

---

**“ DISEÑO, CONTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN  
DE UN ELECTRODIALIZADOR PARA  
TRATAMIENTO DE AGUA ”**

PRESENTADO POR:

**I. Q. AARÓN RODRÍGUEZ LÓPEZ**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRÍA EN ELECTROQUÍMICA.**

Abril 2002.

*Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
en Electroquímica*

REALIZADO POR:

**I. Q. AARÓN RODRÍGUEZ LÓPEZ**

DIRIGIDO POR

**Dr. FEDERICO CASTAÑEDA ZALDIVAR**

**SINODALES**

**Dr. Yunny Meas Vong.**  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

**Dr. Federico Castañeda Zaldivar.**  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

**M. C. Luis Garza Aguilera.**  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

## **ABSTRACT**

The effects of gap, flow and inlet angle are studied to evidence their influence on the hydrodynamic behavior of an electrodyalizer for water treatment designed at CIDETEQ.

The characterization has been made at first by visual tests with colorants, in order to select the most suitable inlet angle.

After that, the flow model was studied, based on the axial dispersion model of Levenspiel, which entails a plug flow in the reactor. In that point, we found that flow is close to plug flow, being more notable at high flows.

Finally, we studied the mass transfer, founding that it is higher than in absence of turbulence promoter. In addition, we found that the inlet angle affects the behavior of the fluids. The higher the inlet angle, the higher the mass transfer coefficient values.

Quiero agradecer a los **doctores** Yunny Meas, Raúl Ortega, Adrián Gil, Gabriel Trejo, Germán Orozco, Luis Godinez, Leonardo Bernal y especialmente a Federico Castañeda, ya que todos ellos, de una u otra manera, hicieron posible la realización de este trabajo.

A los **compañeros** de todos los días, los que entre nosotros nos entendemos, quejamos y ayudamos mutuamente, entre ellos, sin que sea en orden de importancia, el Chacón, el mondao, tamañín, Ángel, cucharita, y el máistro Cruz.

A los **amigos** que durante este tiempo compartieron mis preocupaciones y me alentaron a seguir adelante, a continuación mencionaré sólo a algunos: *Beto e Idalid*, quienes me brindan no sólo su amistad, si no también su hermandad, pues así nos hemos tratado todo este tiempo, compartiendo desventuras y buenos momentos tanto en el trabajo como en casa. *Lupita y Vidrios*, quienes siempre han estado allí para apoyarme y darme consejo, sobre todo el Vidrios, con quien mantuve tantas platicas en el cubil, tanto científicas, tecnológicas, futbolísticas, etcétera. *Joscan y Ulises*, quienes siempre han estado ahí para escucharme y platicar, sin importar el día ni la hora y con quienes también he compartido muchos momentos de mi vida. Al *Chaquiras y Yorch*, que siempre tienen un comentario oportuno que hacer, de forma tal que te hacen pasar un buen rato. A los del *Tec* que tengo un buen sin ver, pero no por ello han dejado de estar conmigo, el Octavio, el tragon, el quillo, el negro, la Lorena, Miriam y Celina. A algunos otros de *toda la vida* también: El Cacho, el huevo Lennon, el chimbombo, la Normita, Lety, El Juan, el chocorol, el lupito, el poison, el Flavio, el Zahid, el memo, el Russel, y el pechugas. A todos ustedes, de verdad, muchas, muchas gracias.

Hay 5 personas que compartieron una casa, amor y unas reglas durante muchos años, haciendo de ella un hogar, afortunadamente tuve la suerte de estar dentro y ser parte de esa familia, de mi **familia**: mi *madre*, María de los Angeles López Chávez, quien siempre me ha dado su amor sin esperar nada a cambio, invariablemente siempre ha estado apoyándome, con el cariño que sólo una madre puede brindar; mi *padre*, Alberto Rodríguez Soto, quien durante muchos años me amó, me educó y me

ayudó a forjarme un carácter, y aunque físicamente ya no está más conmigo, él siempre me acompaña y me cuida; mis dos hermanos, *Eric* (su esposa Ana y su hija Naysin) y *Milton* (y su esposa Gabriela y su hija Yajaira y el que viene), con quienes crecí, quienes siempre me cuidaron y me aconsejaron, además de ser siempre honestos conmigo y brindarme su cariño, apoyo y amor incondicional. A esta hermosa familia, gracias por aceptarme como soy, gracias por brindarme su amor, y en ningún momento duden que yo los amo, que haría cualquier cosa por ustedes y que siempre estamos y estaremos juntos. A mi abuela Virgen, Doña Virgen, por todo el cariño que me ha dado. Quiero agradecer también a mis tíos: Miguel, Mago, Chuy López, Elvira, Chuy Castañeda, Teresa, Ramón, Chabela, Pilar, Rafael, Magui, Conrado, Chayo, Cruz; a todos ustedes yo les debo más de lo que se imaginan, y espero algún día poder ayudarles. No quiero dejar fuera a mis primos: Co-lote Aiko y papi, Lupe Hilda Locsley Lupita y Marari, chino, Nay, güera Omar, china, Ule, Lenin Edith Valeria y Priscila, Paúl y Leo, Maricela, Sydney, Osiris, Gabriel, Conrado, Nevin, Marvin, Yenny, y los que faltan, cada uno de ustedes me enseñó más de una cosa nueva, muchas gracias.

Hay una persona muy especial en mi existencia, alguien a quien yo amo más que a mi propia vida, alguien quien desde el momento en que la conocí cambió mi vida, haciéndola mejor, con más alegrías y con un motivo extra para siempre ser mejor. Esta persona no se cansa nunca de darme su amor, de apoyarme, de aguantarme; todo esto quizá no lo merezca, pero quiero decirle una vez más, que la amo y que le agradezco todo esto que ha hecho por mí, sin importarle nada, dejando atrás en algunos momentos su familia, sus amistades. Estoy hablando por supuesto de mi **esposa**: Alejandra. También quiero agradecer a mis hijos, que aunque todavía no están aquí, sé que pronto los tendremos, y esto también es por ellos.

Quiero agradecer a **dios**, porque es gracias a él que los sueños se hacen realidad, gracias a él existe la amistad, el amor, y es gracias a él que yo tengo todo esto, tantos amigos y tanto amor. Gracias.



*Este trabajo fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ) con el proyecto 256, bajo la supervisión del Dr. Federico Castañeda Zaldivar. Gracias al CONACYT por el apoyo económico recibido durante la realización de este estudio.*



# ÍNDICE

1.- Introducción .....	1
2.- Objetivos .....	3
2.1.- Objetivo general .....	3
2.2.- Objetivos específicos .....	3
3.- Revisión bibliográfica .....	4
3.1.- Tratamiento de agua .....	4
3.2.- Electrodiálisis .....	6
3.2.1.- Concepto .....	6
3.2.2.- Generalidades .....	6
3.2.3.- Electrodiálisis reversible (EDR) .....	8
3.2.4.- Celdas de electrodiálisis .....	8
3.2.5.- Componentes .....	10
3.2.5.1.- Electroodos .....	10
3.2.5.2.- Membranas .....	10
3.2.5.2.1.- Membranas selectivas .....	11
3.2.5.2.2.- Membranas bipolares .....	14
3.2.5.3.- Espaciadores .....	15
3.2.6.- Aplicación de electrodiálizadores .....	17
3.2.6.1.- Generalidades .....	17
3.2.6.2.- Recuperación de ácidos y bases .....	17
3.2.6.3.- Remoción de sales .....	20
3.2.6.4.- Recuperación de metales .....	25
3.3.- Caracterización de reactores .....	30
3.3.1.- Generalidades .....	30
3.3.2.- Caracterización hidrodinámica .....	30
3.3.2.1.- Colorantes .....	31
3.3.2.2.- Modelos matemáticos .....	32
3.3.2.2.1.- Modelo de Levenspiel .....	33
3.3.3.- Transferencia de masa .....	35

4.- Desarrollo experimental .....	42
4.1.- Diseño y construcción .....	42
4.1.1.- Generalidades .....	42
4.1.2.- Ángulos usados .....	44
4.2.- Caracterización del reactor .....	45
4.2.1.- Hidrodinámica .....	45
4.2.1.1.- Pruebas colorimétricas .....	45
4.2.1.1.1.- Influencia del ángulo de entrada sobre la distribución del fluido ....	47
4.2.1.1.2.- Influencia del gap y el caudal sobre la distribución del fluido .....	47
4.2.1.2.- Modelamiento de flujo .....	48
4.2.1.2.1.- Influencia del gap y el caudal sobre el modelamiento del flujo .....	49
4.2.1.2.2.- Influencia del ángulo de entrada sobre el modelamiento del flujo .	49
4.2.2.- Caracterización de la transferencia de masa .....	49
4.2.2.1.- Influencia del gap y el caudal sobre la transferencia de masa .....	51
4.2.2.2.- Influencia del ángulo de entrada sobre la transferencia de masa .....	51
5.- Resultados y discusión de resultados .....	52
5.1.- Resultados: pruebas colorimétricas .....	52
5.1.1.- Influencia del ángulo de entrada sobre la distribución del fluido .....	52
5.1.2.- Influencia del gap y el caudal sobre la distribución del fluido .....	53
5.1.2.1.- Gap de 2 mm .....	54
5.1.2.2.- Gap de 4 mm .....	56
5.1.2.3.- Gap de 7 mm .....	57
5.2.- Resultados: modelamiento de flujo .....	59
5.2.1.- Influencia del gap y el caudal sobre el modelamiento del flujo .....	61
5.2.1.1.- Gap de 2 mm, entrada 1 .....	61
5.2.1.2.- Tiempo de residencia promedio .....	64
5.2.1.3.- Número de Péclet .....	66
5.2.1.4.- Coeficiente de dispersión axial .....	68
5.2.1.5.- Influencia de la velocidad lineal y gap sobre el número de Péclet .....	70
5.2.2.- Influencia del ángulo de entrada sobre el modelamiento del flujo .....	73



5.2.2.1.- Gap de 2 mm, entrada 2 .....	73
5.2.2.2.- Gap de 4 mm, entrada 2 .....	76
5.2.2.3.- Gap de 7 mm, entrada 2 .....	79
5.2.2.4.- Tiempo de residencia promedio, número de Péclet y coeficiente de dispersión axial en función del ángulo de entrada .....	82
5.3.- Resultados: transferencia de masa .....	85
5.3.1.- Influencia del gap y del caudal sobre la transferencia de masa .....	85
5.3.1.1.- Determinación de corriente límite .....	85
5.3.1.2.- Coeficiente de transferencia de masa .....	91
5.3.1.2.1.- Influencia del gap sobre el coeficiente de transferencia de masa ..	93
5.3.1.3.- Factor de aumento de transferencia de masa .....	95
5.3.1.4.- Ecuación que describe el comportamiento de la transferencia de masa .....	97
5.3.2.- Influencia del ángulo de entrada sobre la transferencia de masa .....	100
5.3.2.1.- Determinación de corriente límite .....	100
5.3.2.2.- Coeficiente de transferencia de masa .....	103
5.3.2.2.1.- Influencia del gap sobre el coeficiente de transferencia de masa ..	105
5.3.2.3.- Factor de aumento de transferencia de masa .....	106
5.3.2.4.- Ecuación que describe el comportamiento de la transferencia de masa .....	108
5.4.- Resultados: discusión .....	111
5.4.1.- Pruebas colorimétricas .....	111
5.4.2.- Modelamiento de flujo .....	111
5.4.3.- Transferencia de masa .....	112
6.- Conclusiones .....	114
7.- Recomendaciones .....	114
Referencias bibliográficas .....	115
Anexo A .....	i
Anexo B .....	xxxiv
Anexo C .....	xlii
Anexo D .....	xliv

## RESUMEN

Se analizan los efectos del gap, flujo y ángulo de entrada sobre el comportamiento hidrodinámico de un electrodiálizador para tratamiento de aguas diseñado en CIDETEQ.

La caracterización consiste en realizar, en primera instancia, pruebas con colorantes, seleccionando de esta manera un solo ángulo de entrada.

Posteriormente se modela el flujo, basados en el modelo de dispersión axial de Levenspiel, el cual predice un flujo tipo pistón en el interior del reactor. En este punto se encuentra que se está muy cerca del flujo pistón, sobre todo a flujos altos.

Finalmente se estudia la transferencia de masa, encontrándose que ésta es mayor cuando se tiene un promotor de turbulencia presente. Además, se evidencia que el ángulo de entrada afecta el comportamiento de los fluidos en el interior del reactor, y que mientras más grande es el ángulo de entrada, más altos son los valores del coeficiente de transferencia de masa.

## **RESUMEN**

---

---

Se analizan los efectos del gap, flujo y ángulo de entrada sobre el comportamiento hidrodinámico de un electrodiálizador para tratamiento de aguas diseñado en CIDETEQ.

La caracterización consiste en realizar, en primera instancia, pruebas con colorantes, seleccionando de esta manera un solo ángulo de entrada.

Posteriormente se modela el flujo, basados en el modelo de dispersión axial de Levenspiel, el cual predice un flujo tipo pistón en el interior del reactor. En este punto se encuentra que se está muy cerca del flujo pistón, sobre todo a flujos altos.

Finalmente se estudia la transferencia de masa, encontrándose que ésta es mayor cuando se tiene un promotor de turbulencia presente. Además, se evidencia que el ángulo de entrada afecta el comportamiento de los fluidos en el interior del reactor, y que mientras más grande es el ángulo de entrada, más altos son los valores del coeficiente de transferencia de masa.

## **ABSTRACT**

---

---

The effects of gap, flow and inlet angle are studied to evidence their influence on the hydrodynamic behavior of an electrolyzer for water treatment designed at CIDETEQ.

The characterization has been made at first by visual tests with colorants, in order to select the most suitable inlet angle.

After that, the flow model was studied, based on the axial dispersion model of Levenspiel, which entails a plug flow in the reactor. In that point, we found that flow is close to plug flow, being more notable at high flows.

Finally, we studied the mass transfer, founding that it is higher than in absence of turbulence promoter. In addition, we found that the inlet angle affects the behavior of the fluids. The higher the inlet angle, the higher the mass transfer coefficient values.

## 1.- INTRODUCCIÓN.

El agua es indispensable para que la vida exista [27, 28, 33, 43, 46, 50, 82], de hecho, allí se inicia, y aunque  $\frac{3}{4}$  partes del planeta son agua, es poca la que puede usarse directamente, ya que la mayoría se encuentra en los océanos, congelada en los polos o en el subsuelo. Además, en su distribución existe una desproporción muy grande, en México por ejemplo, existen lugares con abundantes cantidades (Sureste), mientras otros sufren su escasez (Centro y Norte).

Aunque siempre se han generado aguas residuales, es a raíz de los desarrollos urbano e industrial que la necesidad de tratarlos y no solo vertirlos al medio ambiente se ha hecho más notable, debido a que se sobrepasa la capacidad de asimilación y destrucción de los receptores (ríos, lagos, mar).

El hombre le da diversos usos al agua. En la ganadería, en los municipios, en la industria, etc., generándose agua susceptible de ser tratada (agua sanitaria, de proceso); al hacerlo, no solo se ayuda el equilibrio ecológico, si no que además se asegura la calidad del agua para poder darle otro uso. Obviamente este uso será determinado de acuerdo a las características del lugar en donde son tratadas; por ejemplo, en un municipio como agua de riego o potable, en una industria como agua de enfriamiento, etc., de esta manera las aguas residuales en la actualidad tienen un gran potencial de ser recicladas.

Existen diversas formas para tratar el agua, lógicamente no todos los tipos de efluentes se pueden tratar con una sola tecnología. Para seleccionar el proceso a utilizar se deben considerar varios factores: características iniciales y finales, caudales, eficiencia, costos, residuos, disponibilidad de espacio, energía, personal, etc.

Unos de los procesos relativamente nuevos para tratamiento de agua [4, 5, 9, 18, 32, 37, 45, 48, 70, 74] son los electroquímicos, dentro de los cuales está la *electrodialisis* (ED), tema central de este trabajo. Con este proceso es posible tratar efluentes acuosos que contengan sustancias susceptibles de ser separadas

en su forma iónica al ser sometidos a una diferencia de potencial existente entre dos electrodos.

La *electrodiálisis* tiene muchas aplicaciones, las más importantes son:

- Desalación / concentración de agua marina.
- Desmineralización de suero, azúcar, vino.
- Recuperación de ácidos y bases.
- Recuperación de metales.

Pese a la gran importancia de este proceso, y a sus variadas aplicaciones, no existe en México proveedor nacional de esta tecnología, de ahí el esfuerzo de *CIDETEQ*, como parte de su misión, para desarrollar este proceso.

En este trabajo hablaremos, en la revisión bibliográfica, de las diversas tecnologías para tratar el agua, de los factores que deben considerarse para realizar el diseño y escalamiento de un electrodiálizador, es decir, las bases para el desarrollo de esta tecnología. Se abordará como aportación de este trabajo el tema de la caracterización de electrodiálizadores, esto es, una vez construido el reactor, conocer su comportamiento en cuanto a su comportamiento hidrodinámico y eficiencia de transferencia de masa se refiere.

## **2.- OBJETIVOS**

Los objetivos planteados para este trabajo son:

### **2.1.- OBJETIVO GENERAL.**

- ❖ Diseñar, construir y caracterizar un electrodiálizador para tratamiento de efluentes industriales.

### **2.2.- OBJETIVOS ESPECIFICOS.**

- ⊕ Diseño de un electrodiálizador.
- ⊕ Construcción de un electrodiálizador.
- ⊕ Caracterización del electrodiálizador.
  - Hidrodinámica.
  - Transferencia de masa.

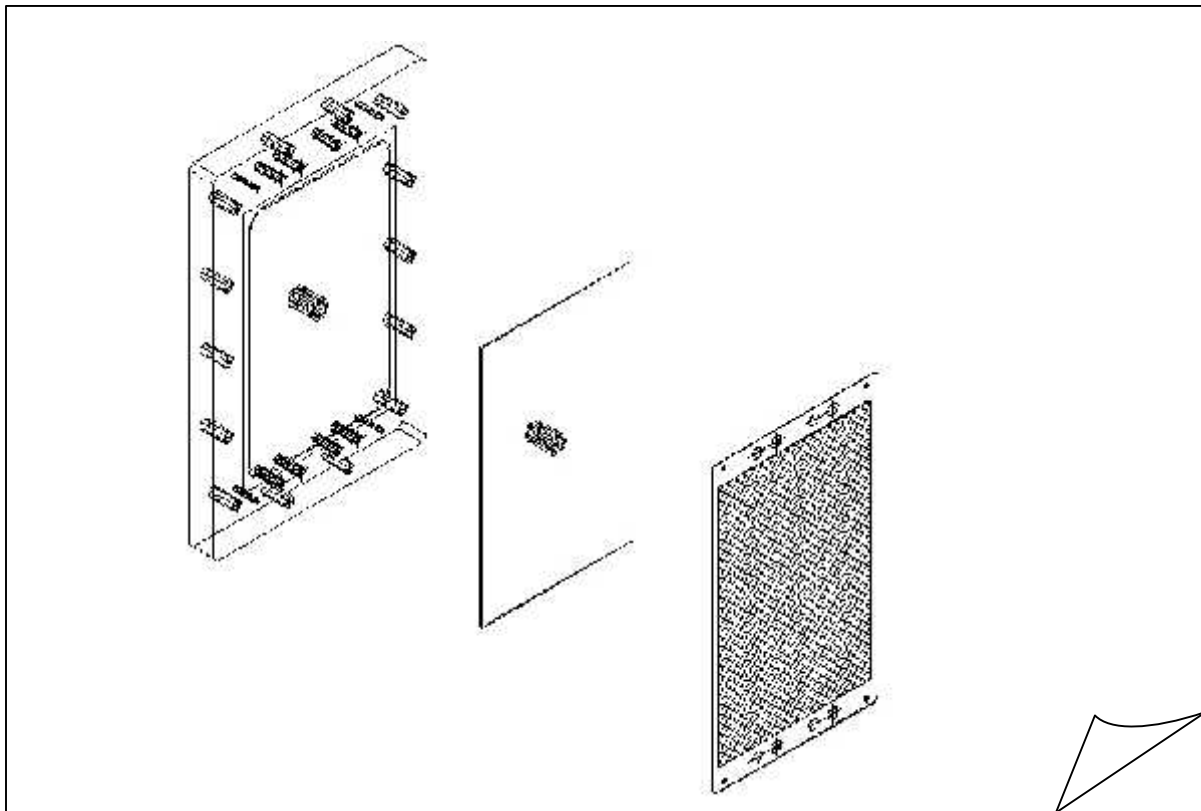
## 4.- DESARROLLO EXPERIMENTAL.

El desarrollo experimental es dividido en dos secciones; la primera referida al diseño y construcción, ya que están íntimamente relacionados; en la segunda parte se aborda lo concerniente a la caracterización del reactor, la cual, como ya se mencionó consta a su vez de dos componentes: hidrodinámica y transferencia de masa.

### 4.1.- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.

#### 4.1.1.- GENERALIDADES.

El diseño general de la celda es parte de otra tesis, lo que a este trabajo concierne es el diseño y construcción de los separadores/promotores de turbulencia, los cuales son una parte fundamental para lograr el buen funcionamiento del reactor. Un esquema general de las partes de la celda se aprecia en la figura 15.

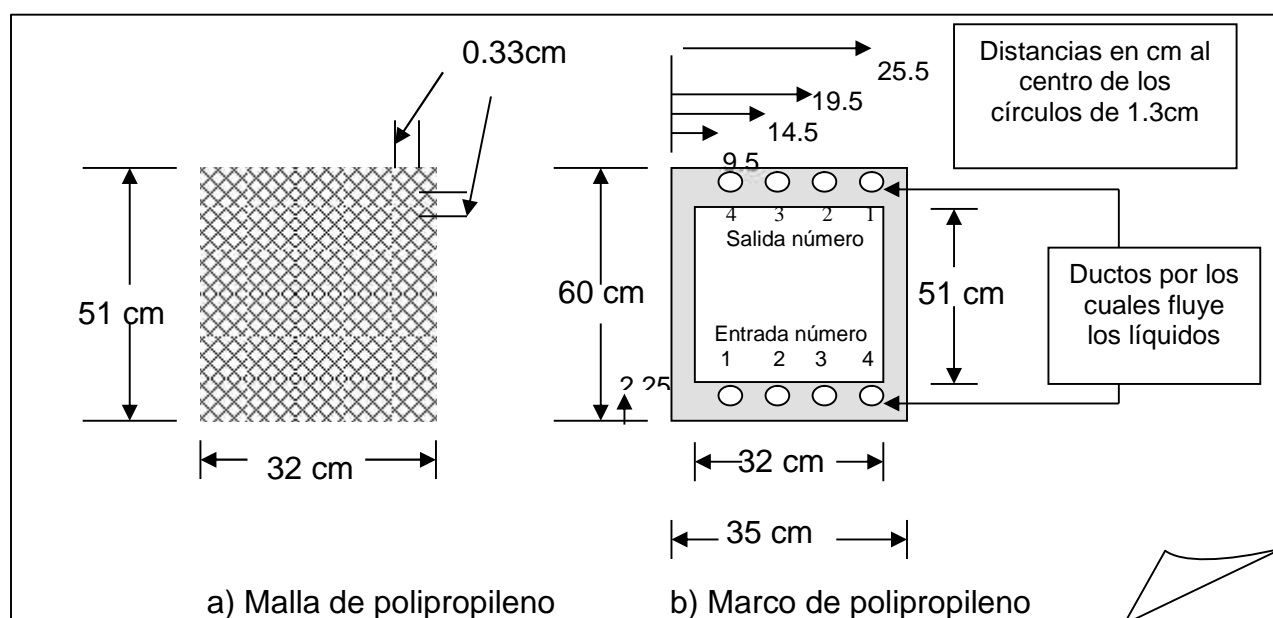


**Figura 15.-** Esquema general de las partes del reactor.

Este arreglo también es colocado al final del reactor; es decir, este bosquejo es colocado tanto al inicio como al final del electrodiálizador, entre estas se colocan las membranas, y *aunque en este trabajo no son utilizadas membranas*, el comportamiento del fluido en el canal formado con los separadores se asume que es igual al que se presenta en el canal formado por membranas.

En la figura 15 se aprecian tres partes muy importantes en el reactor; de izquierda a derecha tenemos en primera instancia la *placa de apriete*, la cual tiene entre sus funciones distribuir uniformemente la presión que se aplica al momento de cerrar el reactor. En la parte central de la figura se encuentra el *electrodo*, éste distribuye la corriente aplicada, en este caso la corriente es suministrada a partir del vástago que cruza la placa de apriete, es decir, el reactor diseñado en CIDETEQ tiene un solo punto de alimentación de corriente y se asume que existe una buena distribución de esta. Finalmente, en la derecha apreciamos el *separador / promotor de turbulencia*, el cual es sujeto a diseño en este trabajo.

Los separadores deben distribuir uniformemente el fluido por toda la superficie del reactor, y el promotor de turbulencia debe aumentar la transferencia de masa; *el promotor en este estudio es una malla de polipropileno*, cuyas dimensiones son mostradas en la figura 16a.

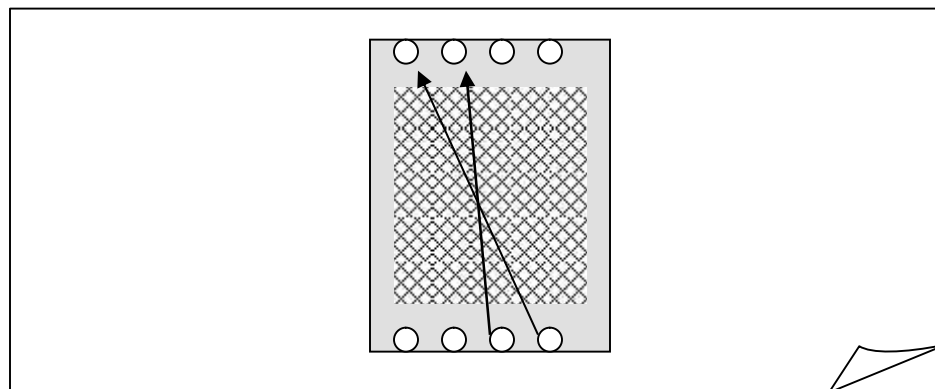


**Figura 16.-** Dimensiones de la malla (2000R) y del marco de propileno.



La malla (promotor de turbulencia) usada en las pruebas es colocada en el interior del recuadro del marco (separador) de polipropileno; se utiliza esta malla porque ya ha sido empleada en pruebas anteriores con otras celdas arrojando excelentes resultados.

