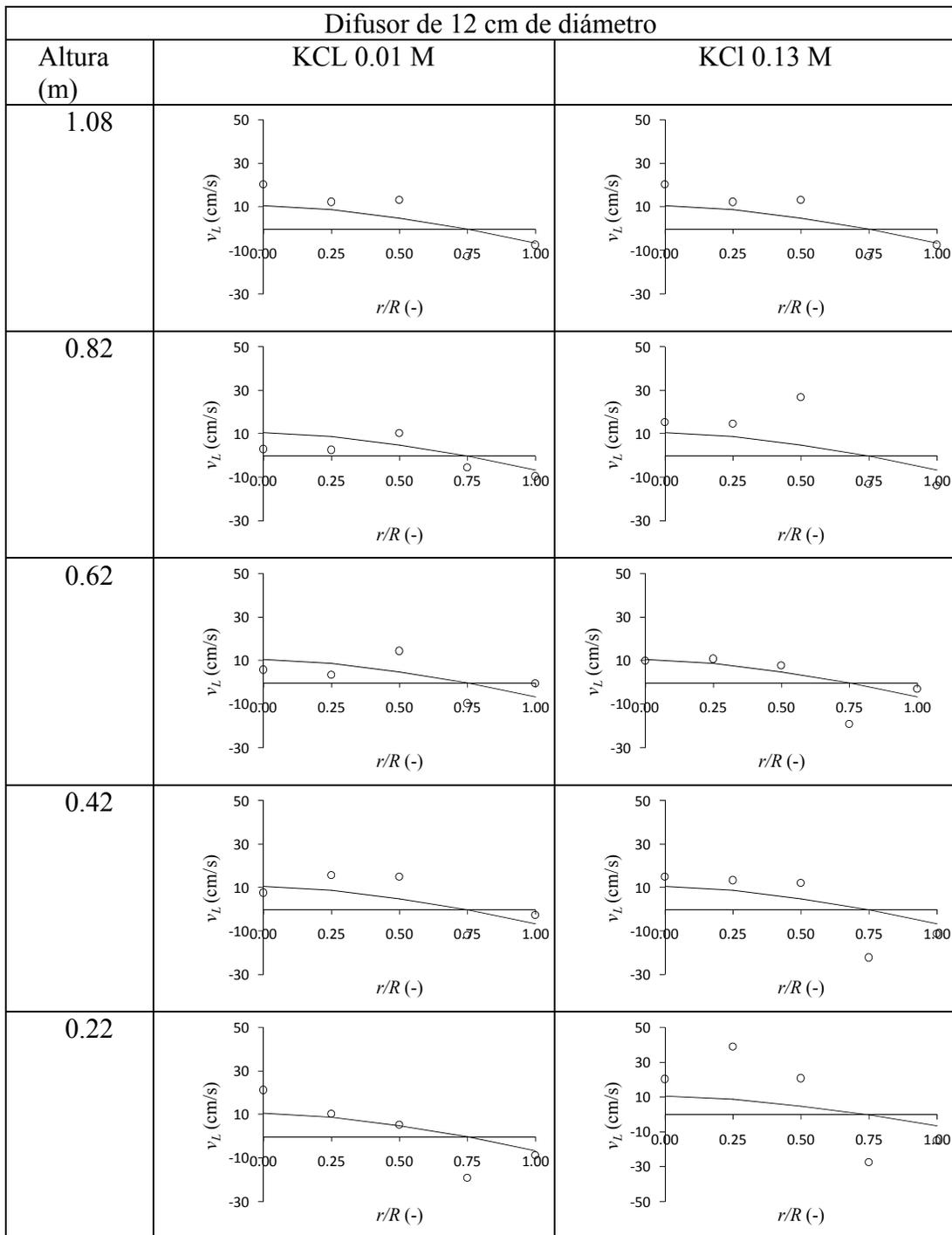


Figura 13. Perfiles de velocidades del líquido empleando difusor de 12 cm de diámetro a diferentes alturas de la columna de burbujeo, con medio coalescente y no coalescente, a velocidades de aireación de 0.27 cm/s. Datos experimentales (○), modelo (—).

## 6.5 Relación de la velocidad del líquido y la fracción de gas retenido

La figura 14 muestra los perfiles de velocidad del líquido y de la fracción de gas retenido, a velocidades de aireación de 0.54 cm/s, con medio coalescente y no coalescente, empleando difusores de 6 y 12 cm de diámetro. En efecto, a pesar de que ambos perfiles no son exactamente iguales, en ambos los valores máximos están en la zona central de la columna y los menores valores están cercanos a la pared de la columna de burbujeo. Esto es una evidencia más de la relación existente entre la velocidad del líquido y la fracción de gas retenido; es decir, aumentos en la velocidad del líquido corresponden a aumentos en la velocidad de gas retenido (Weiland y Onken, 1981; Buchholz y col., 1979).