Por lo tanto, el arreglo separador / promotor de turbulencia es formado como se muestra en la figura 17, y colocado tantas veces como sea necesario para lograr el gap deseado.

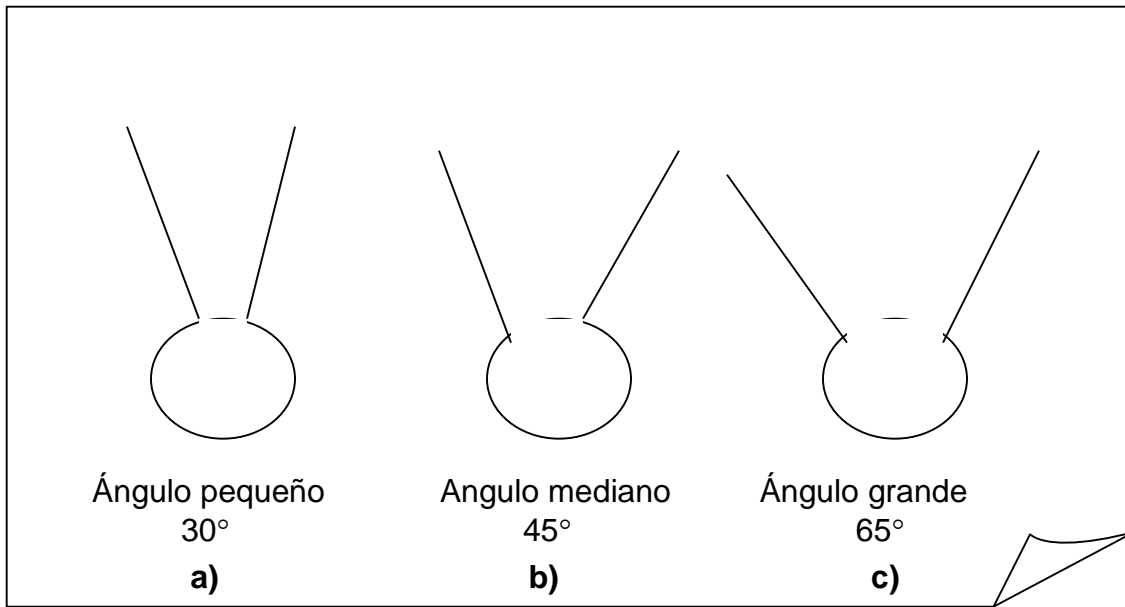


**Figura 17.-** Arreglo separador / promotor de turbulencia.

En la figura 17 se muestra el arreglo separador / promotor de turbulencia, y también se observa que existe una distancia entre los ductos por los que fluye el líquido y el área de reacción, es decir, la forma en que el fluido entra al área de reacción, para ello es necesario hacer una abertura para que entre y salga el fluido; cabe mencionar que el fluido entra y sale de forma cruzada tal como se muestra en la figura 17, es decir, si el fluido se alimenta por la entrada 1, es retirado por la salida 1, y así para todas las entradas (véase figura 16b).

#### 4.1.2.- ANGULOS USADOS.

Como ya se mencionó, los promotores de turbulencia usados son de un solo tipo (figura 16a), mientras que el separador es probado inicialmente con 3 ángulos de entrada, denominados ángulos grande, mediano y pequeño. Estos ángulos son mostrados en la figura 18.



**Figura 18.-** Ángulos de prueba ensayados inicialmente.

Con los ángulos mostrados en la figura 18 se hacen inicialmente pruebas colorimétricas, esto con la finalidad de seleccionar el que presente mejores resultados en cuanto a distribución se refiere. Este ángulo será usado durante todas las series de experimentos posteriores.

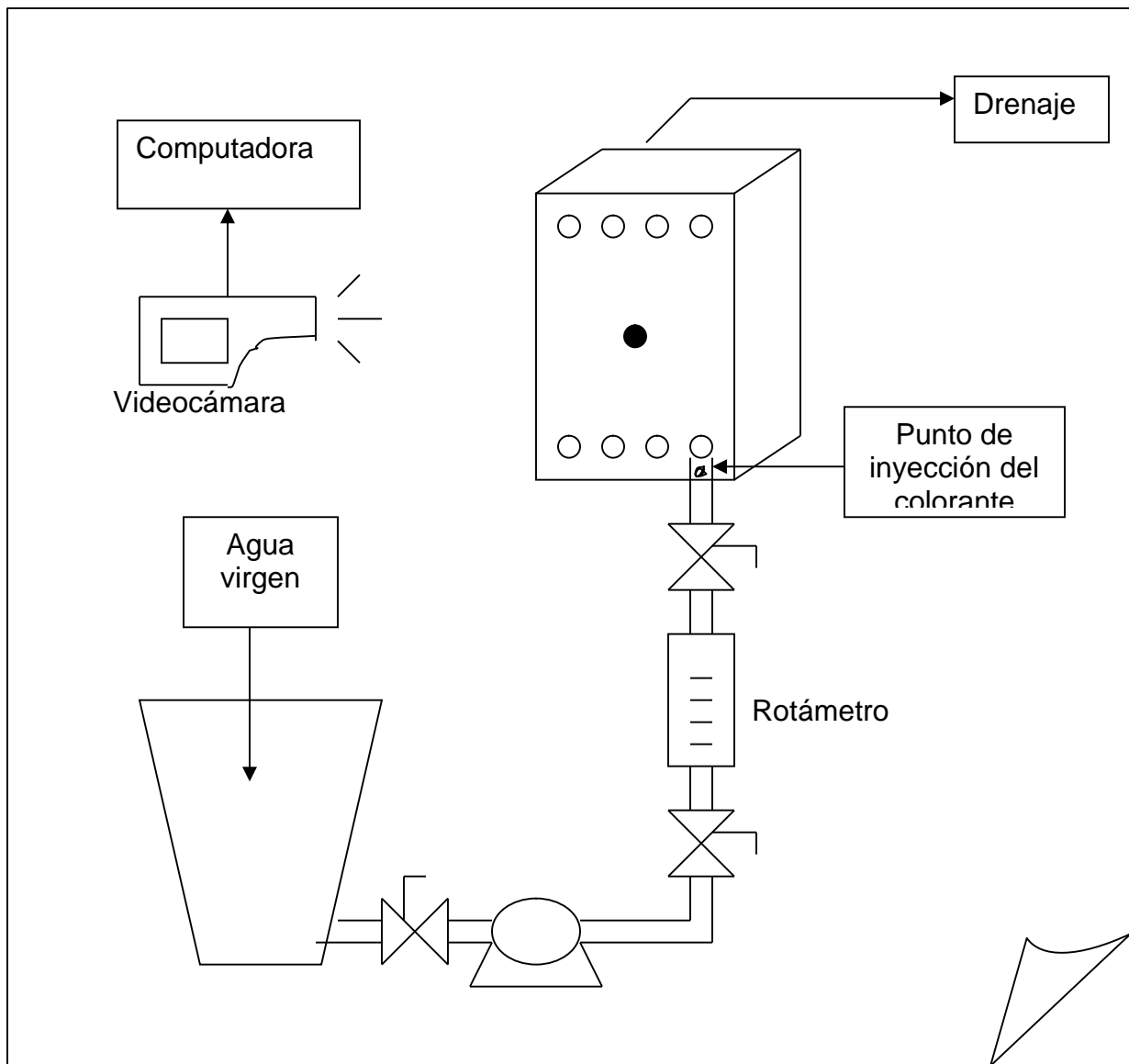
## **4.2.- CARACTERIZACIÓN DEL REACTOR.**

### **4.2.1.- HIDRODINÁMICA.**

#### **4.2.1.1.- PRUEBAS COLORIMÉTRICAS.**

Para realizar las pruebas colorimétricas se usa un colorante tipo textil en solución acuosa en una concentración de 6.5 gramos en cada litro (g/L), y es inyectado en forma de impulso unitario en cantidades de 10 mililitros (mL) $\pm$ .05 mL. Una de las placas de apriete es de acrílico para poder apreciar la distribución del colorante. Los experimentos son grabados con una videocámara, y después se obtiene, por medio de

un software, fotografías a los tiempos que se deseen. El sistema que se usa se muestra en la figura 19.



**Figura 19.-** Sistema utilizado en las pruebas colorimétricas.

Con este sistema se realizaron todas las pruebas colorimétricas, las cuales, como ya se mencionó son grabadas para después, con un paquete de computación especial, obtener las fotos deseadas a los tiempos que se consideren pertinentes.

#### 4.2.1.1.1.- INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE ENTRADA SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DEL FLUIDO.

En primera instancia, con este método se prueban (bajo condiciones de operación fijas) los tres ángulos mostrados en la figura 19. Las condiciones de operación que se mantienen constantes en esta etapa son mostradas en la tabla XIII.

**Tabla XIII.- CONDICIONES DE OPERACIÓN CONSTANTES EN LAS PRUEBAS DE SELECCIÓN DE ÁNGULO DE ENTRADA.**

<b>Gap (mm)</b>	<b>Número de ángulos de entrada</b>	<b>Número de entradas usadas</b>	<b>Flujo (lpm)</b>
2	3	1	0.5, 1, 2 y 4

lpm = litros por minuto.

A partir de estas pruebas se selecciona un ángulo de entrada para realizar toda la serie de experimentos posteriores, el cual denominaremos *ángulo principal*. El ángulo que se selecciona es porque presenta la mejor distribución del fluido.

#### 4.2.1.1.2.- INFLUENCIA DEL GAP Y EL CAUDAL SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DEL FLUIDO.

Durante las pruebas hechas con el ángulo de la figura 18.b, se hacen variar algunos parámetros para observar su efecto. Estos experimentos se resumen en la tabla XIV.

**Tabla XIV.- EXPERIMENTOS REALIZADOS CON EL COLORANTE.**

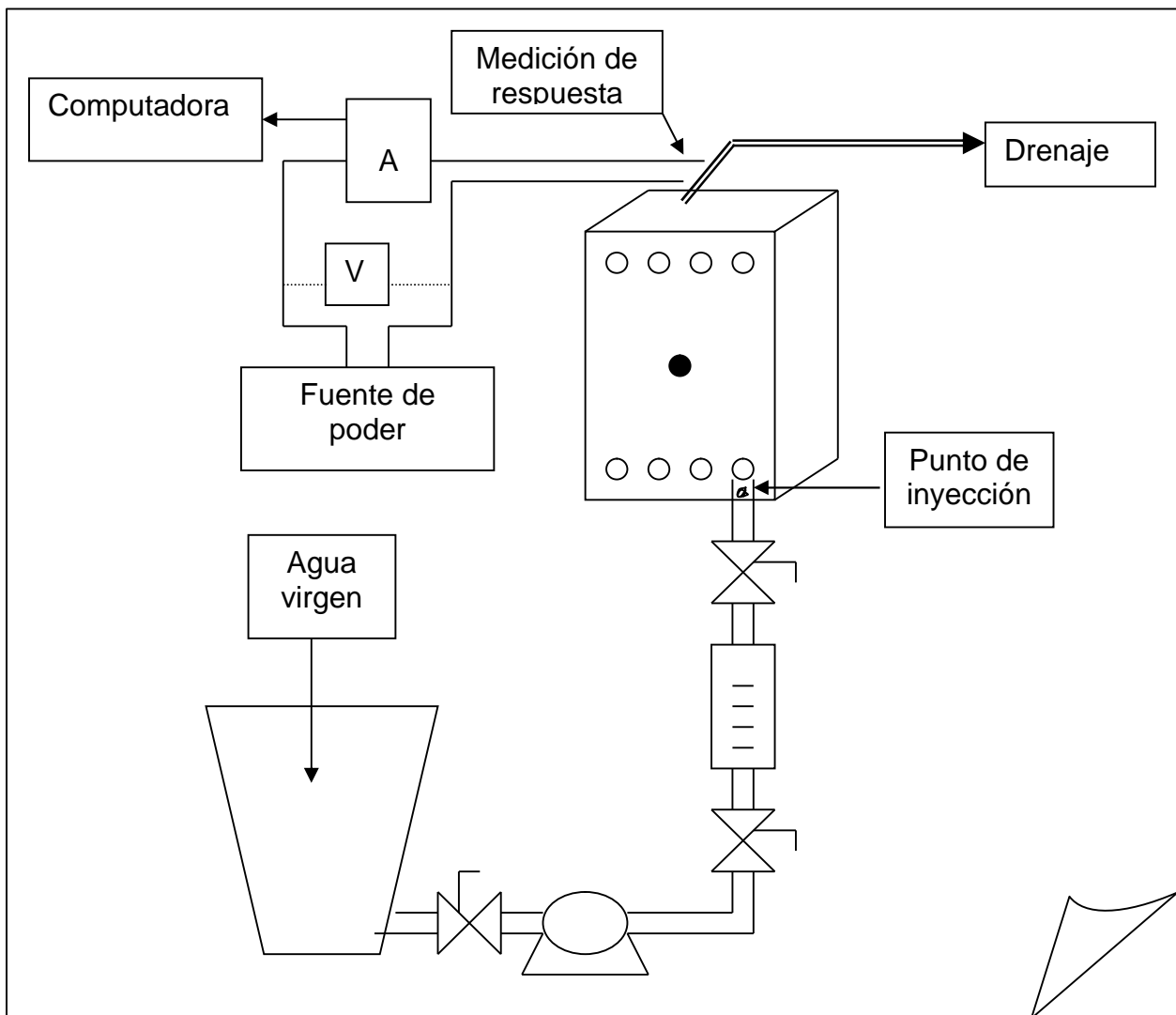
<b>Gap (mm)</b>	<b>Número de entradas Usadas</b>	<b>Flujo (lpm)</b>	<b>Velocidad lineal (cm/s)</b>
2	4	0.5, 1, 2 y 4	1.3, 2.6, 5.21 y 10.41
4	4	1, 2, 4 y 6	1.3, 2.6, 5.21 y 7.81
7	4	2, 4, 6 y 8	1.488, 2.976, 4.464 y 5.95

#### 4.2.1.2.- MODELAMIENTO DE FLUJO.

Estos experimentos son realizados con la finalidad de conocer el tipo de flujo que existe en el interior del electrodiализador, el cual se desea de tipo pistón, pues de esta manera se evitan problemas de hidrodinámica que pueden ocasionar problemas serios en algunos casos.

Para saber si existe en el interior del electrodiализador un flujo tipo pistón, se utiliza el modelo de dispersión axial de Levenspiel, el cual supone un flujo de ese tipo.

El esquema utilizado para realizar estas pruebas se muestra en la figura 20.



**Figura 20.-** Sistema utilizado en las pruebas de distribución de tiempo de residencia.

El estímulo en estas pruebas es un impulso tipo delta de Dirac, que consiste en inyectar diez mililitros (mL) de una disolución de sulfato de cobre 0.25 M, aplicado en el lugar denominado punto de inyección; la respuesta es la corriente medida entre dos electrodos de cobre colocados a la salida del reactor, los cuales mantienen constante una diferencia de potencial de un Volt. El amperímetro está conectado a una computadora en la cual se almacenan los datos.

#### 4.2.1.2.1.- INFLUENCIA DEL GAP Y EL CAUDAL SOBRE EL MODELAMIENTO DEL FLUJO.

Las condiciones de operación de los experimentos amperométricos realizados en este trabajo son las descritas en la tabla XIV, esto para mantener las mismas condiciones de flujo en el interior del reactor usadas en las pruebas colorimétricas.

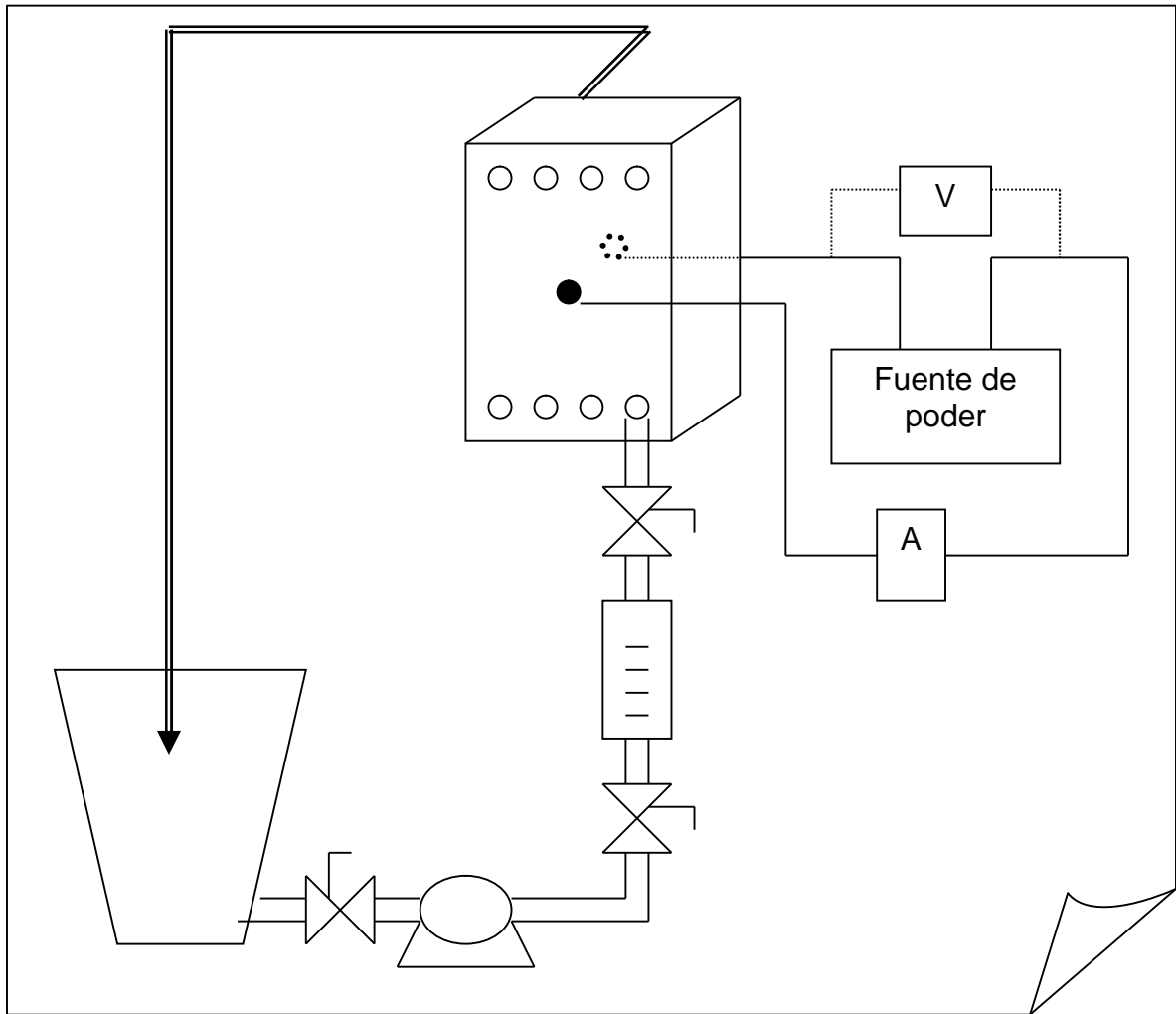
#### 4.2.1.2.2.- INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE ENTRADA SOBRE EL MODELAMIENTO DEL FLUIDO.

Estas pruebas se hacen comparando los resultados de la entrada 2 al usar los ángulos mediano y grande (véase figura 18).

#### 4.2.2.- CARACTERIZACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE MASA.

Estos experimentos son realizados con la finalidad de cuantificar el coeficiente de transferencia de masa existente en el interior del electrodiálizador, para realizarlo son utilizados comúnmente los números adimensionales, en este caso, de convección forzada, los números Reynolds, Sherwood y Schmidt.

El sistema químico utilizado para llevar a cabo estas pruebas (figura 21) es el del sulfato de cobre en medio ácido, manteniéndose en recirculación. Se hace un barrido de potencial y se lee la corriente entre los 2 electrodos del reactor.



**Figura 21.-** Esquema del sistema utilizado para la realización de las pruebas de transferencia de masa.

Cabe mencionar que las pruebas de transferencia de masa se hicieron con promotor de turbulencia y en canal vacío, esto para cuantificar el aumento en la transferencia de masa debido a la red utilizada. También vale la pena mencionar que la corriente medida es producto de toda la superficie de los electrodos, es decir, se mide el efecto global de los electrodos aunque existan zonas de desarrollo de régimen en donde la corriente puede ser diferente a la corriente medida que es un promedio.

#### 4.2.2.1.- INFLUENCIA DEL GAP Y EL CAUDAL SOBRE LA TRANSFERENCIA DE MASA.

Para estudiar el efecto del gap y del caudal sobre la transferencia de masa, se hacen variar estos parámetros y se observa la respuesta. Los ensayos realizados en estas etapa son resumidos en la tabla XV.

**Tabla XV.- EXPERIMENTOS REALIZADOS EN LAS PRUEBAS DE TRANSFERENCIA DE MASA.**

<b>Gap (mm)</b>	<b>Número de entradas usadas (PT y CV)</b>	<b>Flujo (lpm) (PT y CV)</b>
4	4	1, 2, 4 y 6
7	4	2, 4, 6 y 8

PT = Promotor de turbulencia.

CV = Canal vacío.

lpm = litros por minuto.

#### 4.2.2.2.- INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE ENTRADA SOBRE LA TRANSFERENCIA DE MASA.

Estas pruebas se realizan al comparar los resultados de la entrada 2 usando 2 ángulos de entrada: mediano y grande (véase figura 18).



## 5.4.- RESULTADOS : DISCUSIÓN.

### 5.4.1.- PRUEBAS COLORIMÉTRICAS.

En las pruebas colorimétricas se encuentra que los ángulos de entrada grandes dan como resultado una mejor distribución espacial del fluido en el interior del reactor, siendo los ángulos denominados mediano y grande con los que mejores resultados se obtienen, pues se minimizan las zonas muertas.

En estos experimentos se observa que la distribución espacial del fluido a diferente flujos es prácticamente la misma, sólo que el tiempo de llenado es más corto para flujos altos, y aparentemente se tiene flujo no pistón, pero esta idea se descarta con las pruebas de modelado de flujo, en donde se aprecia que si se está cerca del flujo pistón.

Se observa también una similitud en cuanto al comportamiento del colorante por parte de los pares de entradas 1-4 y 2-3, lo cual es esperado pues se usa el mismo separador/promotor de turbulencia en cada uno de esos pares de entradas.

En general, con estas pruebas se resalta la importancia del buen diseño del separador/promotor de turbulencia, pues al variar el ángulo de entrada se obtienen resultados diferentes en cuanto a la distribución espacial del fluido se refiere.

### 5.4.2.- MODELAMIENTO DE FLUJO.

Para hacer el modelamiento de flujo, se usa un modelo que asume la existencia de un flujo tipo pistón en el interior del reactor; este modelo, conocido como el modelo de dispersión axial de Levenspiel, tiene como variables el *tiempo de residencia promedio* y el *número de Péclet*. El número de Péclet envuelve a su vez otra variable : el *coeficiente de dispersión axial*.

El tiempo de residencia promedio presenta el mismo comportamiento para todos los gaps en las 4 entradas; es decir, en todos los casos el tiempo de residencia promedio disminuye conforme se aumenta el flujo, y lo hace primero exponencial y después asintóticamente. Obviamente, el tiempo de residencia promedio varía según el gap y el flujo.

En lo referente al número de Péclet, se observa que para todos los gaps y todas las entradas existe una tendencia de incrementar conforme se aumenta la velocidad lineal en el interior del reactor. También se encuentra que los valores más altos de Péclet se presentan a 4 mm de gap, es decir, aparentemente hay un máximo a 4 mm de gap.

Por su parte, el coeficiente de dispersión axial tiene un comportamiento inverso al del número de Péclet; es decir, los valores más bajos se encuentran a 4 mm de gap.

Cabe puntualizar que el coeficiente de dispersión axial expresa el grado de retromezcla en el interior del reactor, mientras que el número de Péclet expresa el grado de dispersión para el reactor (inversamente proporcionales), envolviendo características del reactor (longitud) e hidrodinámicas (velocidad).

En estas pruebas para el modelamiento del flujo, al comparar 2 ángulos de entrada se encuentra que el comportamiento tanto del tiempo de residencia como del número de Péclet y del coeficiente de dispersión axial es el mismo. En cuanto al tiempo de residencia promedio, los valores son muy parecidos excepto al flujo más bajo en donde se presentan irregularidades. Por otro lado, para el número de Péclet los valores son mayores para el ángulo grande, y los números del coeficiente de dispersión axial son mayores para el ángulo mediano, esto debido a que al hacer más grande el ángulo de entrada, el fluido se distribuye un poco más en el ancho del reactor y tiene menor posibilidad de retromezclarse.

#### 5.4.3.- TRANSFERENCIA DE MASA.

Estas pruebas se hacen con la finalidad de conocer la transferencia de masa en el interior del reactor. En este caso, se hicieron pruebas en ausencia y en presencia del promotor de turbulencia (PT) para evaluar su contribución a la transferencia de masa.

Al hacer el barrido de potencial, se encuentra que la corriente límite es siempre mayor cuando se emplea el PT que cuando está el canal vacío, esto porque el PT aumenta la turbulencia y disminuye la capa límite, facilitando así la llegada de materia a la superficie del electrodo. También se encuentra que la corriente límite se incrementa al aumentar el flujo, pero la meseta (a la cual se le conoce como corriente límite) va desapareciendo conforme se aumenta el flujo.

Como consecuencia de lo anterior, el coeficiente de transferencia de masa ( $K_m$ ) es mayor cuando está presente el PT que cuando está el canal vacío. También el  $K_m$  es mayor conforme se aumenta el flujo.

Por su parte, el factor de aumento de transferencia de masa disminuye al aumentar el flujo; es decir, aunque existe un incremento del  $K_m$  debido al PT para todos los flujos, la razón  $K_m(PT) / K_m(CV)$  va disminuyendo pues los valores a canal vacío aumentan más que cuando hay PT, esto es debido a las características propias del promotor de turbulencia.

Los números de Sherwood alcanzados para los números de Reynolds utilizados son muy buenos resultados, pues son comparables o incluso mejores que los reportados por algunos autores en bibliografía. Además, como otro dato, en las gráficas  $Re$  Vs  $Sh$ , no se aprecia un cambio de pendiente, lo cual indica que se está operando únicamente a un régimen : laminar. Esto coincide con los valores obtenidos por medio de ecuaciones en donde todos los valores de Reynolds son inferiores a 4000.

Al comparar los 2 ángulos de entrada, se encuentra que tienen el mismo comportamiento, con valores ligeramente superiores de corriente límite, coeficiente de transferencia de masa y número de Sherwood para el ángulo grande. Esto es debido a que hay una mayor cantidad de materia en el área del reactor.

## 6.- CONCLUSIONES.

Como un condensado de conclusiones, podemos mencionar que:

- Los resultados de las pruebas colorimétricas, modelamiento del flujo y transferencia de masa son congruentes en cuanto a que es mejor operar a flujos altos y con ángulo de entrada grande.
- El diseño del separador/promotor de turbulencia es muy importante, tanto el ángulo de entrada como el tipo de promotor de turbulencia. Si se aumenta el ángulo de entrada se tiene una mejor distribución espacial del fluido.
- A todos los gaps, en todas las entradas, se tienen comportamientos similares, lo cual es deseado para electrodiálizadores.
- Se está muy cerca del flujo tipo pistón al operar a flujos altos para cualquier gap y cualquier entrada, siendo la condición con mejores resultados a 4 mm de gap a 2, 4 o 6 litros por minuto.
- Es recomendable operar con promotores de turbulencia y velocidades altas, pues de esta manera se tienen las corrientes límite, coeficientes de transferencia de masa y números de Sherwood más altos.
- Hay una relación entre el número de Péclet y el coeficiente de transferencia de masa; ambos aumentan con el flujo para cualquier gap y para todas las entradas.

## 7.- RECOMENDACIONES.

Si bien el reactor tiene un desempeño favorable, es necesario continuar con su caracterización. De acuerdo a los resultados y a bibliografía, es recomendable:

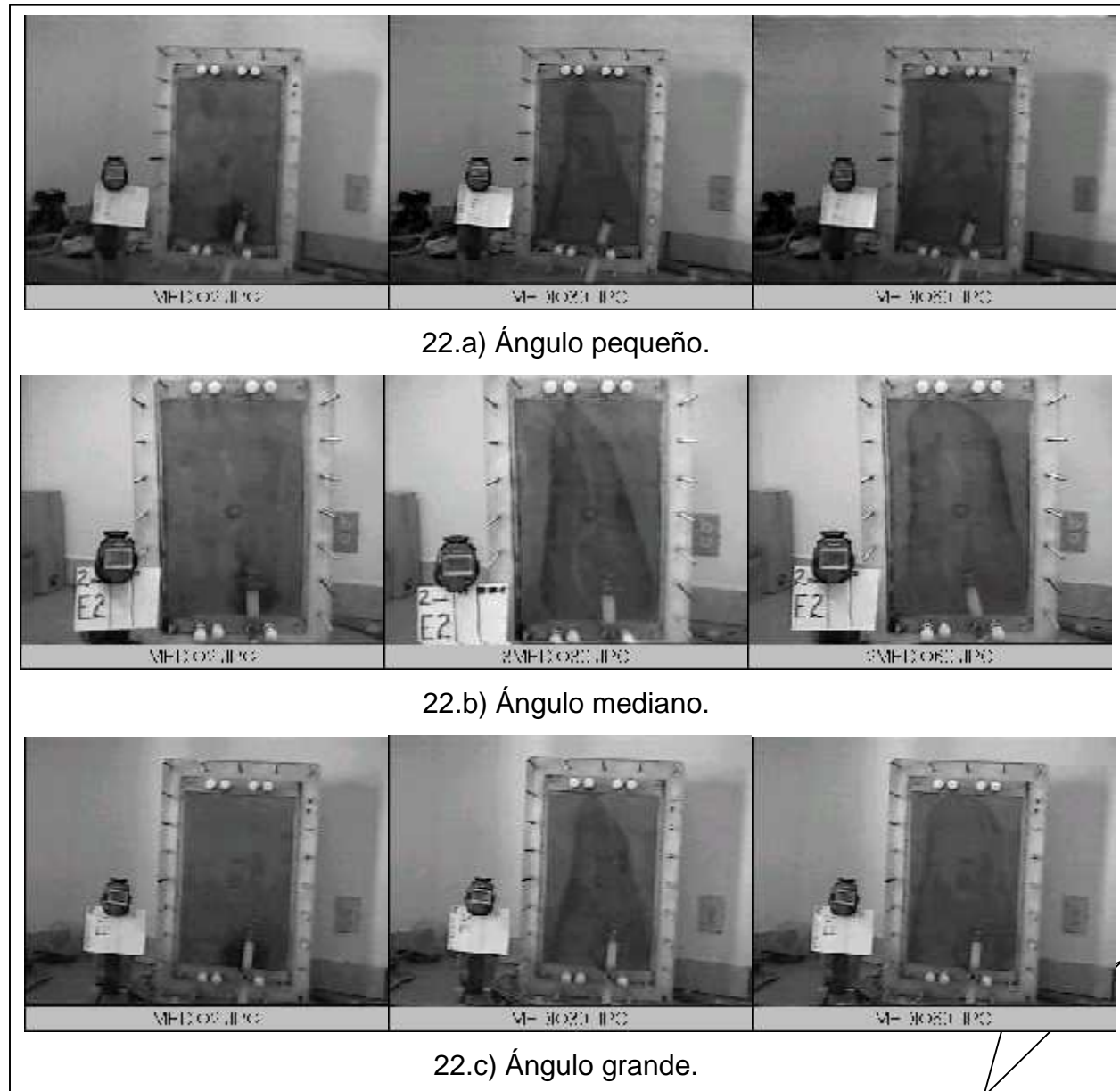
- Separar las entradas equidistantemente, facilitando el empleo de ángulos más grandes.
- Quitar las esquinas del reactor dándole una forma octagonal.
- Probar más gaps y más flujos.
- Probar otros tipos de promotores de turbulencia.
- Monitorear caídas de presión.

## 5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

### 5.1.- RESULTADOS : PRUEBAS COLORIMÉTRICAS.

#### 5.1.1.- INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE ENTRADA SOBRE LA DIST. DEL FLUIDO.

Como ya se mencionó, inicialmente se probaron 3 ángulos de entrada, los resultados de estas pruebas son mostrados en la figura 22.



**Figura 22.-** Distribución del fluido dentro del reactor a un flujo de medio litro por minuto, en la entrada 2, a tiempos de 2, 30 y 60 segundos.

Las fotografías mostradas en la figura 22 corresponden al caudal de medio litro por minuto; las pruebas hechas a caudales más elevados tienen el mismo comportamiento en cuanto a distribución espacial del fluido se refiere, solo que el proceso es más rápido. Cabe mencionar que cada prueba es triplicada con el propósito de verificar su repetibilidad, en todos los casos se observó el mismo comportamiento.

En la figura 22.a se aprecia que al usar el ángulo pequeño se presenta una zona de baja velocidad (zona en la cual el líquido se transporta lentamente en comparación con el resto) debido a que las moléculas del colorante son forzadas (por el ángulo tan pequeño) a seguir un camino central. En consecuencia, los extremos del reactor no son alimentados de manera eficiente, pues la velocidad del fluido ahí es mucho menor que la existente en la parte central del reactor.

Las figuras 22.b y 22.c muestran que la distribución del fluido en el interior del reactor es casi igual al usar los ángulos de entrada mediano y grande. La distribución del líquido en estos dos casos es más uniforme por toda el área de reacción.

Basados en estos resultados, *se opta por usar como ángulo de prueba el mostrado en 22.b*, al cual denominaremos como ángulo principal.

#### 5.1.2.- INFLUENCIA DEL GAP Y EL CAUDAL SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DEL FLUIDO.

Una vez seleccionado el ángulo de entrada, se realizan las pruebas planteadas en la tabla XVI, observando el efecto de flujo. También se muestra la velocidad lineal promedio para cada caso.

**Tabla XVI.- CAUDAL Y VELOCIDAD LINEAL  
EN FUNCIÓN DEL GAP.**

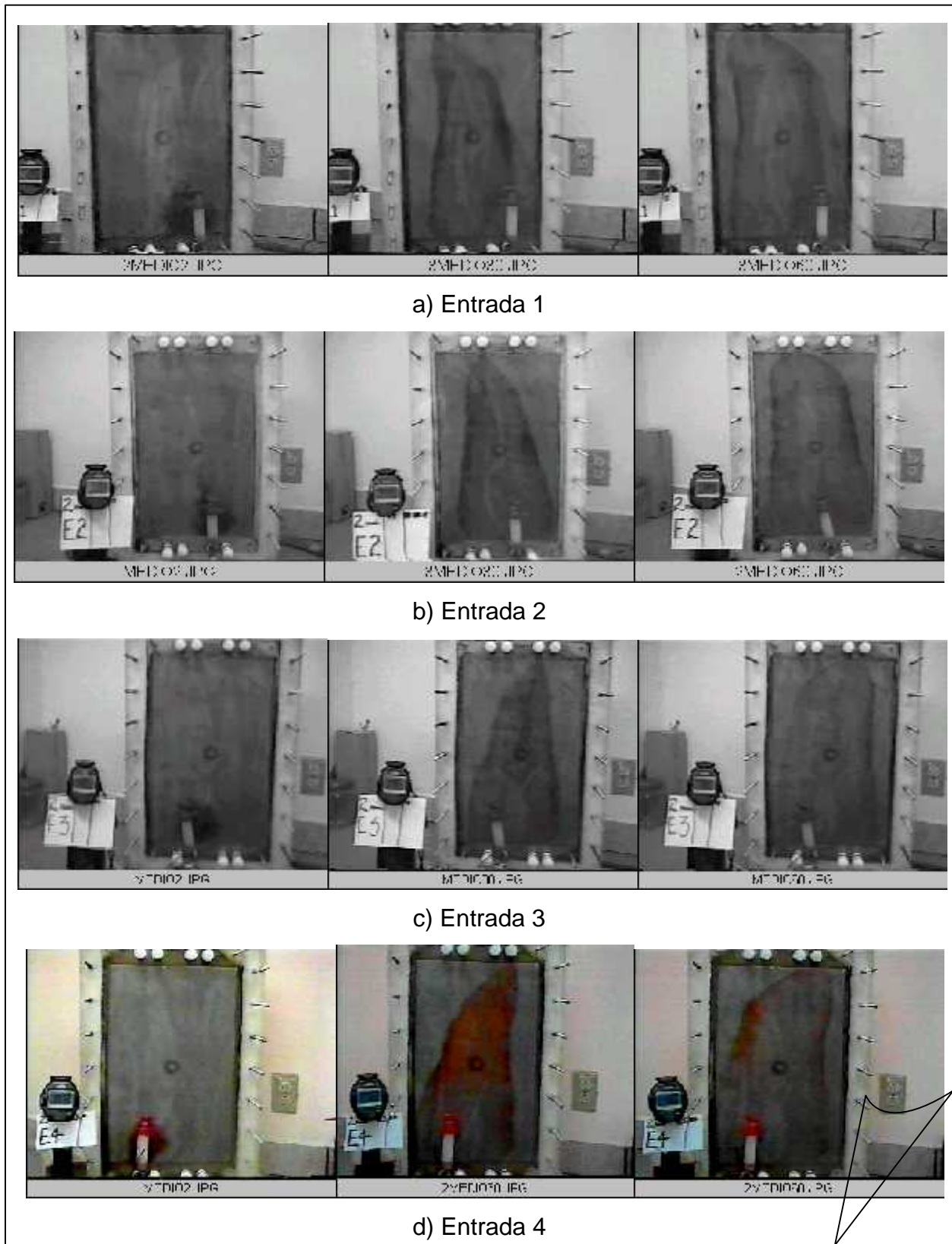
Caudal (lpm)	2mm		4mm		7mm (vel. cm/s)	
	Vel. promedio (cm/s)	Re promedio	Vel. promedio (cm/s)	Re promedio	Vel. promedio (cm/s)	Re promedio
0.5	1.3	127.56	-----		-----	
1	2.6	255.12	1.3	253.55	-----	
2	5.21	511.23	2.6	507.01	1.49	503.22
4	10.41	1021.47	5.21	1016.15	2.98	1006.45
6	-----		7.81	1523.43	4.46	1509.67
8	-----		-----		5.95	2012.22

lpm = litros por minuto

Re = Número adimensional Reynolds

#### 5.1.2.1.- GAP DE 2 mm.

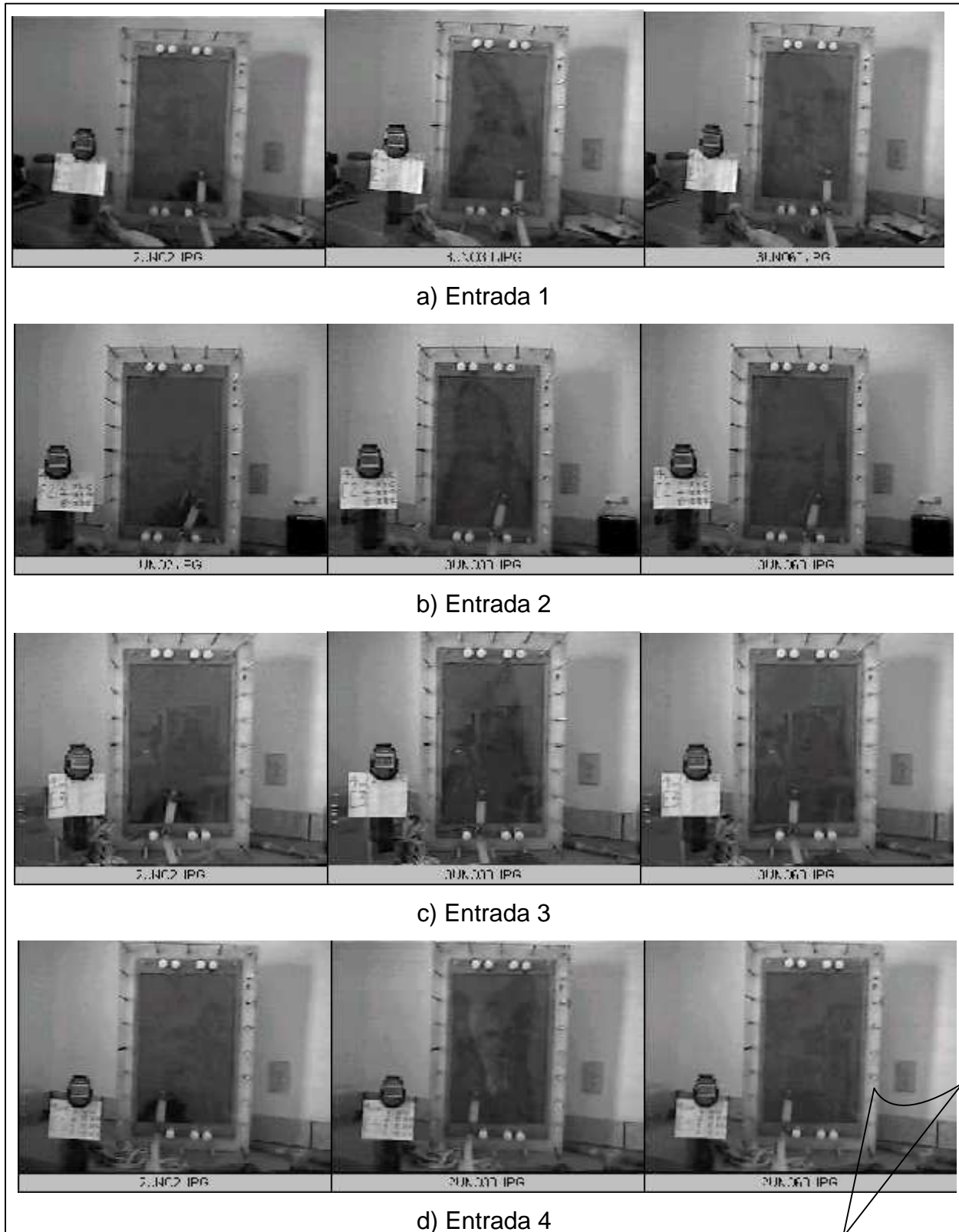
A continuación (figura 23) se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos, iniciando por los realizados con el gap más pequeño (2mm) hasta el más grande (7mm). Para evitar el exceso de figuras en esta sección, únicamente se presentan los resultados del flujo más pequeño, ya que en el resto de los experimentos a diferentes flujos se cubre la misma área del reactor, aunque más rápido.



**Figura 23.-** Distribución del colorante dentro del reactor: gap de 2 mm, 4 entradas a medio litro por minuto.

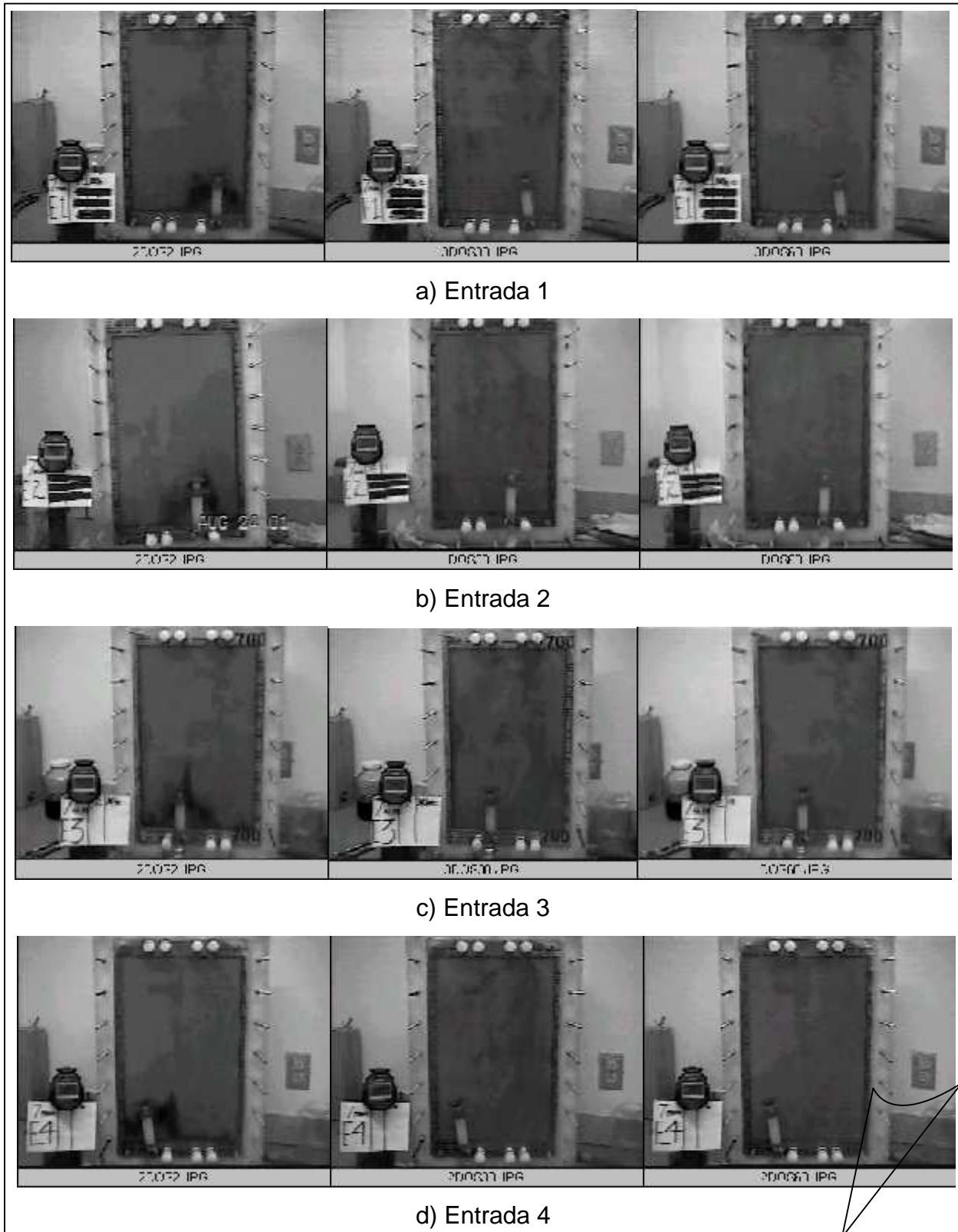


5.1.2.2.- GAP DE 4mm.



**Figura 24.-** Distribución del colorante dentro del reactor: gap de 4 mm, 4 entradas a un litro por minuto.

5.1.2.3.- GAP DE 7 mm.



**Figura 25.-** Distribución del colorante en el interior del reactor: gap de 7 mm, 4 entradas a dos litros por minuto.

Las figuras 23, 24 y 25 muestran que prácticamente toda la zona de reacción es cubierta por el colorante, aunque existen zonas en las esquinas a las cuales no llega el colorante, pero estas zonas son muy pequeñas.

Las fotografías mostradas en las figuras 23, 24 y 25, revelan una similitud en cuanto a comportamiento por parte de las entradas del reactor, es decir, el camino que el fluido sigue es aproximadamente el mismo en el par de las entradas 1 y 4 y de las entradas 2 y 3. Este resultado es esperado, pues el separador empleado en cada par de entradas es el mismo, por ejemplo, al finalizar las pruebas de la entrada 1, el separador es girado 180°, con esto se procede ahora a realizar las pruebas con la entrada 4. Esto mismo es realizado para las pruebas de las entradas 2 y 3, repitiendo el proceso para todas las pruebas, no sólo colorimétricas, si no también para las pruebas de hidrodinámica y de transferencia de masa.

Cabe mencionar que las pruebas colorimétricas son netamente cualitativas, pero hoy por hoy es la primera etapa en el proceso de caracterización y optimización de reactores, ya que dan una buena aproximación con respecto al comportamiento real del reactor.

En este caso, las pruebas colorimétricas nos sirvieron para la selección del ángulo de entrada y saber que existe un comportamiento muy similar entre los pares de entradas 1-4 y 2-3.

Para saber cuantitativamente lo que ocurre en el interior del reactor, comúnmente son usadas las pruebas de distribución del tiempo de residencia y las pruebas de transferencia de masa.

En la próxima sección de esta tesis se abordan las pruebas de hidrodinámica, operando bajo la misma metodología de las pruebas colorimétricas.

## 5.2.- RESULTADOS : MODELAMIENTO DE FLUJO.

Como ya se mencionó (sección 3.3.2.2.1), para la determinación del tiempo de residencia de las partículas en el interior del reactor tipo filtro prensa, es utilizado comúnmente el modelo de dispersión axial de Levenspiel, el cual supone un flujo pistón en el interior. La ecuación (1) predice este comportamiento.

Las pruebas son realizadas como se describe en la sección (4.2.1.2). Los datos de tiempo y corriente son alimentados a la ecuación, en donde las únicas incógnitas son:

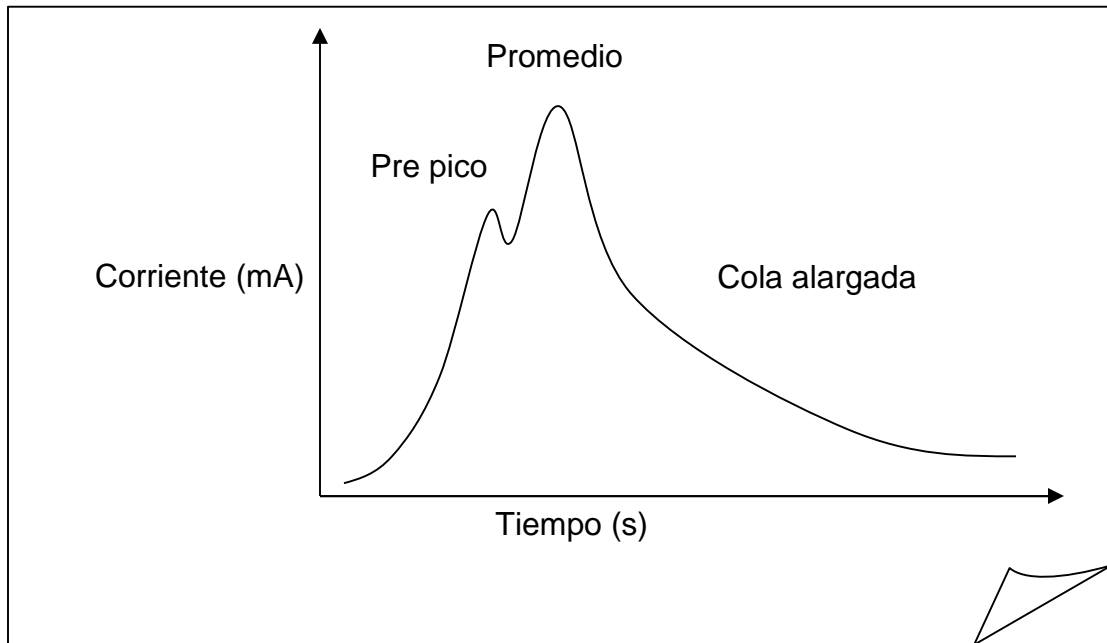
- 1.- Tiempo de residencia promedio ( $\tau$ ) y
- 2.- Número de Péclet ( $Pe$ ).

Al ser tratada esta información, se obtiene como resultado dos curvas gaussianas, una derivada de la ecuación con valores ideales y otra emanada de los datos reales; la primera curva se denominará *curva modelo*, y la segunda será nombrada como *curva experimental*. Entre más alejadas estén estas curvas (la experimental de la ideal) más lejos se está de tener un flujo tipo pistón.

Estas curvas, además de dar información del tiempo de residencia y del número de Péclet, indican la presencia de zonas de alta o de baja velocidad, y están asociadas a prepicos o colas en el Gaussiano. Con el propósito de hacer más sencillo el entendimiento de estas gráficas, a continuación se describen algunos términos comúnmente empleados para describir la forma de las curvas.

- Zona de alta velocidad.- Se llama así cuando una parte del fluido sale más rápido que el promedio; también se le conoce como camino preferencial o corto circuito. Este fenómeno se evidencia cuando la curva de respuesta presenta un pre pico (figura 26).
- Zona de baja velocidad.- Caso contrario, cuando existe una zona en la cual el fluido se transporta a una rapidez menor que la promedio, se dice que existe una zona de baja velocidad; este fenómeno también se le nombre zona de estancamiento. Esto es gráficamente representado por una disminución asintótica de la curva (figura 26, la cola alargada).