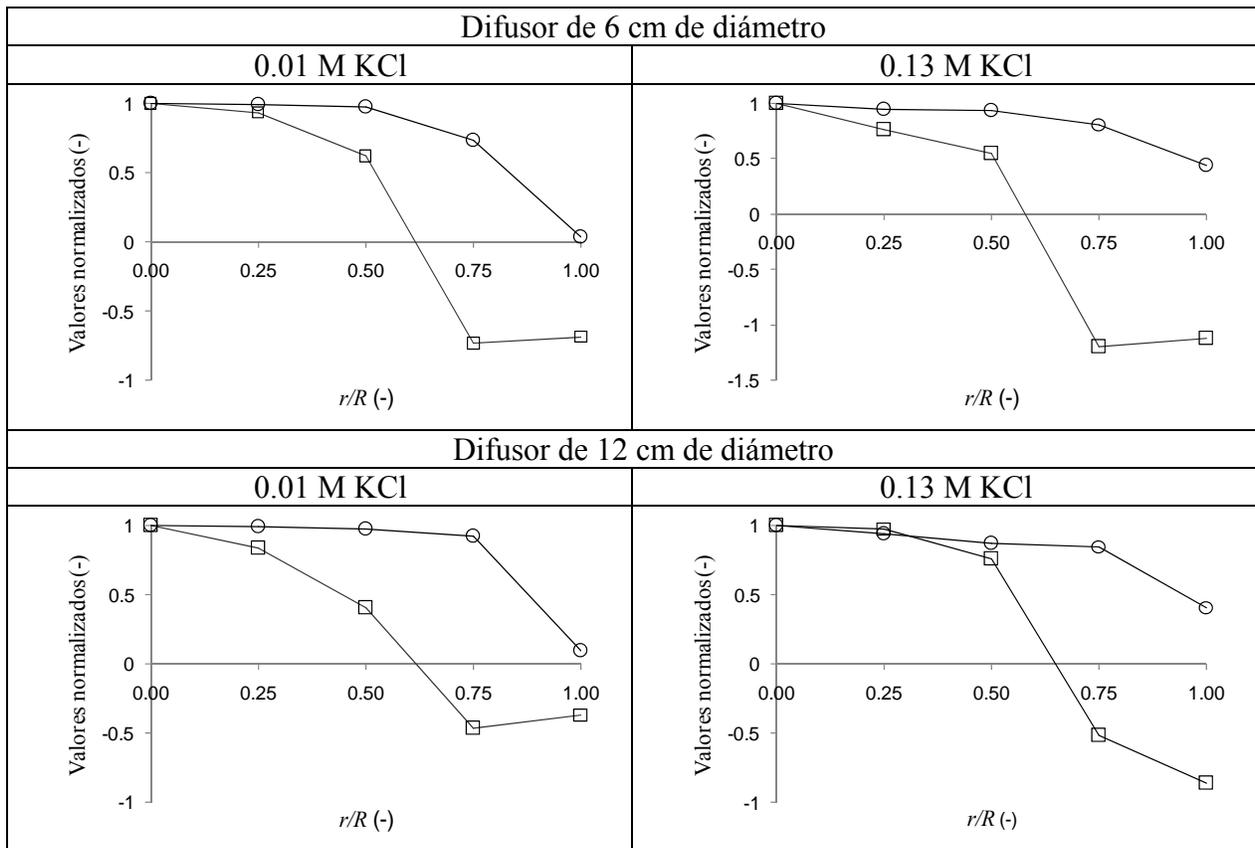


Figura 14. Perfiles de velocidad del líquido ( $\square$ ) y de fracción de gas retenido ( $\circ$ ) (Hernández, 2006), a velocidad superficial de aireación de 0.54 cm/s, con medio coalescente y no coalescente, empleando difusores de 6 y 12 cm de diámetro.

## 7. CONCLUSIONES

La intensidad de corriente generada en el cátodo, debido a la reducción química del oxígeno, fue una función lineal de la velocidad del líquido y sirvió para calibrar el método de medición de velocidad del líquido. El voltaje de polarización aplicado fue de 900 mV.

La desviación estándar máxima de las mediciones de intensidad de corriente fue de 2.5%, lo que se traduce en diferencias máximas de 3.6% en valores de la velocidad del líquido.

La velocidad del líquido se midió en 5 posiciones radiales de cada una de 5 alturas de la columna de burbujeo, a diferentes velocidades de aireación. Las velocidades del líquido fueron desde 2 hasta 100 cm/s, encontrándose las mayores en la zona central y las menores cerca de la pared de la columna, de manera análoga a la distribución de la fracción de gas retenido y del diámetro de burbujas. También al aumentar la velocidad de aireación, aumentó la velocidad del líquido.

Para líquido coalescente y velocidad de aireación de 1.08 cm/s, la velocidad del líquido obtenida con el difusor de 6 cm de diámetro fue 2.5 veces mayor, que la obtenida con el difusor de 12 cm de diámetro, prevaleciendo un régimen de flujo heterogéneo, donde la coalescencia es relevante para el incremento de la velocidad del líquido.