- Zona muerta.- Esta es la parte del reactor por la cual prácticamente el fluido no pasa, es decir, existe una velocidad cero. Esta zona no es detectada por estas pruebas, aunque sí puede ser apreciada en las pruebas colorimétricas.



**Figura 26.-** Forma de las zonas de alta y baja velocidad en las curvas de respuesta.

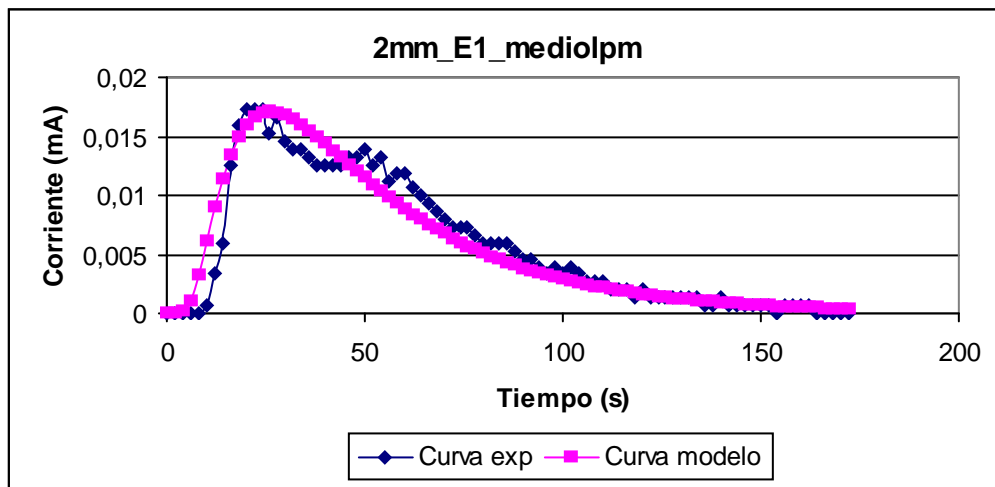
En estas pruebas, se desea que los valores de tiempo de residencia, Péclet y coeficiente de dispersión axial sean lo más similares posible entre todas las entradas, y que todas se aproximen al flujo pistón.

A continuación se presentan las gráficas obtenidas para las pruebas realizadas en la entrada 1 con 2 milímetros de gap; *los resultados de las pruebas restantes se muestra en el anexo A, ya que en todos los casos se presentan los mismos fenómenos.*

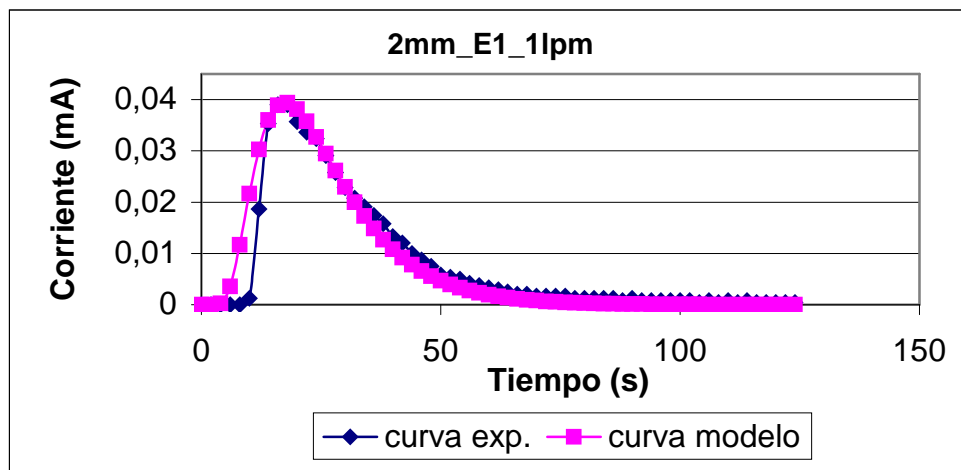
## 5.2.1.- INFLUENCIA DEL GAP Y EL CAUDAL SOBRE EL MODELAMIENTO DE FLUJO.

### 5.2.1.1.- GAP DE 2 mm, ENTRADA 1.

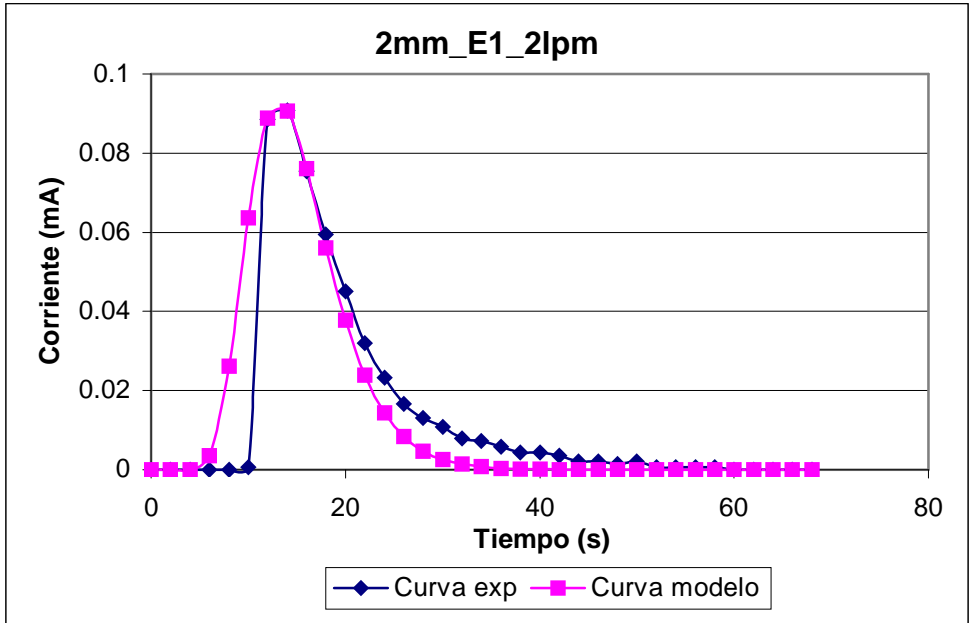
Las pruebas hidrodinámicas son realizadas inyectando una solución de sulfato de cobre y censando la corriente a la salida del reactor con dos electrodos de cobre. Los resultados a 2 mm de gap, en la entrada 1 son mostrados en las figuras 27-31. Para ver el procedimiento para obtener estos resultados véase el anexo D.



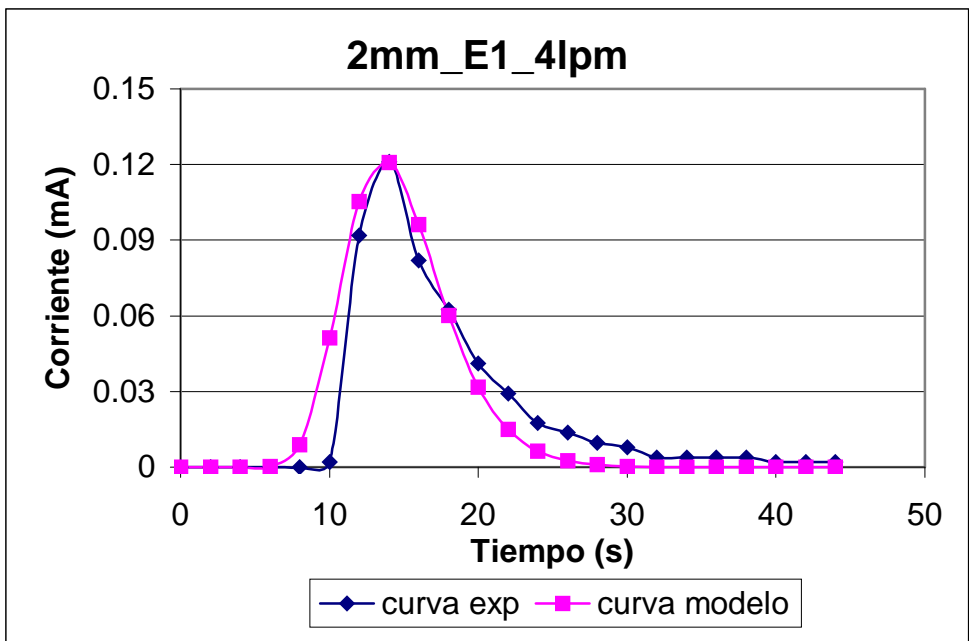
**Figura 27.-** Distribución de tiempo de residencia: gap de 2mm, entrada 1 y medio litro por minuto.



**Figura 28.-** Distribución de tiempo de residencia: gap de 2mm, entrada 1 y un litro por minuto.

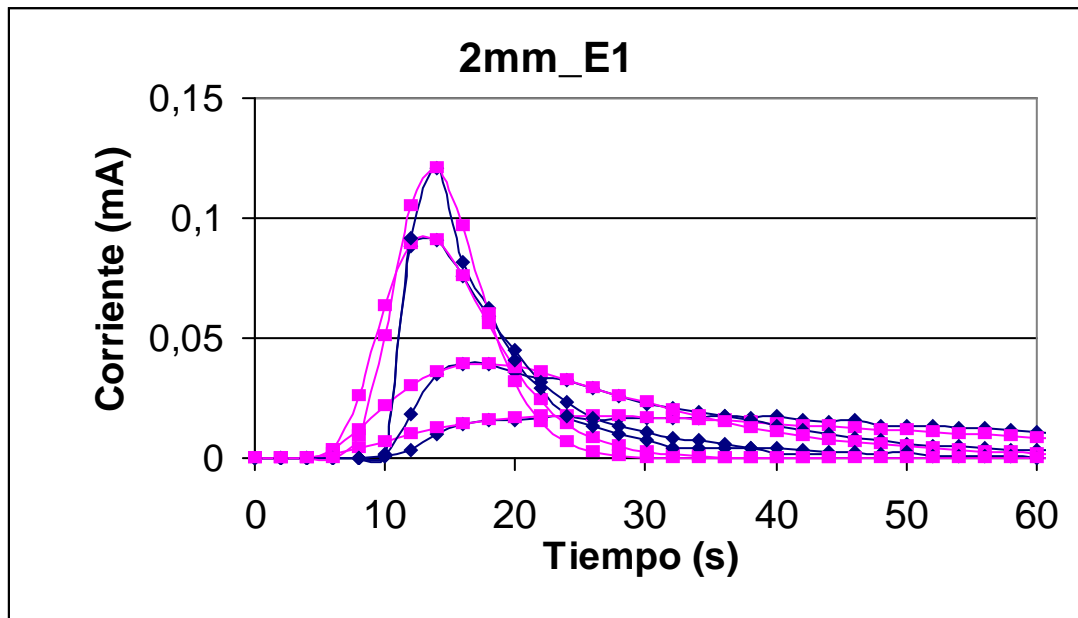


**Figura 29.-** Distribución de tiempo de residencia: gap de 2mm, entrada 1 y dos litros por minuto.



**Figura 30.-** Distribución de tiempo de residencia: gap de 2mm, entrada 1 y medio litro por minuto.

En la figura 31 se muestra el resultado para el gap de 2 milímetros, en la entrada 1, es decir, las cuatro gráficas anteriores superpuestas.



**Figura 31.-** Resultados de las pruebas a un gap de 2 milímetros en la entrada 1.

Las figuras 27-30 muestran las curvas experimental y modelo. En estas gráficas se observa que al flujo más bajo las curvas son diferentes, sin embargo, a flujos más altos las curvas tienen comportamientos muy parecidos, siendo los flujos 1 y 2 litros por minuto los que mejor conducta tienen. Entendiéndose como la mejor conducta cuando ambas curvas se superponen, lo cual denota un flujo tipo pistón en el interior del reactor.

Bajo estas condiciones hidrodinámicas, lo más recomendable es trabajar a flujos altos, pues de esta manera se está más cerca del flujo pistón. Se debe evitar en cuanto sea posible operar al flujo de medio litro por minuto ya que es a ese caudal cuando las curvas están más separadas.

En lo referente a las otras entradas y a las pruebas con los otros gaps, los resultados son de esta misma forma, es decir, la peor condición de operación es el flujo más bajo, y los mejores resultados se obtienen a flujos relativamente elevados (véase anexo A).

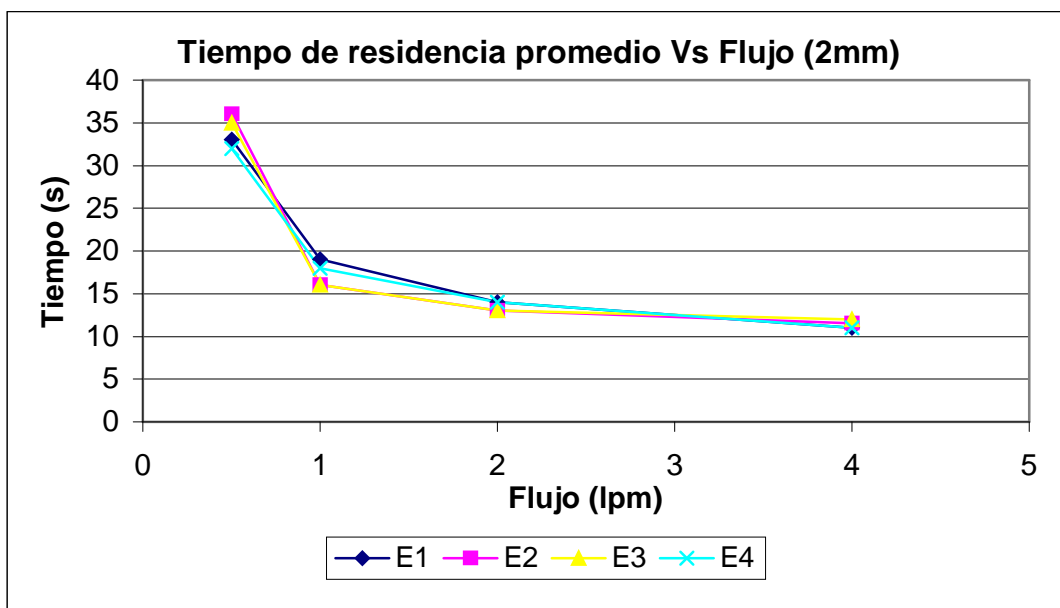


### 5.2.1.2.- TIEMPO DE RESIDENCIA PROMEDIO.

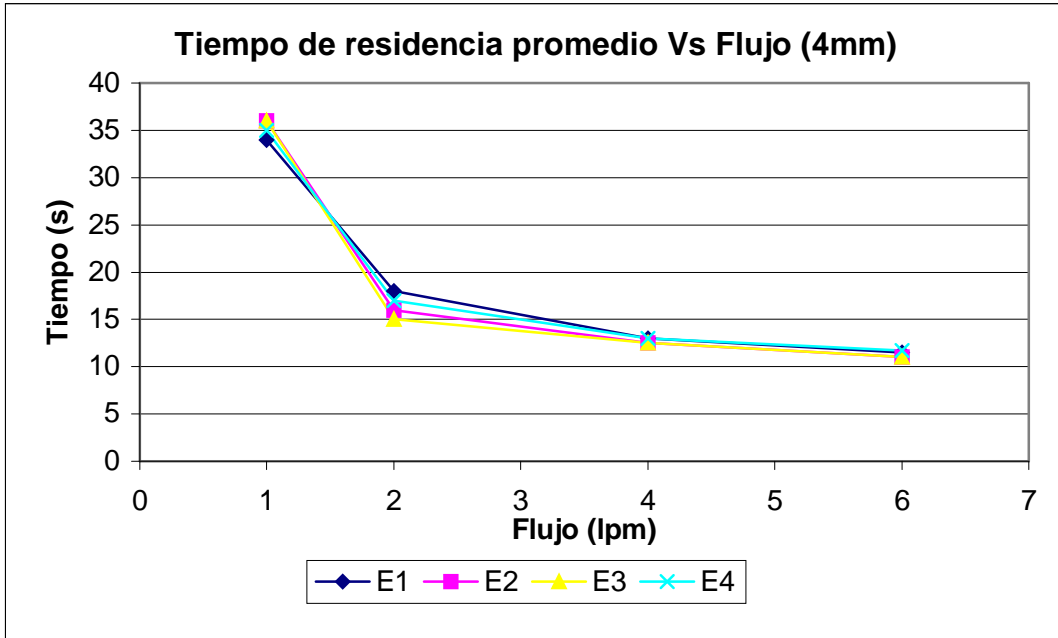
El tiempo de residencia promedio, calculado por ajuste, disminuye primero exponencial y después asintóticamente conforme se incrementa el flujo, sin importar el gap empleado.

Los resultados numéricos son mostrados en la tabla I del anexo B.

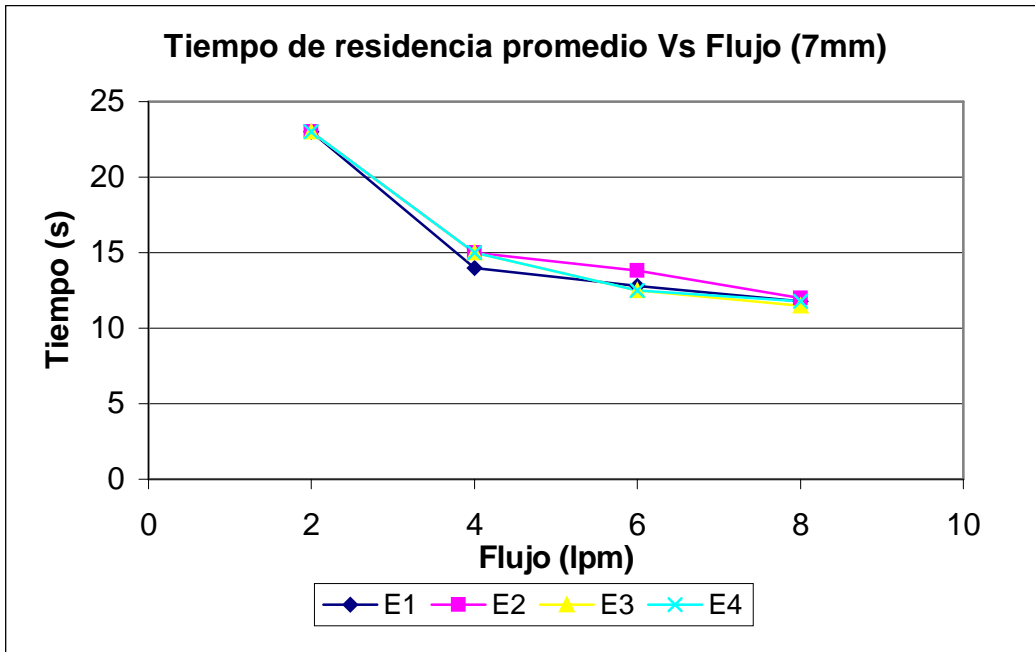
Los resultados mostrados en la tabla I del anexo B son representados gráficamente en las figuras 32, 33 y 34.



**Figura 32.-** Tiempo de residencia promedio a 2 mm de gap, para las 4 entradas.



**Figura 33.-** Tiempo de residencia promedio a 4 mm de gap, para las 4 entradas.



**Figura 34.-** Tiempo de residencia promedio a 7 mm de gap, para las 4 entradas.

En las figuras 32-34 se aprecia una disminución del tiempo de residencia promedio inicialmente exponencial para después caer asintóticamente.

El comportamiento del tiempo de residencia promedio arriba mencionado se presenta para todas las entradas, notándose en muchos casos un comportamiento similar por pares de entradas, es decir, los tiempos son muy similares para las entradas 1-4 y 2-3, lo cual ya había sido observado en las pruebas colorimétricas.

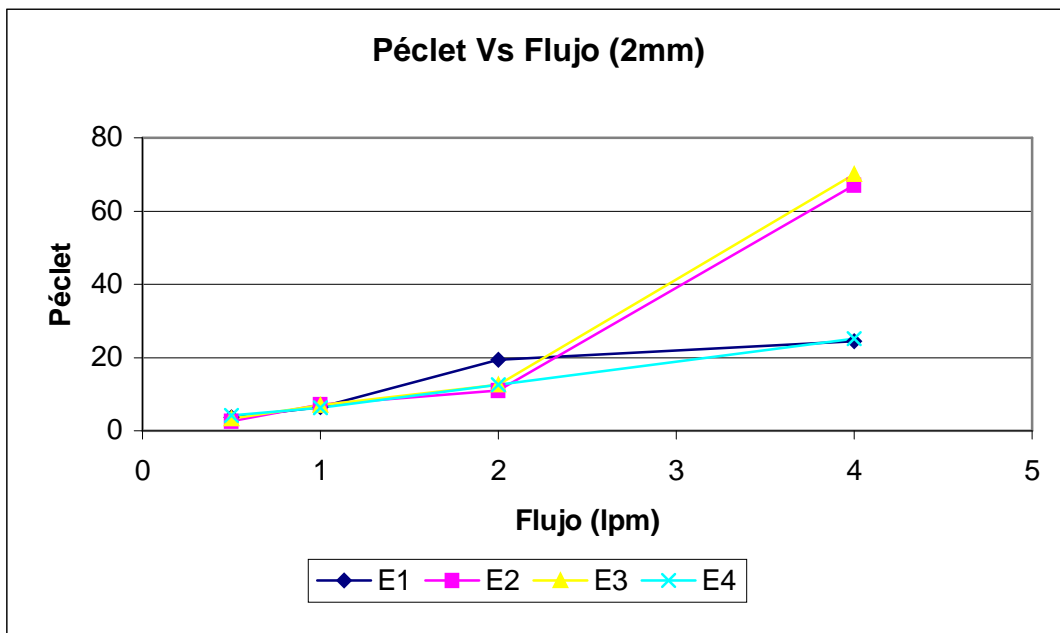
En la tabla XVII y en las figuras 33-35 se aprecia que a un mismo gap, para todas las entradas, los tiempos de residencia promedio son similares, lo cual es deseado.

En general, el tiempo varía con el gap y con el caudal.

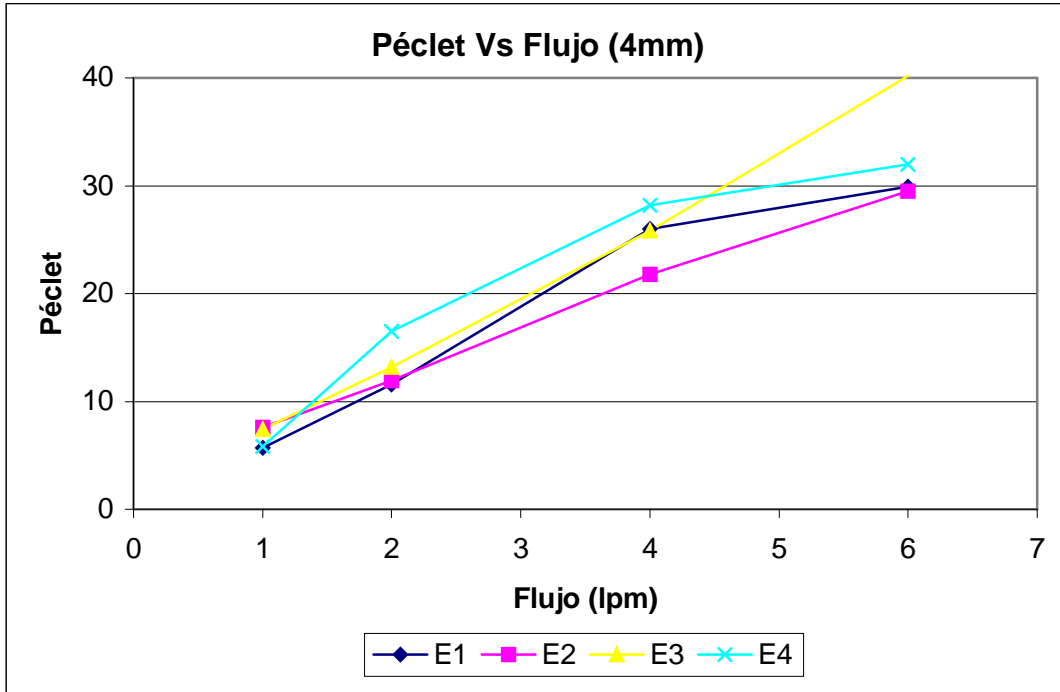
### 5.2.1.3.- NÚMERO DE PÉCLET.

El modelo contiene el número adimensional de Péclet que está relacionado con el grado de dispersión axial en el interior del reactor.

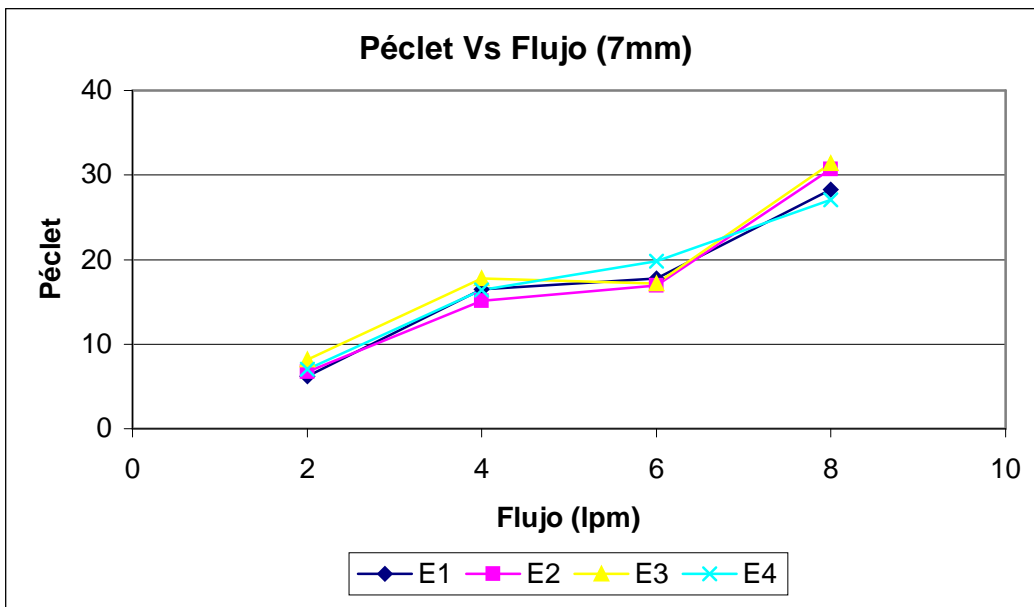
El número de Péclet en cada caso se muestra en las figuras 35, 36 y 37 (véase también la tabla II del anexo B).