En el caso de líquido no coalescente y velocidad de aireación de 1.71 cm/s, la velocidad del líquido obtenida con el difusor de 6 cm de diámetro fue 1.16 veces mayor, que la obtenida con el difusor de 12 cm de diámetro, prevaleciendo un régimen de flujo homogéneo, donde la coalescencia es irrelevante para el incremento de la velocidad del líquido.

Los perfiles experimentales de la velocidad del líquido fueron comparados con los de un modelo teórico. El modelo solamente describió los perfiles experimentales de la velocidad del líquido obtenidos a velocidades superficiales de aireación menores a 0.54 cm/s, debido principalmente a que el modelo fue obtenido en condiciones diferentes a las empleadas en este trabajo.

## 8. RECOMENDACIONES

Con los perfiles de velocidad del líquido, estimar los esfuerzos de corte que prevalecen en las diferentes zonas del biorreactor de columna de burbujeo.

Medir la velocidad del líquido en biorreactores de diferentes tipos y tamaños, empleando líquidos de viscosidad y coalescencia diferentes.

Desarrollar un modelo basado en datos experimentales de la fracción de gas retenido, que describa el comportamiento de la velocidad del líquido a las diferentes velocidades de aireación empleadas en el biorreactor de columna de burbujeo.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Bard A., Faulkner J., Larry R. 1980. Electrochemical methods. Fundamentals and applications. John Wiley and Sons, Inc. USA. pp 123-167.

Buchholz R., Adler I., Shügerl K. 1979. Investigation of structure of two-phase flow model-media in bubble column bioreactors. Appl. Microbiol. Biotech. 7: 135-147.

Deckwer W.D. 1992. Bubble column reactors. John Wiley and Sons.

Fatt I. 1982. Polarographic oxygen sensors. Its theory and its applications in biology, medicine and technology. CRC Press Inc. USA. pp 1-17.

Guy C., Carreu P.J., Paris J. 1986. Mixing characteristics and gas hold-up of a bubble column. Can. J. Chem. Eng. 64: 23-35.

Hernández G.I.C. 2006. Medición de la fracción de gas retenido en un bioreactor de columna de burbujas. Tesis Profesional para obtener el Título de Ingeniero Biotecnólogo

Hills J.H. 1974. Radial non-uniformity of velocity and voidage in a bubble column. Trans. I. Chem. Eng. 52: 1-9.

Joshi J.B. 2001. Computational for modelling and design of bubble column reactors. Chem. Eng. Sci. 56: 5893-5933.

Keitel G., Onken U. 1982. Inhibition of bubble coalescence by solutes in air/water dispersions. Chem. Eng. Sci. 37: 1635-1638.

Kulkarni A.A., Joshi J.B. 2004. Simultaneous measurement of flow pattern and mass transfer coefficient in bubble columns. Chem. Eng. Sci. 59: 271-281.

Matsumara M., Sakuma H., Yamagata T., Kobayashi J. 1982. Performance of oxygen transfer in a new gas entraining fermentor. J. Ferment. Technol. 60: 551-563.

Nottenkamper R., Stieff A., Weinspach P.M. 1983. Experimental investigation of hydrodynamics of bubble columns. Ger. Chem. Eng. 6: 147-155.

Onken J., Sobolik V. 1991. Electrodiffusional direction-specific probe for measuring local velocity of aerated aqueous systems. J. Appl. Electrochem. 21: 1073-1076.

Pannek S., Pauli J., Onken U. 1994. Determination of local hydrodynamic parameters in bubble columns by the electrodiffusion method with oxygen as polarizer. J. Appl. Electrochem. 24: 666-669.

Robinson C.W., Wilke C.R. 1973. Oxygen absorption in stirred tanks: A correlation for ionic strength effects. *Biotechnol. Bioeng.* 15: 755-782.

Shah Y.T., Godbole S.P., Deckwer W.D. 1982. Design parameters estimations for bubble column reactors. *AIChE J.* 28: 452-460.

Theofanous T.G., Sullivan J. 1982. Turbulence in two-phase dispersed flows. *Journal of fluid mechanics.* 116: 346-362.

van't Riet K., Tramper J. 1991. *Basic bioreactor design.* Marcel Dekker Inc.

Vital Martínez V.H. 2006. Medición del diámetro de burbuja en un bioreactor de columna de burbujas. Tesis Profesional para obtener el Título de Ingeniero Biotecnólogo.

Weiland P., Onken U. 1981. Differences in the behavior of bubble columns and airlift loop reactors. *Ger. Chem. Eng.* 174-181.

Wu Y., Al-Dahhan M. 2001. Prediction of axial liquid velocity profile in bubble columns. *Chem. Eng. Sci.* 56: 1127-1130.