**Figura 35.-** Número de Péclet en función del flujo a 2 mm de gap, para las 4 entradas.



**Figura 36.-** Número de Péclet en función del flujo a 4 mm de gap, para las 4 entradas.



**Figura 37.-** Número de Péclet en función del flujo a 7 mm de gap, para las 4 entradas.

En la figura 35 (2 mm de gap) se observa también la paridad de entradas, en todos los casos se nota la tendencia a incrementar el valor del número de Péclet conforme se incrementa el flujo; todos los valores numéricos son similares excepto a 4 lpm en donde las entradas 2 y 3 tienen valores muy superiores al esperado. Este comportamiento es debido quizás a que a ese flujo la velocidad es muy alta y con el ángulo estrecho se obliga a las partículas a fluir muy rápidamente sin oportunidad de moverse en otra dirección que no sea el sentido del flujo.

La figura 36 muestra el comportamiento del número de Péclet en función del flujo a 4 mm de gap. En esa figura se observa la tendencia a incrementar el valor del número adimensional conforme el flujo aumenta, y también se aprecia que para todas las entradas se obtienen valores muy cercanos, lo cual es ideal para electrodiálizadores.

El comportamiento del número de Péclet en función del flujo a 7 mm de gap es mostrado en la figura 37, en ella se aprecia la tendencia a incrementar, aunque entre los flujos 4 y 6 litros por minuto el incremento es menor. En este gap se obtienen valores del número de Péclet muy cercanos para las cuatro entradas a todos los flujos.

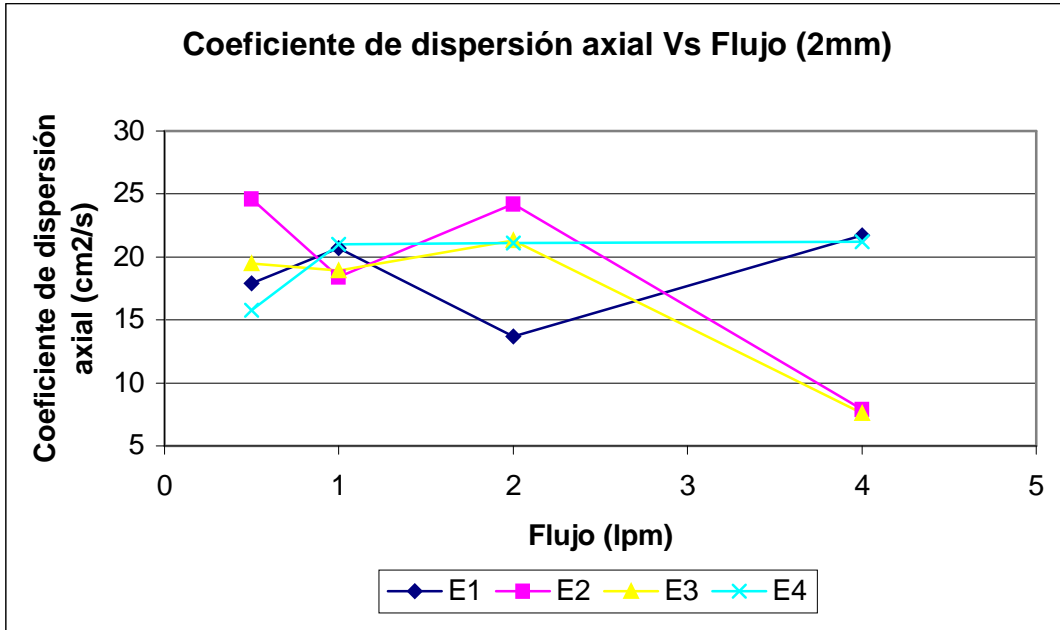
En general, las figuras 35, 36 Y 37 muestran que el número de Péclet depende del flujo empleado, entre mayor es la velocidad mayor es el valor numérico de Péclet (figura 42), lo cual es congruente pues al incrementarse la velocidad del fluido en el interior del reactor se incrementa la turbulencia que en este caso se ve reflejada en Péclet.

#### 5.2.1.4.- COEFICIENTE DE DISPERSIÓN AXIAL.

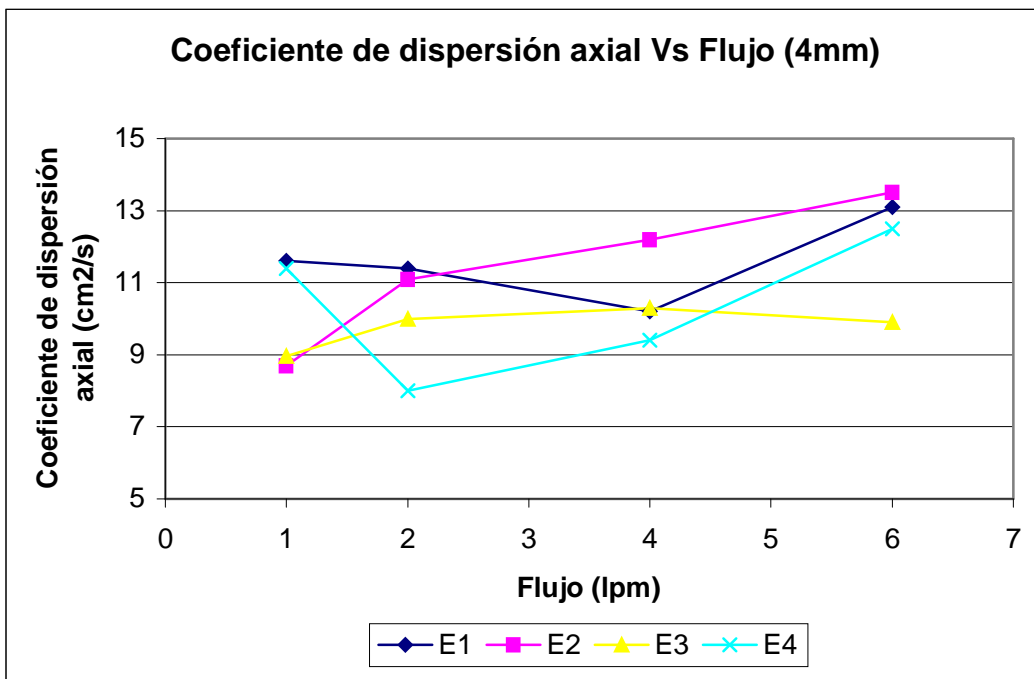
El coeficiente de dispersión axial representa el grado de retromezcla en el reactor, este coeficiente se obtiene partiendo de la ecuación (2).

El valor de este coeficiente de dispersión en cada uno de los casos se muestra en la tabla III del anexo B.

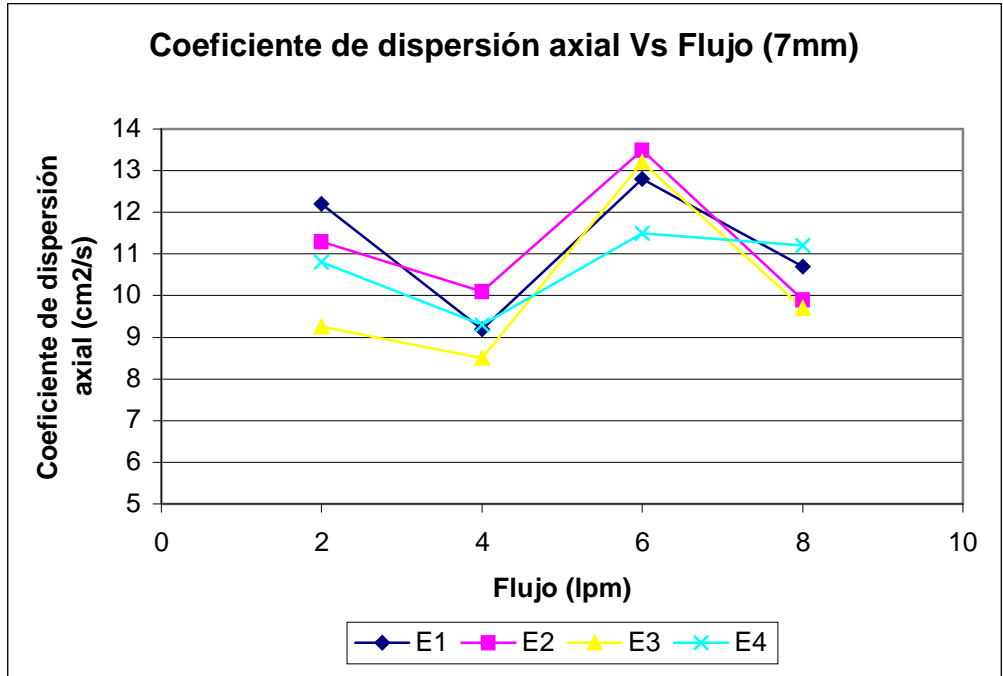
Los resultados mostrados en la tabla III del anexo B son graficados y mostrados en las figuras 38, 39 y 40.



**Figura 38.-** Comportamiento del coeficiente de dispersión axial conforme el flujo empleado a 2 mm de gap.



**Figura 39.-** Comportamiento del coeficiente de dispersión axial conforme el flujo empleado a 4 mm de gap.



**Figura 40.-** Comportamiento del coeficiente de dispersión axial conforme el flujo empleado a 7 mm de gap.

Las figuras 38, 39 y 40 muestran el coeficiente de dispersión axial a los gaps empleados para las 4 entradas a los flujos probados. En ellas, aunque se pueden establecer algunas tendencias, no se aprecia un comportamiento claro de este coeficiente, es por ello que son analizados más detalladamente en la siguiente sección.

#### 5.2.1.5.- INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD LINEAL Y GAP SOBRE EL NÚMERO DE PÉCLET.

Para hacer estas comparaciones, los datos de 7 mm son extrapolados, ya que las velocidades lineales son un poco diferentes a las presentes en 2 y 4 mm (véase tabla XVI). Los resultados numéricos de esta extrapolación y los resultados a 2 y 4 mm de gap son mostrados en la tabla XVII.

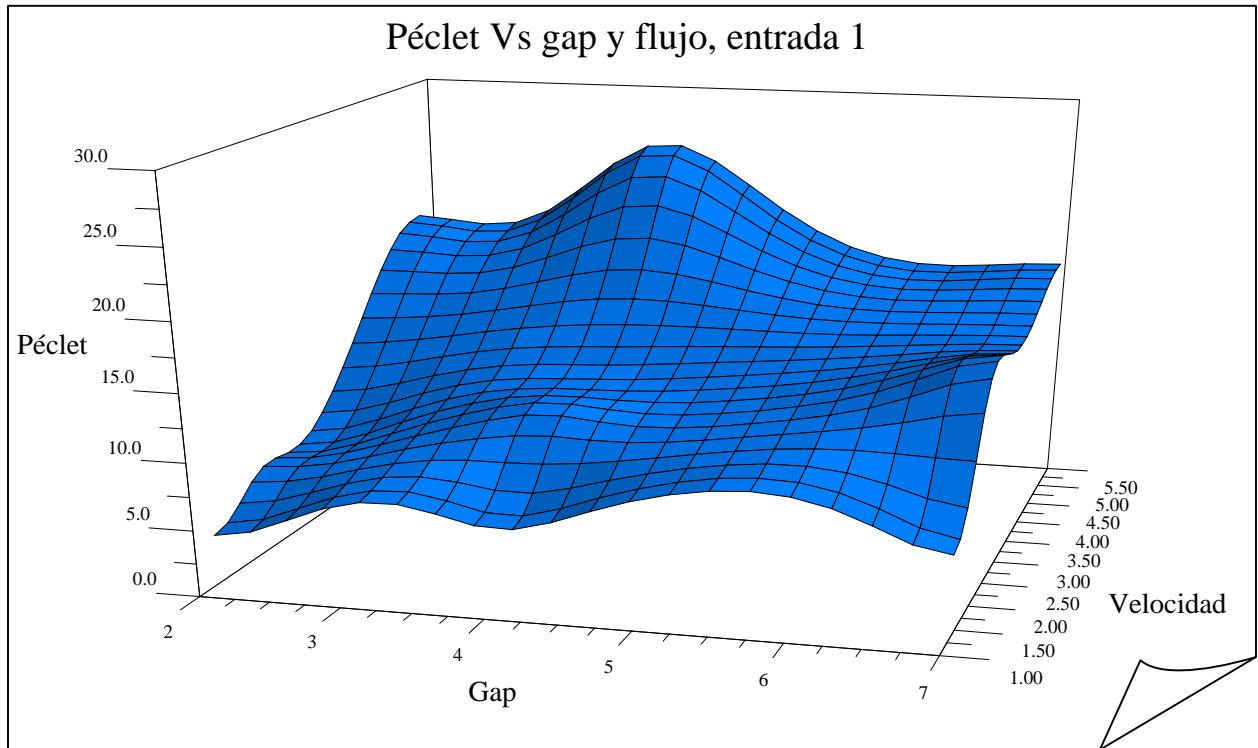
**Tabla XVII.- PÉCLET Y COEFICIENTE DE DISPERSIÓN AXIAL Vs VELOCIDAD LINEAL A LOS 3 GAPS EMPLEADOS.**

Velocidad (cm/s)	Número de Péclet				Coeficiente de dispersión axial (cm <sup>2</sup> /s)			
	2 mm							
	E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4
<b>1.3</b>	3.7	2.7	3.4	4.2	17.92	24.6	19.5	15.79
<b>2.6</b>	6.4	7.2	7	6.3	20.7	18.4	18.9	21
<b>5.21</b>	19.4	11	12.5	12.6	13.7	24.2	21.3	21.1
	4mm							
<b>1.3</b>	5.7	7.6	7.4	5.8	11.6	8.7	8.96	11.4
<b>2.6</b>	11.6	11.9	13.2	16.5	11.4	11.1	10	8
<b>5.21</b>	26	21.8	25.8	28.2	10.21	12.2	10.29	9.4
	7 mm							
<b>1.3</b>	5.43	5.88	6.81	5.72	13.05	11.78	11.47	11.25
<b>2.6</b>	13.07	12.52	13.65	13.94	9.34	9.97	8.41	9.33
<b>5.21</b>	20.73	19.19	20.51	22.18	17.09	16.94	18.15	13.99

En esta tabla se aprecia también que el número de Péclet se incrementa con el flujo, es decir, el grado de dispersión es menor conforme se aumenta la velocidad lineal en el interior del reactor. Este resultado también nos indica que es mejor operar a flujos elevados.

La figura 41 muestra el comportamiento del número de Péclet con respecto al gap y a la velocidad, esto para la entrada 1. Lo referente a las entradas restantes es mostrado en el anexo B, al igual que los efectos del gap y la velocidad por separado.





**Figura 41.-** Efecto del gap y la velocidad lineal sobre el número adimensional Péclet en la entrada 1.

En la figura 41 se observa que el número adimensional Péclet siempre se incrementa con la velocidad.

Este comportamiento del número de Péclet es consecuencia del coeficiente de dispersión axial, es decir, el valor obtenido de Péclet envuelve un valor del coeficiente de dispersión axial, el cual, como ya se ha mencionado, representa el grado de retromezcla en el interior del reactor. El coeficiente de dispersión axial es inversamente proporcional al número de Péclet (ecuación 2). Para observar la influencia de la velocidad lineal y el gap sobre el coeficiente de dispersión axial, véase el anexo B.

Con estos resultados, se concluye que la mejor opción es usar el gap de 4 mm, pues es a este gap cuando se presentan los Péclet más altos y los coeficientes de dispersión axial más bajos.

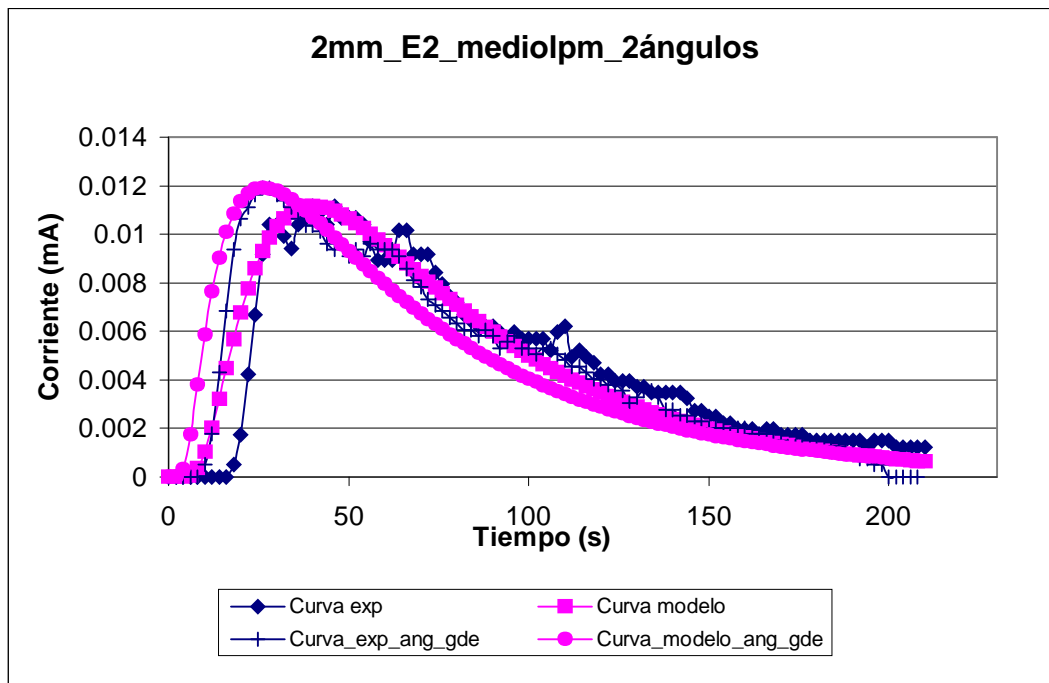
## 5.2.2.- INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE ENTRADA SOBRE EL MODELAMIENTO DEL FLUJO.

Como ya se mencionó en la sección 4.2.1.2.2, se estudia el efecto del ángulo de entrada sobre el modelamiento del flujo al comparar los resultados de la entrada 2, a los 3 gaps empleados usando dos ángulos diferentes de entrada: mediano (empleado en toda la serie mencionada antes) y grande (que sirve como ángulo exploratorio).

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cuanto a distribución del tiempo de residencia se refiere.

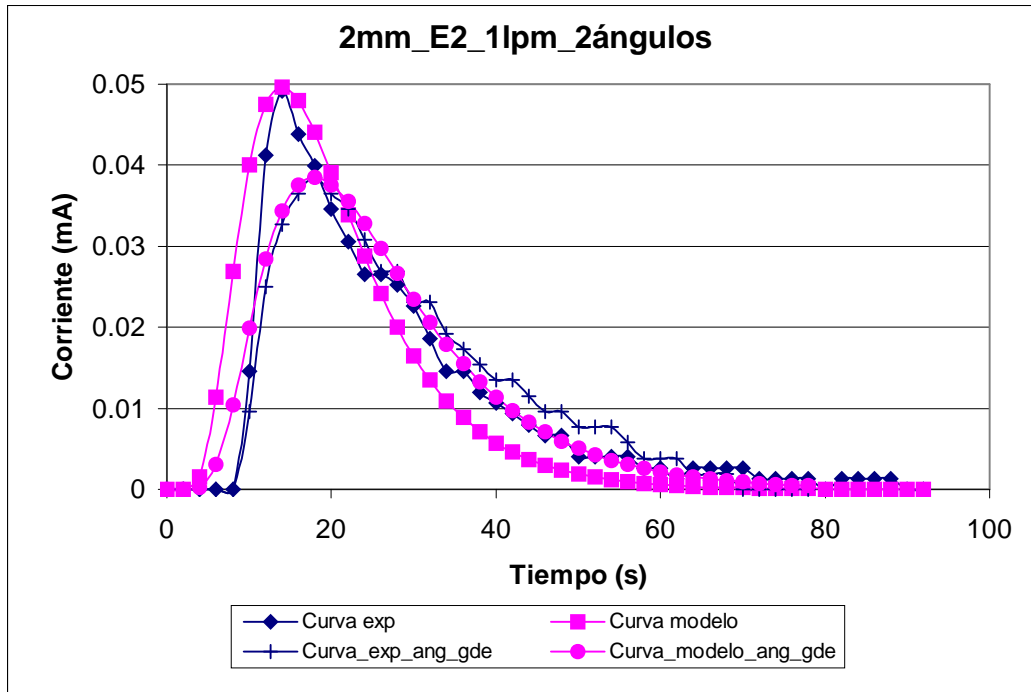
### 5.2.2.1.- GAP DE 2mm, ENTRADA 2.

La figura 42 muestra el efecto del ángulo de entrada cuando se tiene un flujo de medio litro por minuto. Nótese que aparentemente hay más separación con respecto a la curva modelo en la curva del ángulo grande.



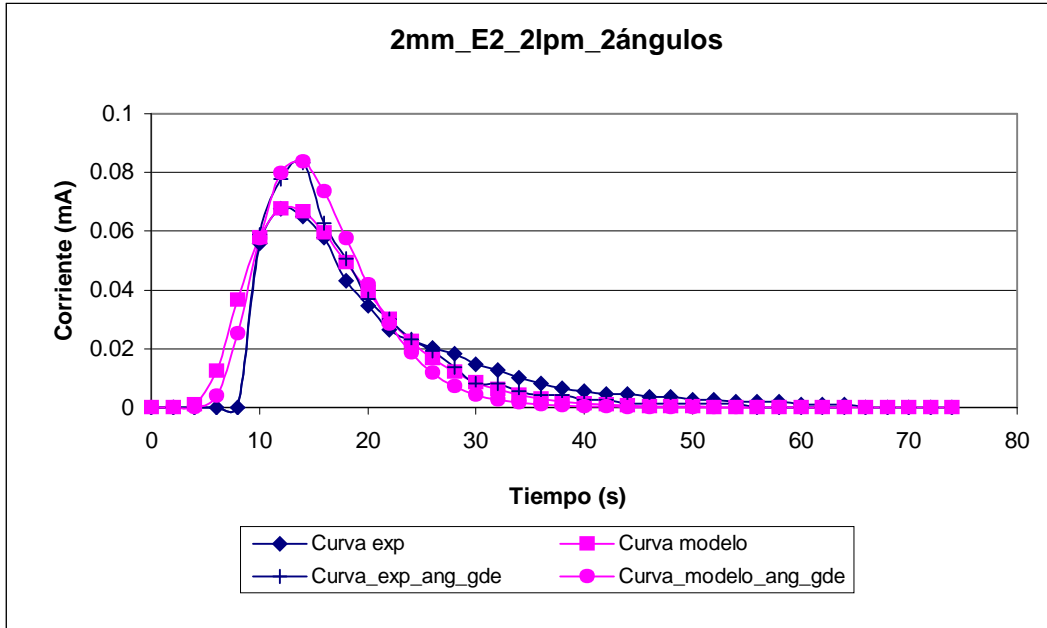
**Figura 42.-** Distribución del tiempo de residencia, gap: 2mm, 2 ángulos, entrada 2, medio litro por minuto.

La figura 43 muestra la distribución del tiempo de residencia con estos 2 ángulos de entrada, pero ahora a un litro por minuto. Nótese que ambas curvas tienen un ajuste similar con respecto a su curva modelo en cada caso, lo cual debe reflejarse en el coeficiente de dispersión axial.



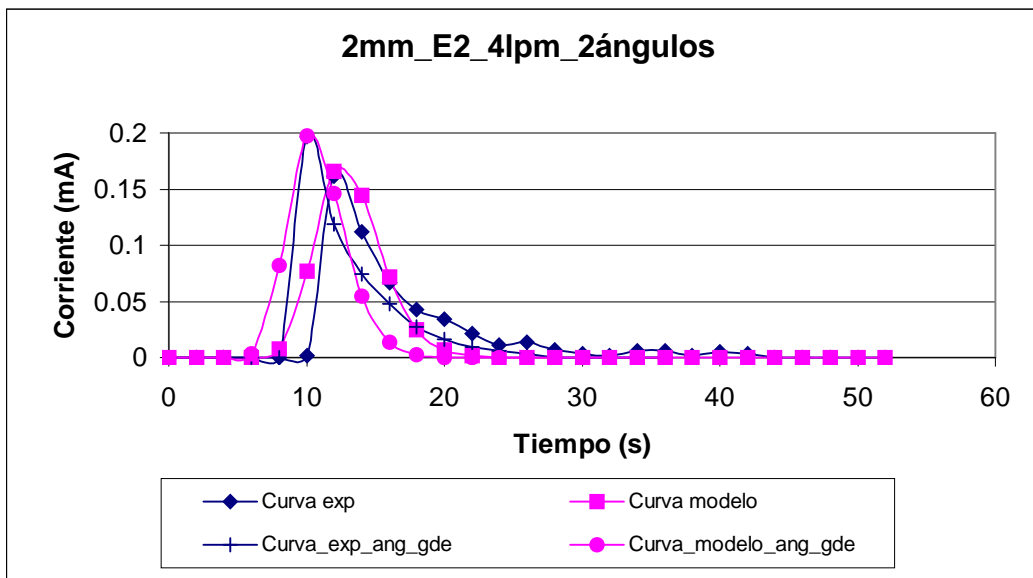
**Figura 43.-** Distribución del tiempo de residencia, gap: 2mm, 2 ángulos, entrada 2, un litro por minuto.

La figura 44 muestra la comparación en cuanto a distribución del tiempo de residencia se refiere, comparando los dos ángulos de entrada ahora para el flujo de dos litros por minuto. En esta gráfica se observa que las curvas son muy similares, sólo que la del ángulo grande es más alta.



**Figura 44.-** Distribución del tiempo de residencia, gap: 2mm, 2 ángulos, entrada 2, dos litros por minuto.

La figura 45 muestra la distribución del tiempo de residencia al hacer variar únicamente el ángulo de entrada a 4 litros por minuto. Nótese que ambas curvas tienen dispersiones pequeñas y similares cada una respecto a su curva modelo.



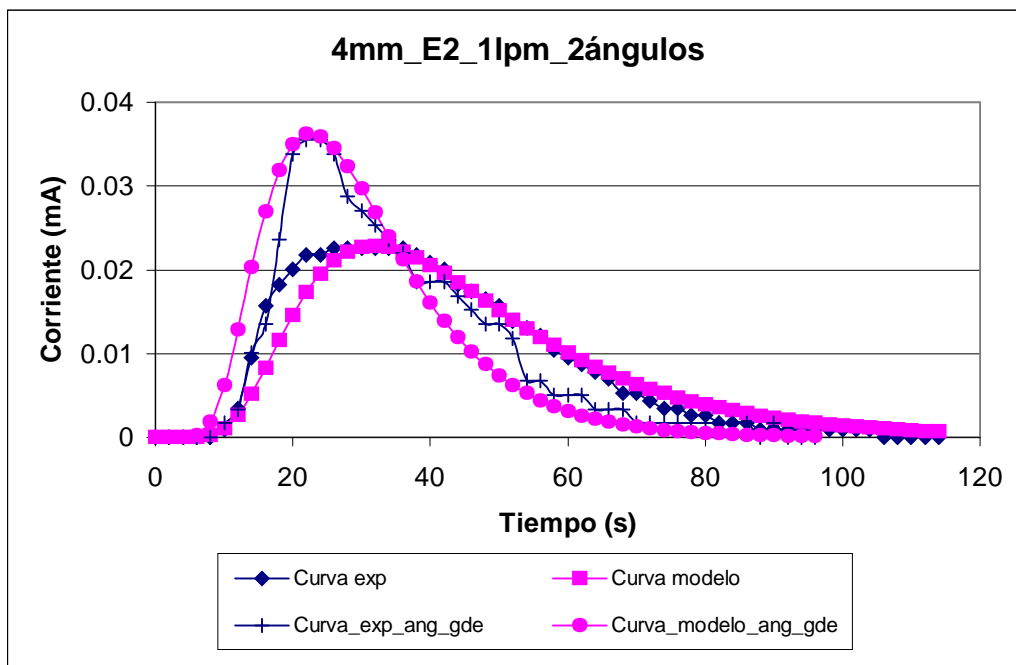
**Figura 45.-** Distribución del tiempo de residencia, gap: 2mm, 2 ángulos, entrada 2, cuatro litros por minuto.

En las cuatro gráficas anteriores se puede observar que la distribución del tiempo de residencia presenta algunas diferencias, pero no se puede establecer claramente este comportamiento sino hasta que sean analizados los datos. Por el momento, lo que se puede concluir es que al usar cualquiera de los dos ángulos de entrada, se presenta una gran similitud de las curvas experimental y modelo, lo cual nos indica que estamos muy cerca de lo que idealmente se llama flujo pistón.

#### 5.2.2.2.- GAP DE 4 mm, ENTRADA 2.

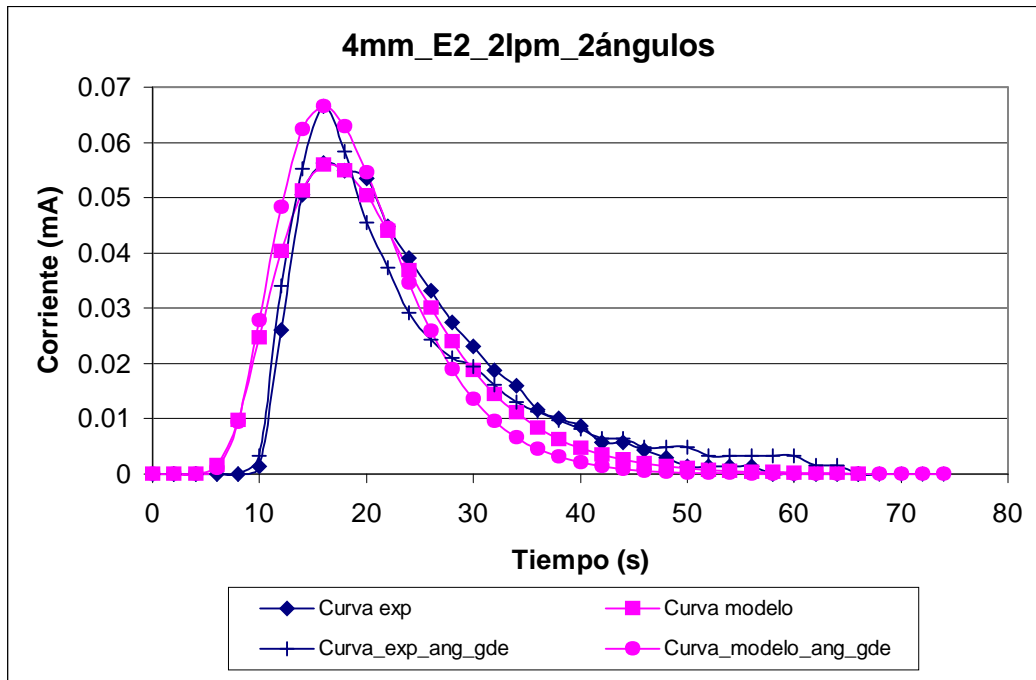
Las figuras 46-49 muestran la distribución del tiempo de residencia cuando se tiene un gap de 4 mm, haciendo variar únicamente el ángulo de entrada.

En la figura 46 se muestra que la curva con el ángulo de entrada grande es más alta y presenta menos dispersión.



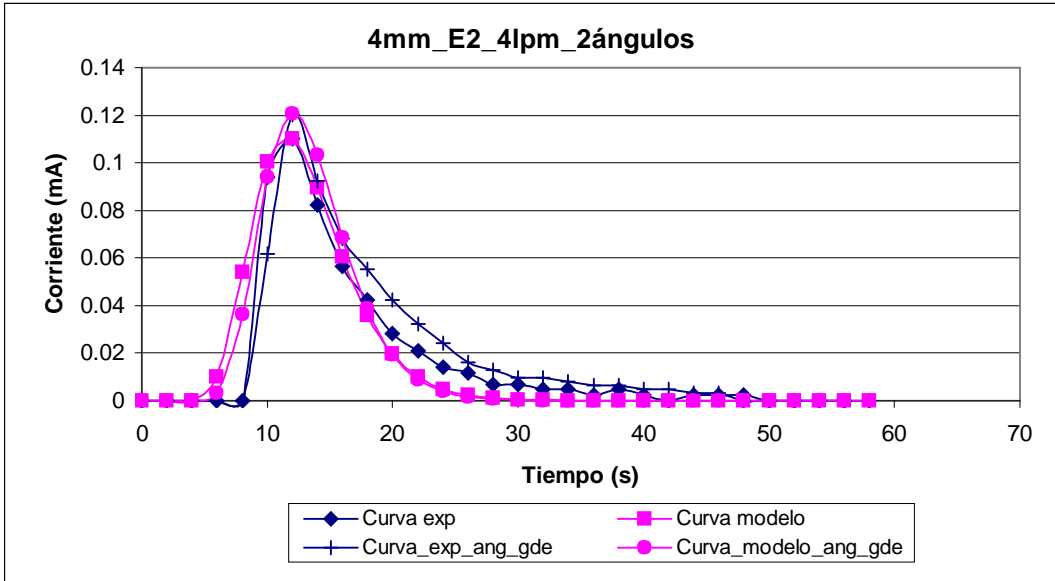
**Figura 46.-** Distribución del tiempo de residencia, gap: 4 mm, 2 ángulos, entrada 2, un litro por minuto.

La figura 47 muestra la distribución del tiempo de residencia para los dos ángulos empleados cuando el gap es de 4 mm y el flujo es de dos litros por minuto. Se observa que las curvas son muy similares, solo que la curva cuando se emplea el ángulo grande es un poco más alta, lo cual se debe observar en el número adimensional Péclet.



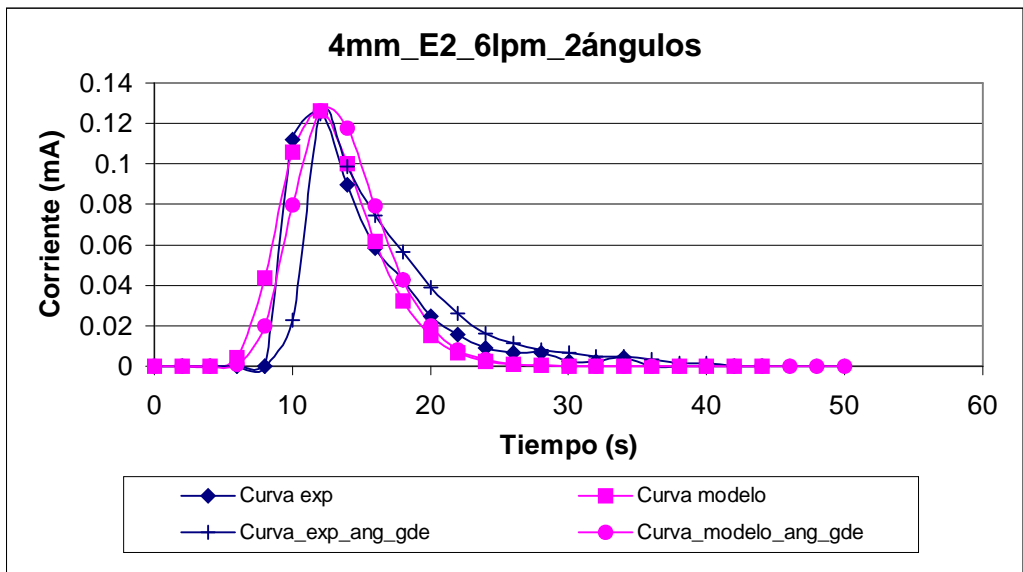
**Figura 47.-** Distribución del tiempo de residencia, gap: 4 mm, 2 ángulos, entrada 2, dos litros por minuto.

En la figura 48 se muestra la distribución del tiempo de residencia cuando se cambia el ángulo de entrada a 4 mm de gap, en la entrada 2, pero ahora a un flujo de cuatro litros por minuto. En esta gráfica se puede apreciar que las curvas son prácticamente iguales, teniendo una mayor altura la gráfica que representa la distribución del tiempo de residencia con el ángulo grande.



**Figura 48.-** Distribución del tiempo de residencia, gap: 4 mm, 2 ángulos, entrada 2, cuatro litros por minuto.

La figura 49 muestra la comparación de la distribución del tiempo de residencia al usar 2 ángulos de entrada, ahora a 6 litros por minuto. Nótese que ambas curvas son prácticamente iguales y presentan gran similitud entre las curvas experimental y modelo, lo cual indica que estamos cerca del flujo pistón.



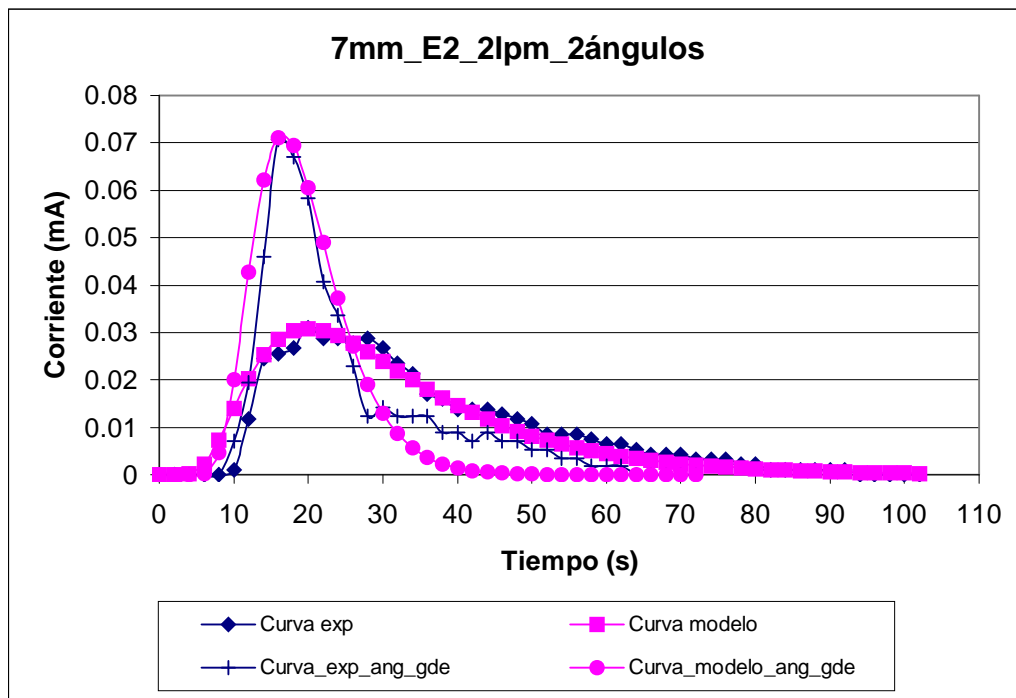
**Figura 49.-** Distribución del tiempo de residencia, gap: 4 mm, 2 ángulos, entrada 2, seis litros por minuto.

En las gráficas que representan los resultados a un gap de 4 mm, se puede observar que a los flujos altos, prácticamente las curvas son iguales, y que se tiene muy poca diferencia entre las curvas experimental y modelo, lo cual nos indica que esas condiciones de operación son recomendables para operar.

### 5.2.2.3.- GAP DE 7 mm, ENTRADA 2.

Las figuras 50-53 muestran los resultados obtenidos al variar el ángulo de entrada cuando se tiene un gap de 7 mm.

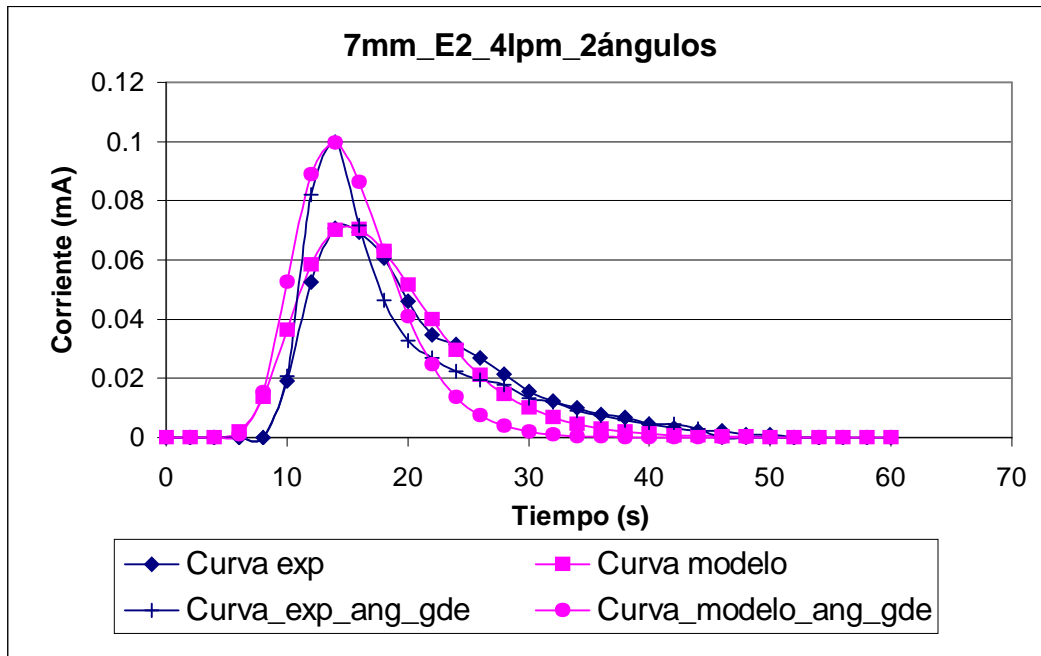
La figura 50 expresa los resultados cuando el flujo es de dos litros por minuto. En esta gráfica se observa que al emplear el ángulo más grande se presenta una curva con mayor altitud, lo cual se verá reflejado en el número de Péclet.



**Figura 50.-** Distribución del tiempo de residencia, gap: 7 mm, 2 ángulos, entrada 2, dos litros por minuto.



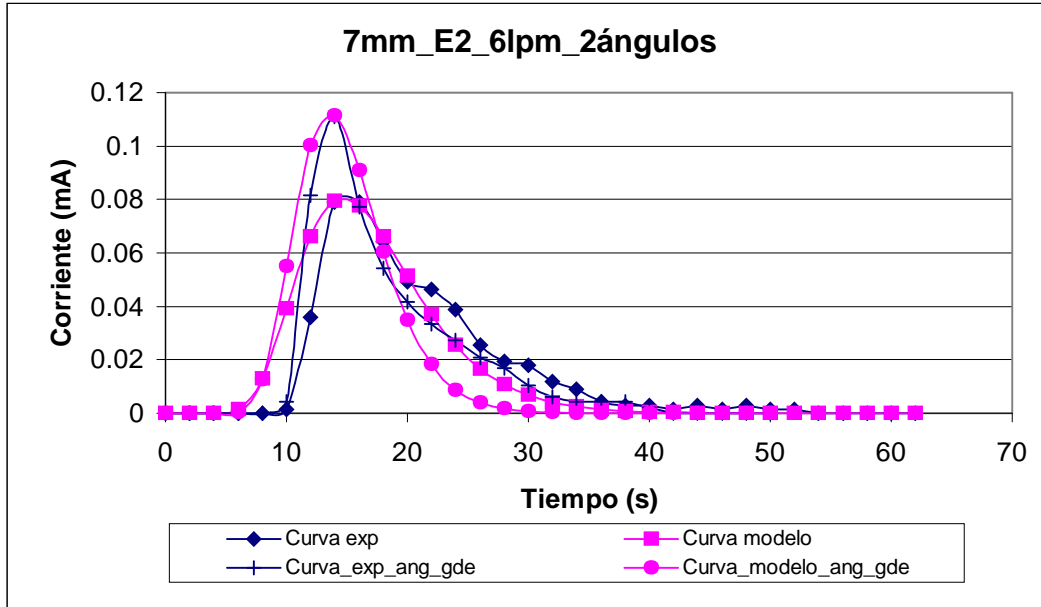
La figura 51 muestra los resultados para el gap de 7 mm, con dos ángulos de entrada a un flujo de 4 litros por minuto. Nótese que la diferencia entre ambas curvas disminuye con respecto al flujo de 2 litros por minuto, aunque todavía se aprecia una marcada diferencia. Se mantiene la tendencia de una curva con mayor altitud para el ángulo grande.



**Figura 51.-** Distribución del tiempo de residencia, gap: 7 mm, 2 ángulos, entrada 2, cuatro litros por minuto.

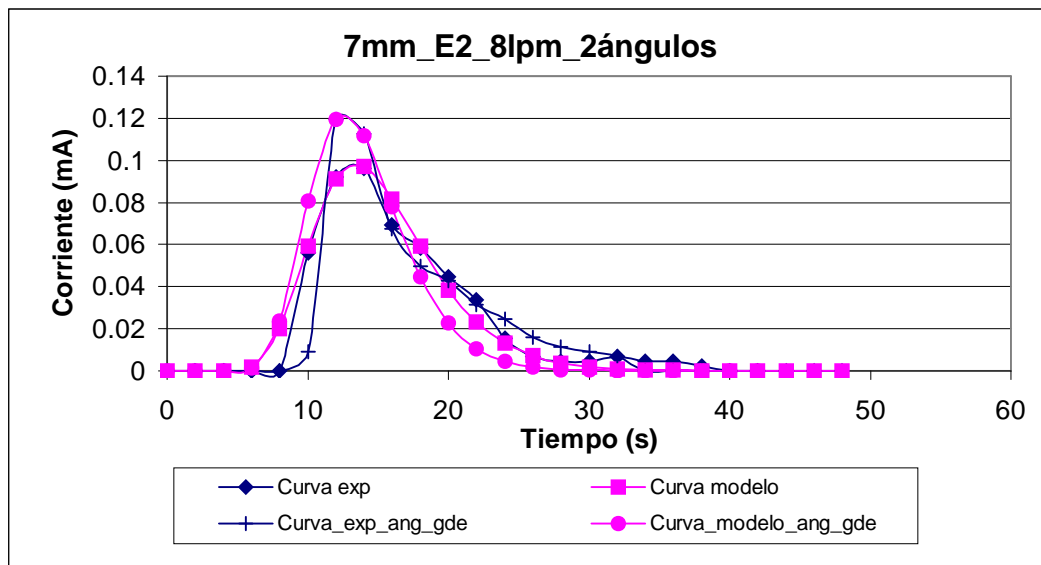
La figura 52 muestra los resultados para el gap de 7 mm, pero ahora a un flujo de 6 litros por minuto, haciendo variar el ángulo de entrada.

En la figura 52 se observa que la curva que representa los resultados al emplear el ángulo grande presenta una mayor amplitud con respecto al otro ángulo.



**Figura 52.-** Distribución del tiempo de residencia, gap: 7 mm, 2 ángulos, entrada 2, seis litros por minuto.

La figura 53 muestra los resultados a 7 mm de gap, pero ahora a un flujo de 8 litros por minuto. La única diferencia entre estas pruebas es el ángulo de entrada. Se presenta el mismo fenómeno de altitud mayor para la curva del ángulo grande.



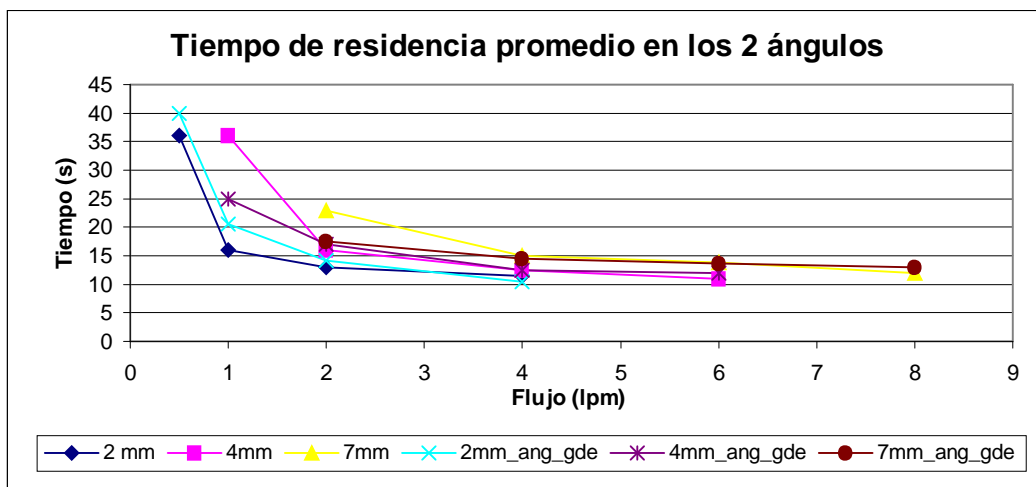
**Figura 53.-** Distribución del tiempo de residencia, gap: 7 mm, 2 ángulos, entrada 2, ocho litros por minuto.

A continuación se hace un análisis más detallado de los resultados al emplear 2 ángulos de entrada. Las variables que se evalúan son las que el modelo de dispersión de axial de Levenspiel predice: tiempo de residencia promedio, número de Péclet y coeficiente de dispersión axial.

#### 5.2.2.4.- TIEMPO DE RESIDENCIA PROMEDIO, NÚMERO DE PÉCLET Y COEFICIENTE DE DISPERSIÓN AXIAL EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE ENTRADA.

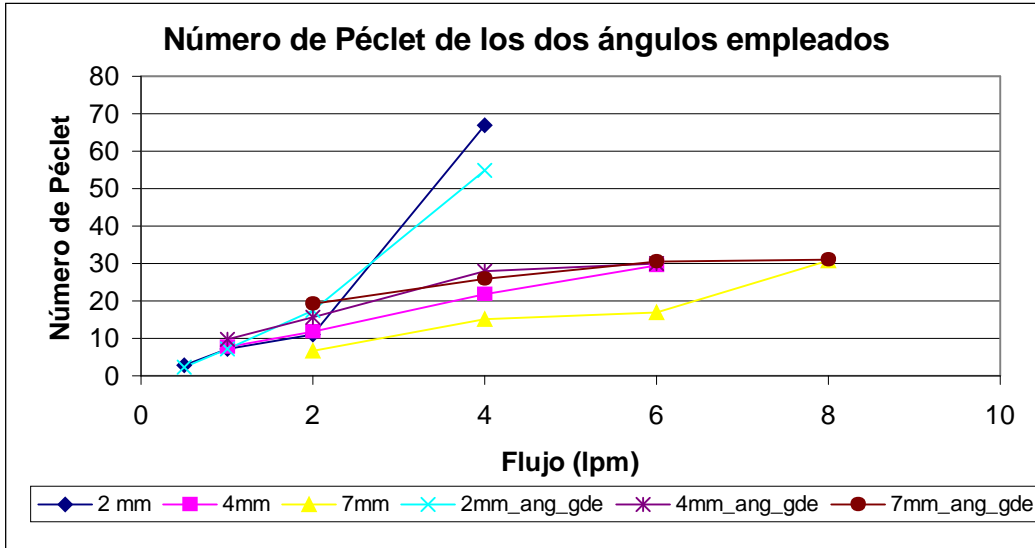
El tiempo de residencia promedio, el número de Péclet y el coeficiente de dispersión axial obtenidos con los 2 ángulos se muestran en las figuras 54, 55 y 56 (véase también tabla IV del anexo B).

El comportamiento del tiempo de residencia promedio conforme se incrementa el flujo, en los 2 ángulos de entrada se grafica en la figura 54. Nótese que en todos los casos la caída es primero exponencial y después asintótica, habiendo una diferencia apreciable al flujo más bajo.



**Figura 54.-** Comportamiento del tiempo de residencia promedio para los dos ángulos empleados.

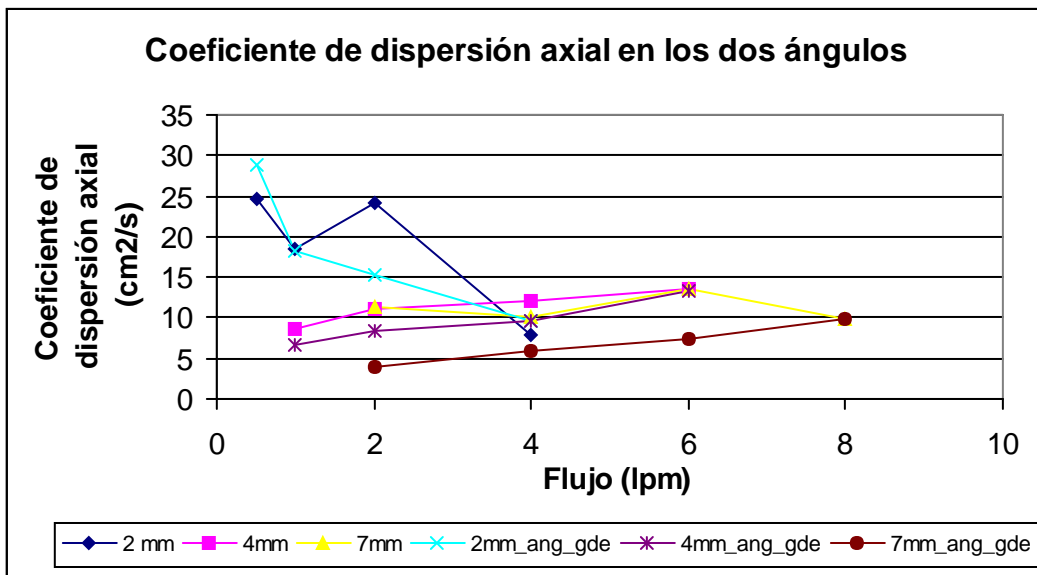
El comportamiento de número de Péclet con respecto al flujo se muestra gráficamente en la figura 55.



**Figura 55.-** Comportamiento del número de Péclet para los dos ángulos empleados.

En la figura 55 se muestra una tendencia a incrementar el valor del número adimensional conforme se aumenta el flujo.

El comportamiento del coeficiente de dispersión axial conforme el flujo se presenta en la figura 56.



**Figura 56.-** Comportamiento del coeficiente de dispersión axial para los dos ángulos empleados.

En la figura 54 se observa que a 2 mm de gap, los tiempos de residencia promedio son un poco mayores para el ángulo grande, mientras que para 4 y 7 mm de gap, los valores son muy cercanos excepto por el flujo más bajo en cada caso, en donde se tiene un tiempo un poco mayor para el ángulo normal.

En la figura 55 se observa que a 2 mm de gap se presenta el mismo comportamiento de incrementarse disparadamente el valor del número de Péclet a 4 litros por minuto. Cuando se emplean 4 y 7 mm de gap, se presentan tendencias similares, con valores un poco mayores para el ángulo grande. Nótese que en 4 y 7 mm de gap, al flujo más alto de cada situación los valores son prácticamente los mismos, por lo cual se puede hablar de una tendencia a igualarse los valores al incrementar el flujo. En general, el valor del número de Péclet se incrementa con el flujo.

El comportamiento del coeficiente de dispersión axial se muestra en la figura 56, en ella se observan 2 tendencias; la primera es usando el gap de 2 mm, en donde el valor tiende a disminuir conforme se aumenta el flujo, debido a la poca libertad de movimiento de las moléculas. La segunda tendencia se presenta para 4 y 7 mm de gap, en donde el valor del coeficiente se incrementa conforme se aumenta el flujo. Nótese que los valores del retromezclado son ligeramente mayores para el ángulo normal, debido a que con el ángulo grande el fluido se dispersa más en el ancho del reactor y tiene menos oportunidad de movimiento en dirección axial o inversa al flujo.

Con todo esto queda comprobado que la mejor opción (de las condiciones probadas) es operar a 4 mm de gap, con flujos altos, ya que de esta manera se está muy cerca del flujo tipo pistón para todas las entradas.

En general, a cualquier gap utilizado, es recomendable operar a flujos altos, pues de esta manera se disminuye la dispersión axial y se aumenta el número de Péclet.

Al variar el ángulo de entrada se varía la distribución espacial de los fluidos en el interior del reactor, aunque en este caso, dichas variaciones disminuyen al incrementar el flujo.

### 5.3.- RESULTADOS : TRANSFERENCIA DE MASA.

Para expresar la transferencia de masa en el interior de un reactor, comúnmente se emplean los números adimensionales, que en el caso de reactores tipo filtro prensa bajo convección forzada, son los números de Reynolds, Sherwood y Schmidt.

Estas pruebas consisten en obtener la corriente límite del sistema al hacer un barrido de potencial a diferentes condiciones hidrodinámicas de operación. En este trabajo se realizan las pruebas a canal vacío y con promotor de turbulencia, para de esta manera conocer el aumento de transferencia de masa debida al promotor.

El aumento de transferencia de masa debido a promotores de turbulencia no ha sido explicado plenamente, se sabe que incrementan la transferencia de masa al aumentar la turbulencia en el interior del reactor, pero no se puede saber el efecto exacto que tendrá sin hacer pruebas. El promotor de turbulencia utilizado en este trabajo tiene las características mostradas en la figura 16.

#### 5.3.1.- INFLUENCIA DEL GAP Y DEL CAUDAL SOBRE LA TRANSF. DE MASA.

##### 5.3.1.1.- DETERMINACIÓN DE CORRIENTE LIMITE (Ver anexo C).

Esta serie de experimentos es mostrado en la tabla XVIII.

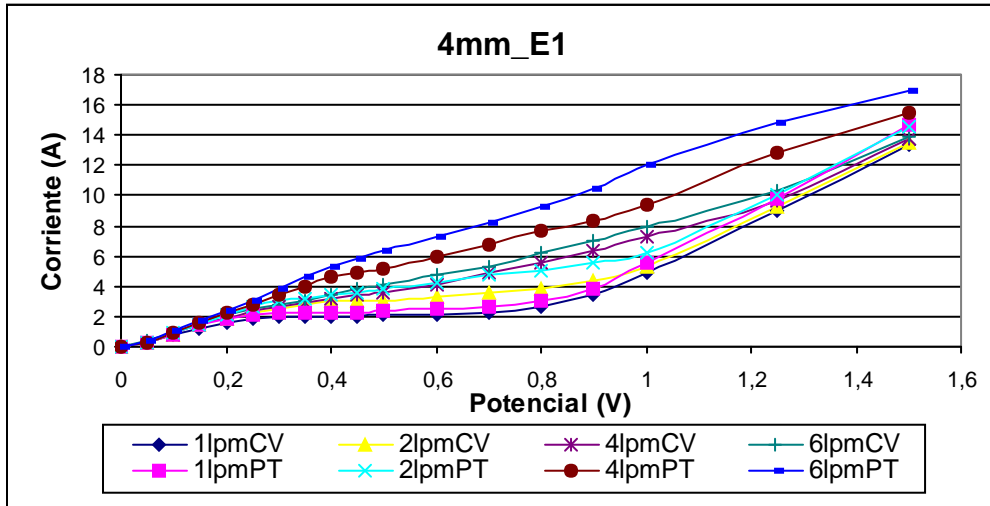
**Tabla XVIII.- CONDICIONES EXPERIMENTALES.**

<b>Gap (mm)</b>	<b>Flujos</b>	<b>Entradas</b>	<b>Condiciones</b>
4	1, 2, 4 y 6	4	Canal vacío y PT*
7	2, 4, 6 y 8	4	Canal vacío y PT*

\*PT = Promotor de turbulencia.

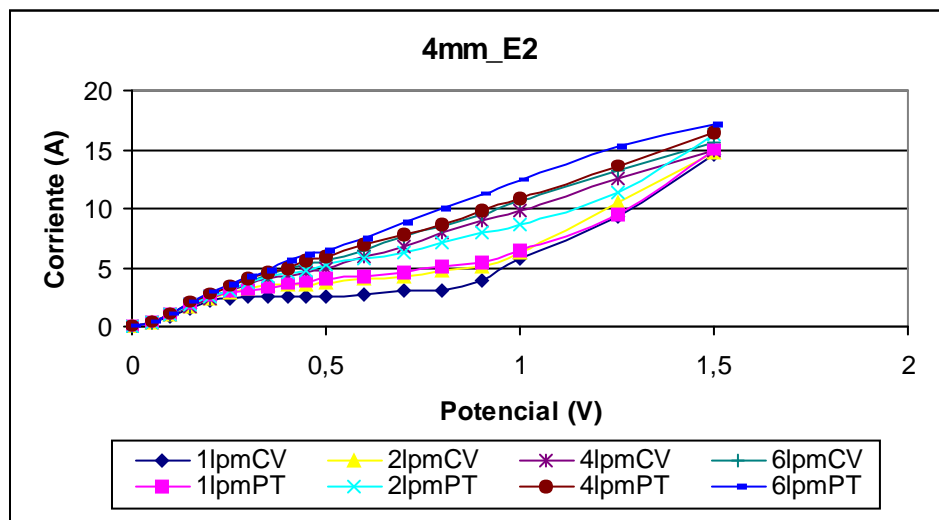
Se probaron 2 gaps en cada una de las 4 entradas, con cuatro flujos para canal vacío (CV) y con promotor de turbulencia (PT). Nótese que en este caso, los resultados son también similares para los pares de entradas 1-4 y 2-3, lo cual confirma lo que se ha estado observando tanto en las pruebas colorimétricas como en las de modelamiento de flujo.

En la gráfica 57 se presentan los resultados obtenidos al realizar el barrido de potencial para el gap de 4mm en la entrada 1. Nótese que al tener canal vacío se nota una meseta relativamente marcada, mientras que cuando está presente el promotor de turbulencia, la meseta tiende a desaparecer.



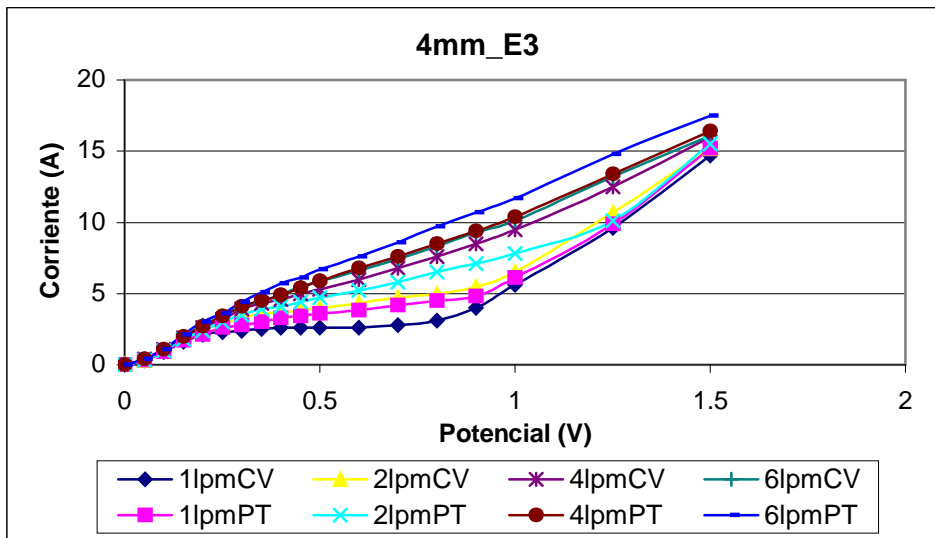
**Figura 57.-** Gráfica I\_E: gap: 4 mm, entrada 1, 4 flujos , canal vacío (CV) y con promotor de turbulencia (PT).

En la figura 58 son graficados los resultados del barrido de potencial de la entrada 2 al mismo gap de 4mm. En esta figura se observa que la meseta va desapareciendo conforme se incrementa el flujo, además de que ésta no es muy visible al tener en el interior del canal el promotor de turbulencia.



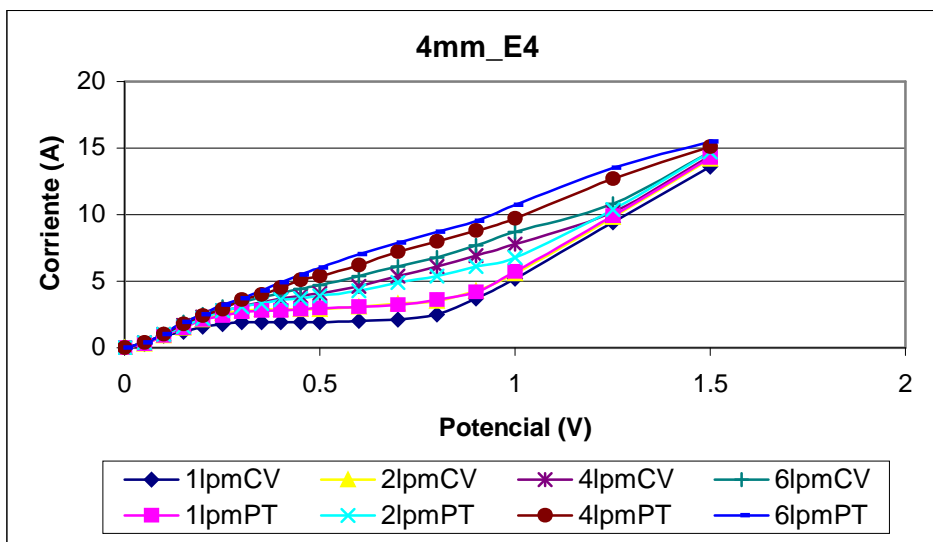
**Figura 58.-** Gráfica I\_E: gap: 4 mm, entrada 2, 4 flujos , CV y PT

La gráfica 59 muestra los resultados del barrido para la entrada 3 a un gap de 4 mm, obsérvese que la corriente límite, al igual que en las otras entradas, es siempre mayor conforme se incrementa la velocidad, y también es mayor la corriente al estar presente el promotor de turbulencia.



**Figura 59.-** Gráfica I\_E: gap: 4 mm, entrada 3, 4 flujos , CV y PT.

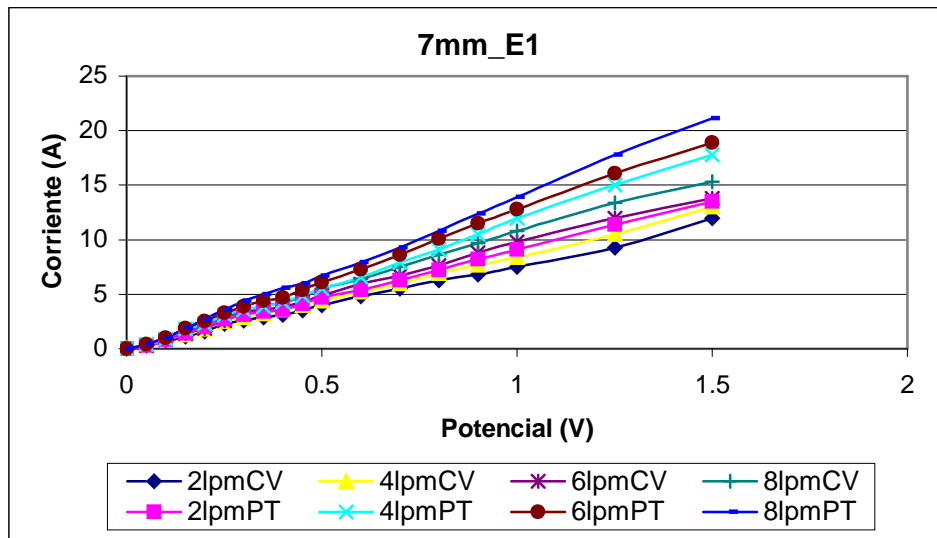
La figura 60 muestra los resultados del barrido de potencial a 4 mm de gap, pero ahora en la entrada 4. En todos los casos la corriente es mayor al estar presente el promotor de turbulencia..



**Figura 60.-**Gráfica I\_E: gap: 4 mm, entrada 4, 4 flujos , CV y PT.

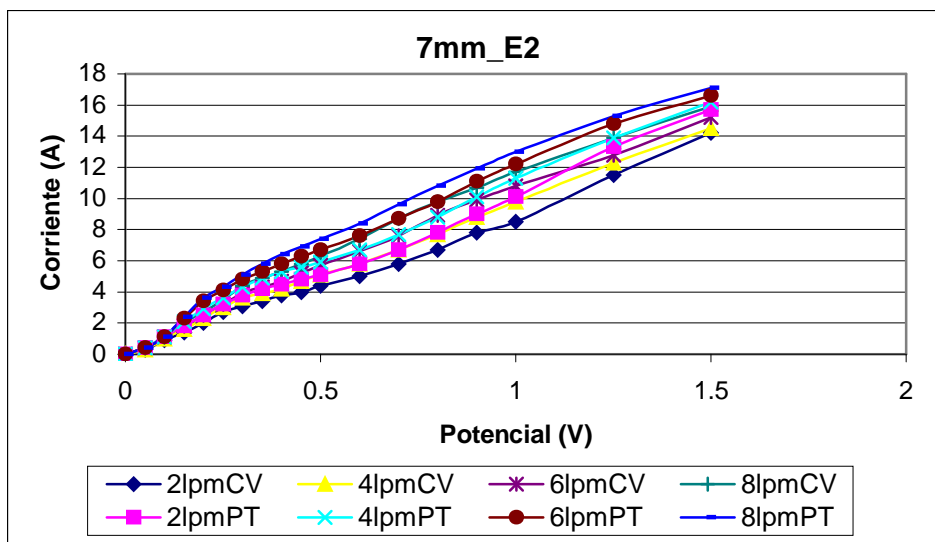


Las figuras 61-64 muestran los resultados de este barrido de potencial, para las 4 entradas, pero ahora se varia el gap existente entre los electrodos de cobre, ahora la distancia es de 7 mm. En la figura 61 se observa que la corriente aumenta al incrementar el flujo, además de que siempre es mayor cuando está presente el PT.



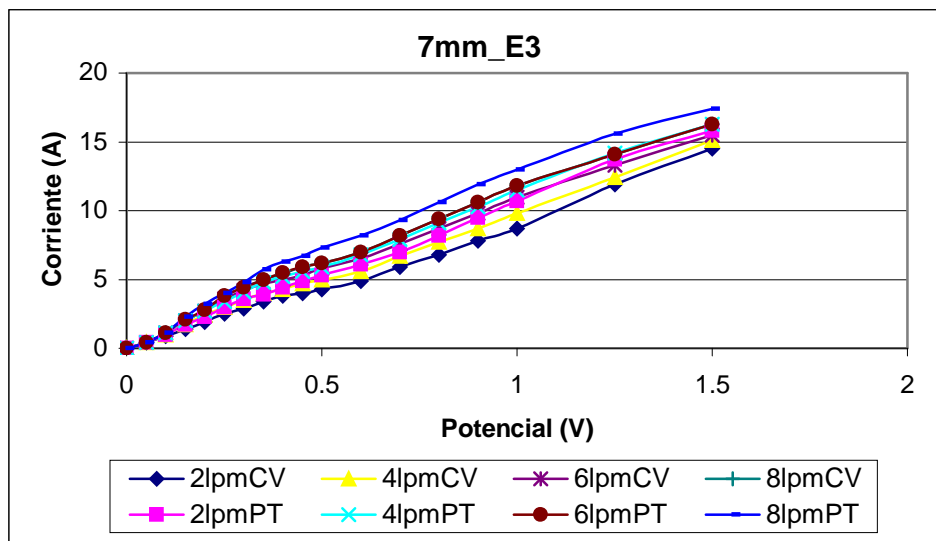
**Figura 61.-** Gráfica I\_E: gap: 7 mm, entrada 1, 4 flujos , CV y PT.

La figura 62 muestra los resultados del barrido de potencial a 7 mm de gap, pero ahora en la entrada 2. En este caso también se presentan los resultados esperados del incremento de la corriente al aumentar el flujo, y que la corriente sea mayor cuando está presente el promotor de turbulencia que cuando está en canal vacío.



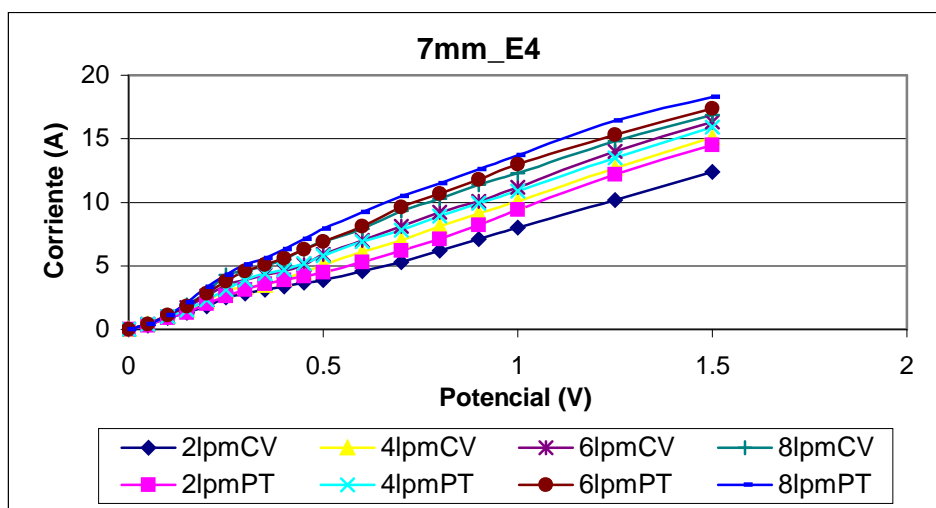
**Figura 62.-** Gráfica I\_E: gap: 7 mm, entrada 2, 4 flujos, CV y PT.

La figura 63 muestra los resultados del barrido de potencial hechos a un gap de 7 mm en la entrada 3. Este caso, al igual que todos los anteriores, presenta la tendencia a desaparecer la meseta conforme se incrementa el flujo, además de que al estar presente el promotor de turbulencia la corriente es siempre mayor que cuando se opera a canal vacío.



**Figura 63.-** Gráfica I\_E: gap: 7 mm, entrada 3, 4 flujos, CV y PT.

La figura 64 muestra gráficamente los resultados del barrido de potencial en la entrada 4 para un gap de 7 mm. Se observa que la meseta de la corriente límite se hace menos pronunciada conforme se incrementa el flujo.



**Figura 64.-** Gráfica I\_E: gap de 7 mm, entrada 4, 4 flujos, CV y PT.

La corriente límite obtenida de cada una de estas pruebas se muestra en la tabla XIX.

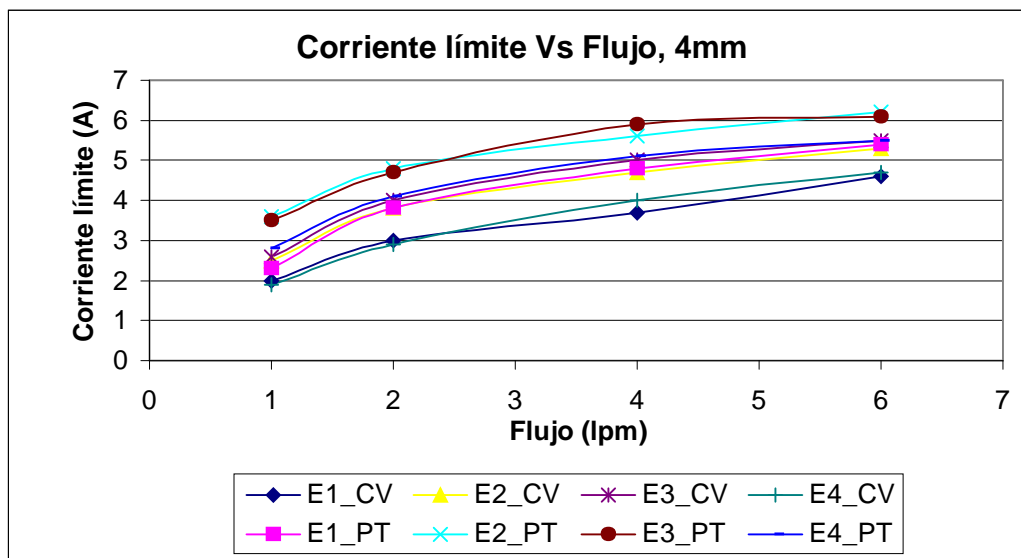
**Tabla XIX.- CORRIENTE LÍMITE DE CADA UNA DE ESTAS PRUEBAS.**

ASPECTO		CORRIENTE LÍMITE (A)							
GAP (mm)	FLUJO (lpm)	E1_CV	E1_PT	E2_CV	E2_PT	E3_CV	E3_PT	E4_CV	E4_PT
4	1	2	2.3	2.5	3.6	2.6	3.5	1.9	2.8
4	2	3	3.8	3.8	4.8	4	4.7	2.9	4.1
4	4	3.7	4.8	4.7	5.6	5	5.9	4	5.1
4	6	4.6	5.4	5.3	6.2	5.5	6.1	4.7	5.5
7	2	2.6	3.1	3.1	4.2	2.9	3.8	2.5	3.6
7	4	3.1	4	3.9	5.3	4.3	4.9	3.1	4.3
7	6	3.5	4.5	4.3	5.5	4.7	5.5	3.9	4.8
7	8	4.1	5	4.9	5.9	5.1	5.8	4.3	5.2

lpm = litros por minuto

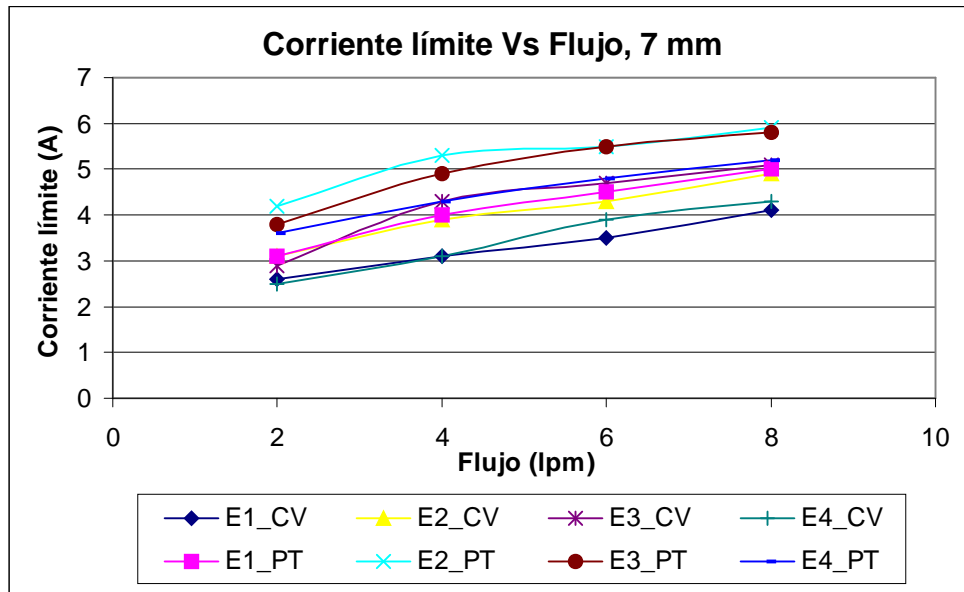
Los valores mostrados en la tabla XIX son las corrientes límite de cada prueba, estos son graficados y mostrados en las figuras 65 y 66.

La figura 65 muestra las corrientes límite de las pruebas a 4 mm de gap.



**Figura 65.- Corrientes límite de las pruebas a 4 mm de gap.**

La figura 66 muestra los resultados de las pruebas realizadas a 7 mm de gap.



**Figura 66.-** Corrientes límite de las pruebas a 7 mm.

En las figuras 65 y 66 se aprecia un incremento de la corriente límite al aumentar el flujo (véase también tabla XIX), lo cual es lógico y esperado, pues el aumento de la velocidad lineal en el interior del reactor trae como consecuencia una mayor turbulencia, y por ende, una mayor transferencia de masa.

Nótese en las figuras 65 y 66 que las entradas 1 y 4 tienen un comportamiento lineal de corriente límite conforme se incrementa el flujo, mientras que las entradas 2 y 3 tienden a un límite, debido a que en las entradas 1 y 4 se distribuye más uniformemente el flujo, por lo cual el incremento de transferencia de masa es más notable que en las entradas 2 y 3.

Las figuras 65 y 66 también ponen al descubierto que en todos los casos la corriente límite es mayor al usar la malla de polipropileno que funge como promotor de turbulencia, aunque este incremento no es constante respecto a canal vacío.

### 5.3.1.2.- COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.

Como ya se mencionó, una vez obtenida la corriente límite de cada prueba, se obtiene el *coeficiente de transferencia de masa*, el cual expresa la transferencia de

masa de la especie electroactiva en el reactor. El coeficiente de transferencia de masa se obtiene de acuerdo a la ecuación (4).

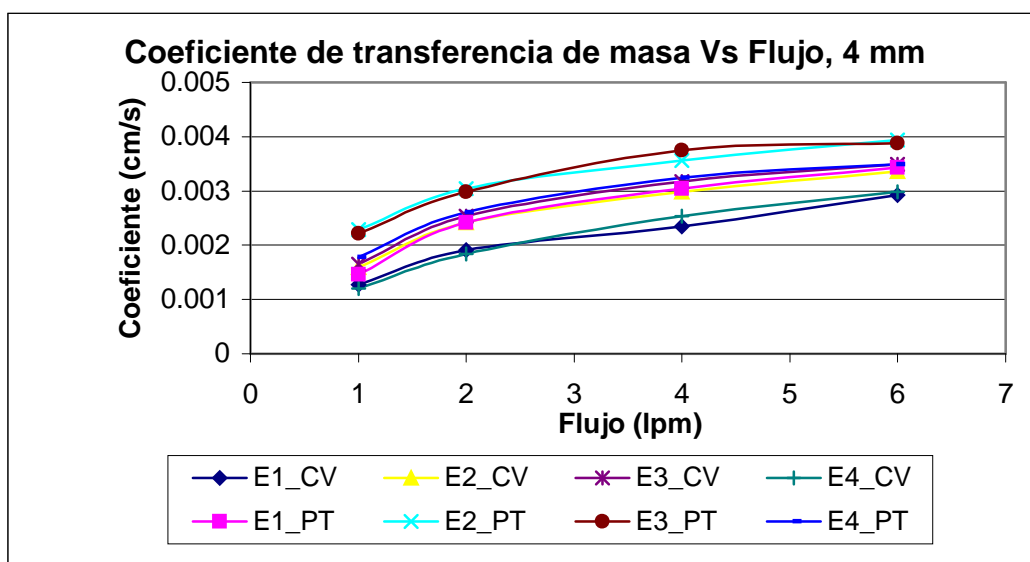
Los coeficientes de transferencia de masa de todas las pruebas se obtiene con la ecuación mencionada, estos son mostrados en la tabla XX.

**Tabla XX.- COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA.**

ASPECTO		10 <sup>3</sup> * COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA							
GAP (mm)	FLUJO (lpm)	E1_CV (cm/s)	E1_PT (cm/s)	E2_CV (cm/s)	E2_PT (cm/s)	E3_CV (cm/s)	E3_PT (cm/s)	E4_CV (cm/s)	E4_PT (cm/s)
4	1	1.2701	1.46063	1.5876	2.286196	1.65114	2.2227	1.2066	1.7782
4	2	1.9052	2.41321	2.4132	3.048262	2.54022	2.9848	1.8417	2.6037
4	4	2.3497	3.04826	2.9848	3.556306	3.17527	3.7468	2.5402	3.2388
4	6	2.9213	3.42929	3.3658	3.937338	3.4928	3.8738	2.9848	3.4928
7	2	1.6511	1.96867	1.9687	2.667229	1.84166	2.4132	1.5876	2.2862
7	4	1.9687	2.54022	2.4767	3.365789	2.73073	3.1118	1.9687	2.7307
7	6	2.2227	2.85775	2.7307	3.4928	2.98476	3.4928	2.4767	3.0483
7	8	2.6037	3.17527	3.1118	3.746822	3.23878	3.6833	2.7307	3.3023

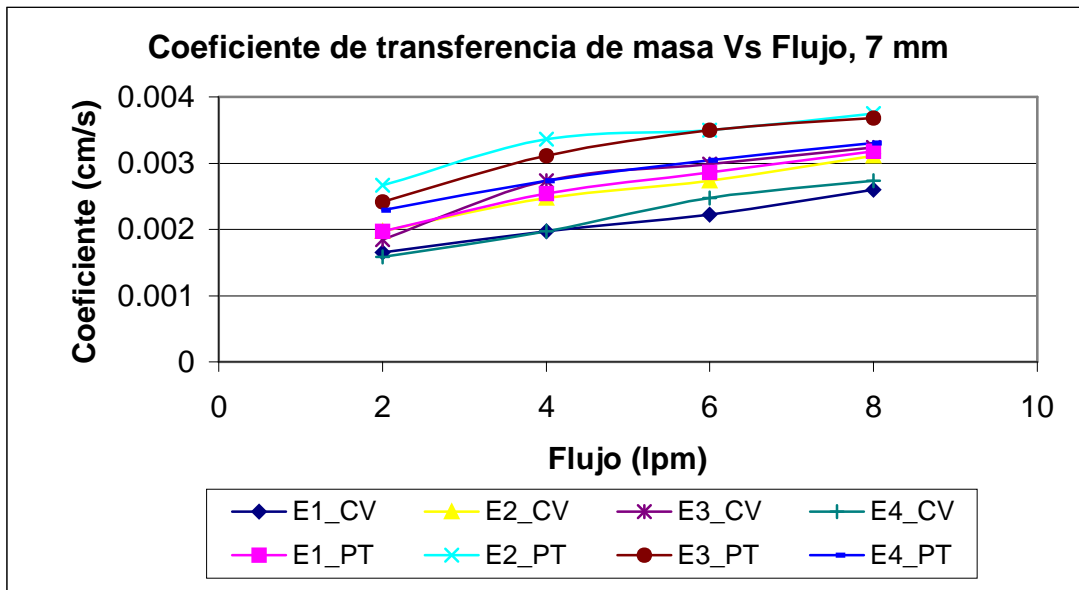
Los coeficientes de transferencia de masa mostrados en la tabla XX son graficados en las figuras 67 y 68.

La figura 67 muestra los coeficientes de transferencia de masa con respecto al flujo cuando el gap es de 4 mm.



**Figura 67.-** Comportamiento del coeficiente de transferencia de masa con respecto al flujo a un gap de 4 mm.

La figura 68 muestra el comportamiento del coeficiente de transferencia de masa con respecto al flujo para un gap de 7 mm.



**Figura 68.-** Comportamiento del coeficiente de transferencia de masa con respecto al flujo, con un gap de 7 mm.

En las figuras 67 y 68 se aprecia el aumento del valor del coeficiente de transferencia de masa al aumentar el flujo, y también se observa que este coeficiente siempre tiene un valor mayor cuando se emplea la malla de polipropileno como promotor de turbulencia.

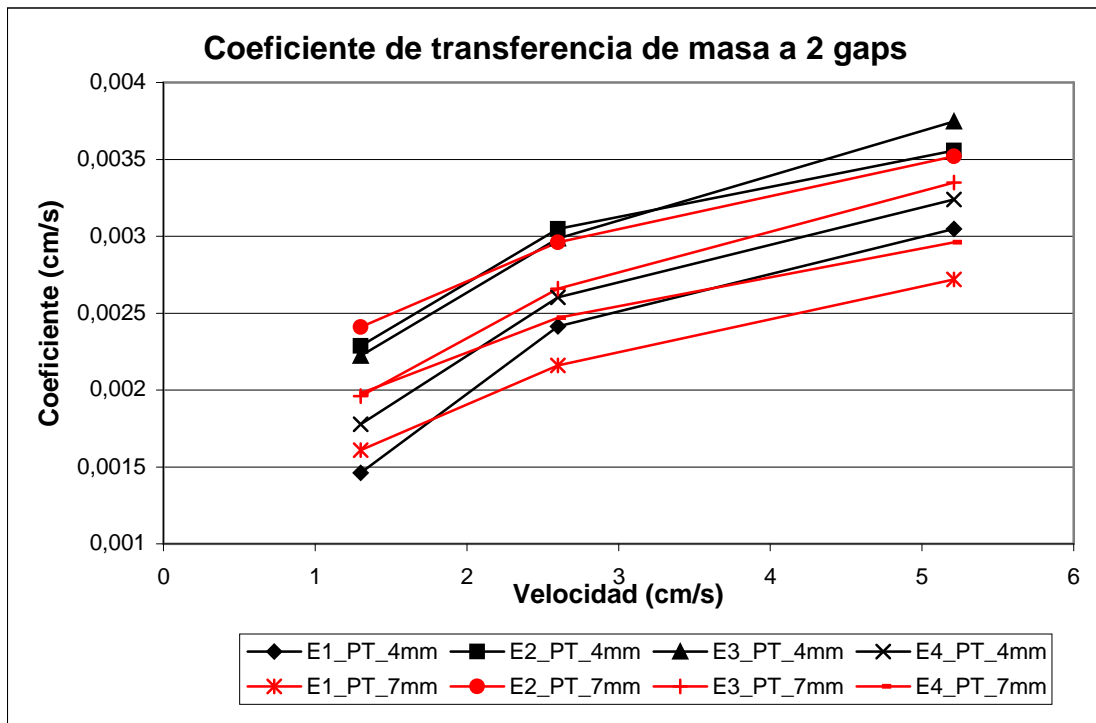
#### 5.3.1.2.1.- INFLUENCIA DEL GAP SOBRE EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.

Para hacer esta comparación es necesario obtener los datos extrapolados cuando las velocidades a 7 mm de gap son iguales a las velocidades del gap de 4 mm. Estos valores son mostrados en la tabla XXI.

**Tabla XXI.- COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA PARA 4 Y 7 mm DE GAP CUANDO LAS VELOCIDADES SON IGUALES.**

<b>10<sup>3</sup> * COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA (cm/s) A 4 Y 7 mm DE GAP</b>								
<b>Velocidad (cm/s)</b>	<b>4mm</b>				<b>7mm</b>			
	<b>E1_PT</b>	<b>E2_PT</b>	<b>E3_PT</b>	<b>E4_PT</b>	<b>E1_PT</b>	<b>E2_PT</b>	<b>E3_PT</b>	<b>E4_PT</b>
<b>1.3</b>	1.46	2.28	2.22	1.78	1.61	2.41	1.96	1.98
<b>2.6</b>	2.41	3.05	2.98	2.6	2.16	2.96	2.66	2.47
<b>5.21</b>	3.05	3.55	3.75	3.24	2.72	3.52	3.35	2.96

Los valores mostrados en la tabla XXV se exponen gráficamente en la figura 69.



**Figura 69.- Coeficiente de transferencia de masa para los 2 gaps.**

En la figura 69 se observan valores muy cercanos, aunque ligeramente mayores para el gap de 4mm; es decir, cuando el gap es de 4mm, la transferencia de masa es mayor que cuando el gap es de 7 mm. Este comportamiento se presenta también cuando el canal está vacío.

### 5.3.1.3.- FACTOR DE AUMENTO DE TRANSFERENCIA DE MATERIA.

Para estimar el aumento de transferencia de masa cuando se emplea promotor de turbulencia, se usa el *factor de aumento de transferencia de masa* ( $\gamma$ ), el cual se define por la siguiente ecuación:

$$\chi = K_m (PT) / K_m (CV) \quad (9)$$

En donde:

- $\gamma$  = Factor de aumento de transferencia de masa,
- $K_m (PT)$  = Coeficiente de trans. de masa con promotor de turbulencia y
- $K_m (CV)$  = Coeficiente de trans. de masa sin promotor de turbulencia.

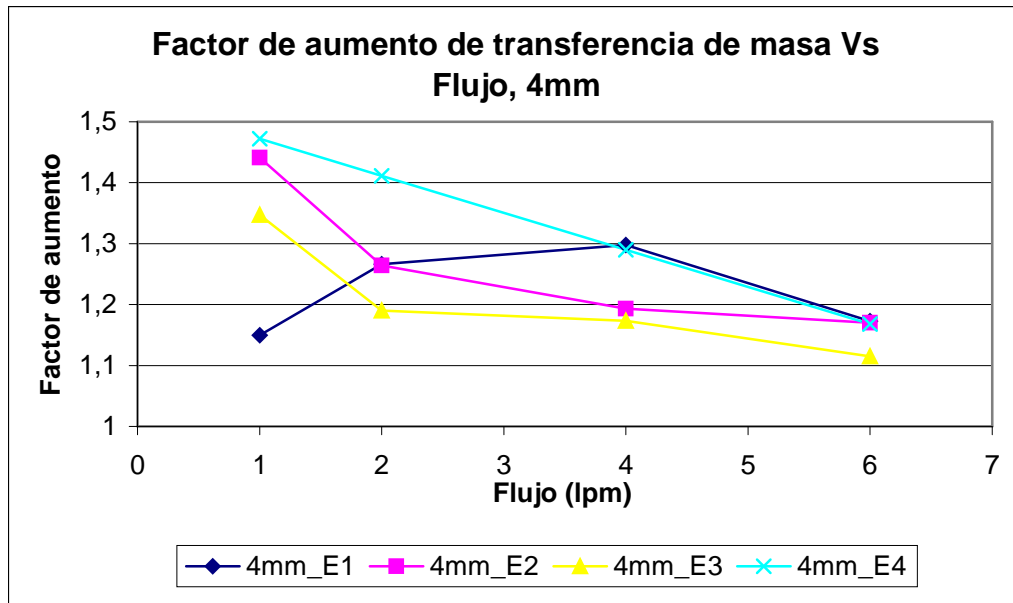
Este factor de aumento de transferencia de masa en cada caso es mostrado en la tabla XXII.

**Tabla XXII.- FACTOR DE AUMENTO DE TRANSFERENCIA DE MASA.**

ASPECTO		FACTOR DE AUMENTO			
GAP (mm)	FLUJO (lpm)	E1	E2	E3	E4
4	1	1.15	1.44	1.35	1.47
4	2	1.27	1.26	1.19	1.41
4	4	1.30	1.19	1.17	1.29
4	6	1.17	1.17	1.12	1.17
7	2	1.19	1.36	1.31	1.44
7	4	1.30	1.36	1.15	1.39
7	6	1.28	1.28	1.17	1.23
7	8	1.22	1.19	1.14	1.21

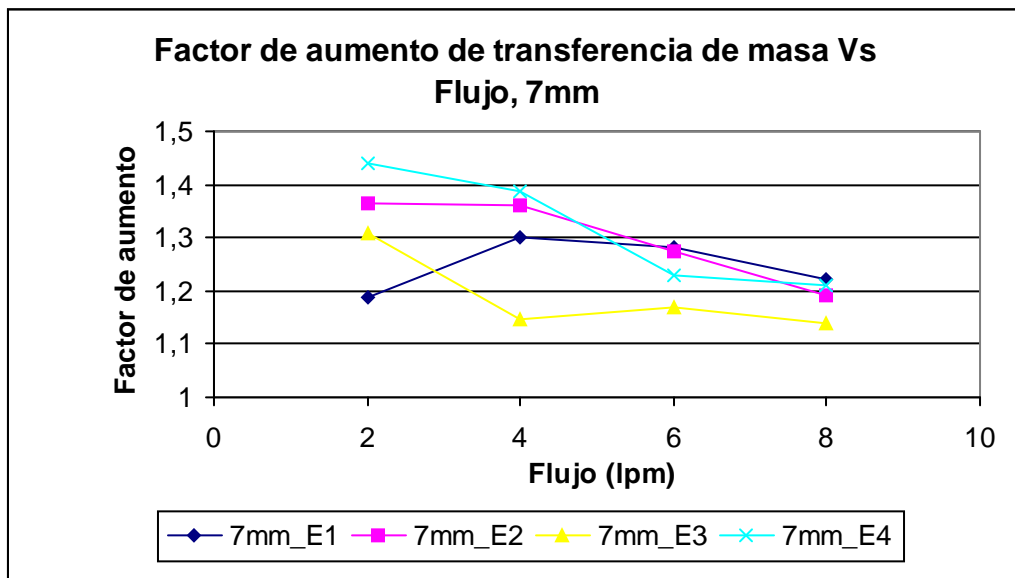
Este factor de aumento de transferencia de masa es graficado en las figuras 70 y 71. La figura 70 muestra el aumento de transferencia de masa para las pruebas hechas a 4mm de gap.





**Figura 70.-** Factor de aumento de transferencia de masa con relación al flujo a un gap de 4mm.

La figura 71 muestra el comportamiento del factor de aumento de transferencia de masa con relación al flujo, a 7 mm de gap.



**Figura 71.-** Comportamiento del factor de aumento de transferencia de masa respecto al flujo en 7 mm de gap.

En las figuras 70 y 71 se aprecia que el factor de aumento de transferencia de masa tiene generalmente una tendencia a disminuir conforme aumenta la velocidad de flujo.

#### 5.3.1.4.- ECUACIÓN QUE DESCRIBE EL COMPORTAMIENTO DE LA TRANSFERENCIA DE MASA.

Como ya se ha mencionado, la forma más común de expresar la transferencia de masa es por medio de los números adimensionales, que en este caso son Reynolds, Sherwood y Schmidt. La forma de expresar la transferencia de masa es colocando Sherwood en función de Reynolds y Schmidt de la forma mostrada en la ecuación (8). Se ha demostrado que el valor del exponente c es 0.33, por lo que al conocer los valores de Sherwood y Reynolds, se puede conocer por aproximación lineal los valores de las constantes a y b.

Los valores de los números de Reynolds empleados en estas pruebas son mostrados en la tabla XXIII, al igual que los valores del número de Sherwood obtenido en estas pruebas.

El valor del número de Schmidt se obtiene de acuerdo a la ecuación (7).

El número de Schmidt de la disolución empleada en estas pruebas [30] de transferencia de masa es:

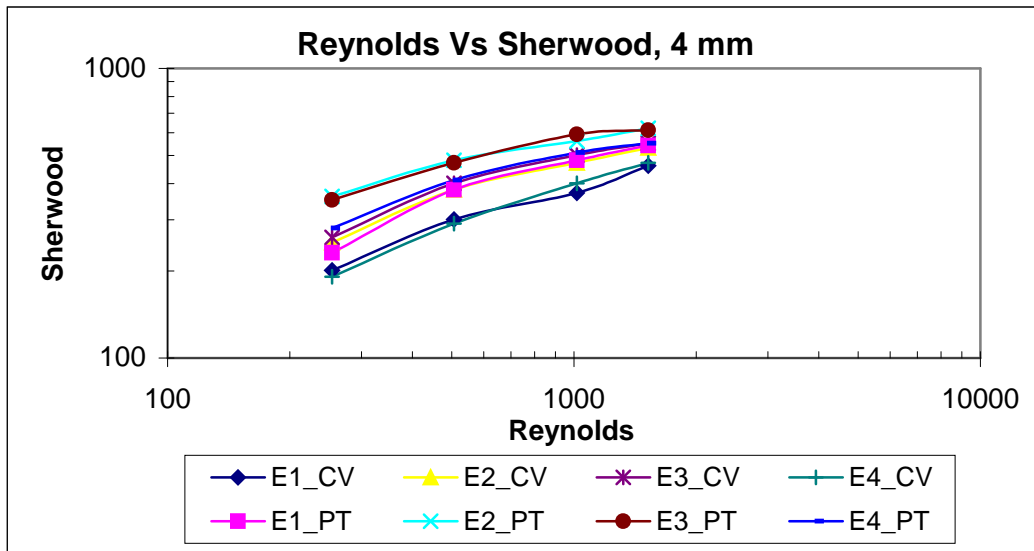
$$Sc = \mu / D = 0.01085766 \text{ cm}^2/\text{s} / 5\text{E-}6 \text{ cm}^2/\text{s} ;$$

$$Sc = 2172$$

**Tabla XXIII.- NUMERO DE SHERWOOD EN RELACION AL NUMERO DE REYNOLDS.**

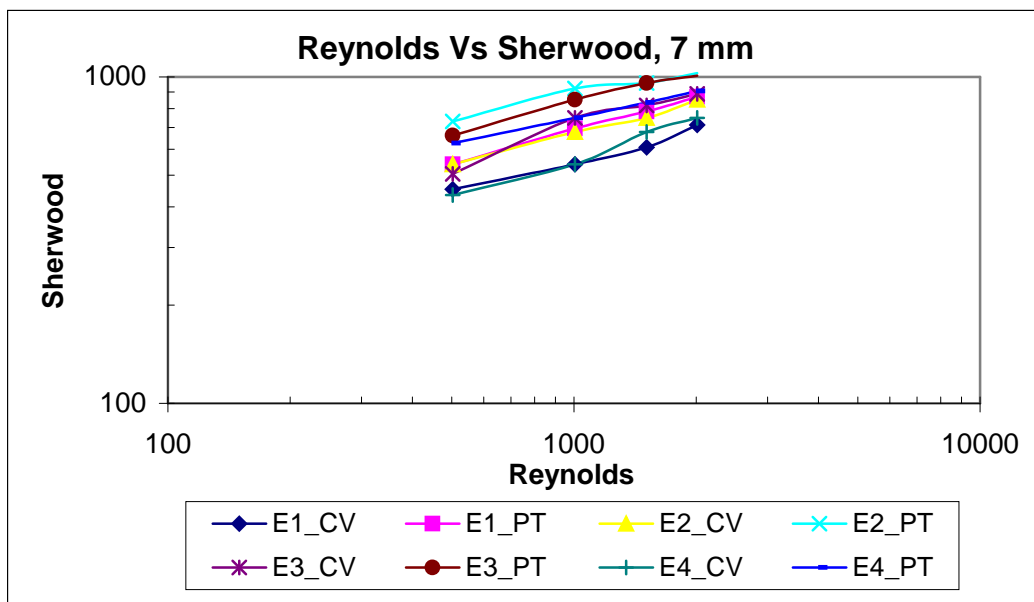
ASPECTO			NUMERO DE SHERWOOD							
GAP (mm)	FLUJO (lpm)	REYNOLDS	E1_CV	E1_PT	E2_CV	E2_PT	E3_CV	E3_PT	E4_CV	E4_PT
4	1	254	200.68	230.78	250.85	361.22	260.88	351.19	190.64	280.95
4	2	507	301.02	381.29	381.29	481.63	401.35	471.60	290.98	411.39
4	4	1016	371.25	481.63	471.59	561.89	501.69	591.99	401.35	511.73
4	6	1524	461.56	541.83	531.79	622.10	551.86	612.07	471.59	551.86
7	2	503	452.41	539.42	539.42	730.82	504.61	661.22	435.01	626.42
7	4	1006	539.42	696.02	678.62	922.23	748.22	852.62	539.42	748.22
7	6	1509	609.02	783.02	748.22	957.03	817.82	957.03	678.62	835.22
7	8	2012	713.42	870.02	852.62	1026.63	887.43	1009.23	748.22	904.83

Los valores mostrados en la tabla XXIII son mostrados gráficamente en las figuras 72 y 73. La figura 72 muestra los resultados a 4 mm de gap.



**Figura 72.-** Relación entre Reynolds y Sherwood a 4 mm de gap.

La figura 73 señala el comportamiento del número de Sherwood en función del número de Reynolds a 7 mm de gap.



**Figura 73.-** Relación entre Reynolds y Sherwood a 7 mm de gap.

En las figuras 72 y 73 se aprecia un aumento del número de Sherwood conforme se aumenta el Reynolds; el número de Schmidt se supone invariable en esta serie de experimentos, pues las características de la disolución se mantienen prácticamente invariables.

En todos los casos se observa un aumento del número de Sherwood conforme Reynolds se incrementa, lo cual es lógico y esperado, porque el aumento de Reynolds incrementa la transferencia de materia al hacer más delgada la capa de difusión.

A continuación, en la tabla XXIV, se presentan las ecuaciones que representan la transferencia de masa en cada situación hidrodinámica.

**Tabla XXIV.- ECUACIONES QUE REPRESENTAN LA TRANSFERENCIA DE MASA.**

<b>GAP (mm)</b>	<b>SITUACIÓN</b>	
<b>4</b>	<b>E1_CV</b>	<b>E1_PT</b>
	$Sh=1.382Re^{0.4458} Sc^{1/3}$	$Sh=1.4347Re^{0.4677} Sc^{1/3}$
<b>4</b>	<b>E2_CV</b>	<b>E2_PT</b>
	$Sh=2.0901Re^{0.4115} Sc^{1/3}$	$Sh=5.5689 Re^{0.2966} Sc^{1/3}$
<b>4</b>	<b>E3_CV</b>	<b>E3_PT</b>
	$Sh=2.1587Re^{0.4139} Sc^{1/3}$	$Sh=4.8028 Re^{0.3189} Sc^{1/3}$
<b>4</b>	<b>E4_CV</b>	<b>E4_PT</b>
	$Sh=0.9291Re^{0.5044} Sc^{1/3}$	$Sh=2.8397 Re^{0.3763} Sc^{1/3}$
<b>7</b>	<b>E1_CV</b>	<b>E1_PT</b>
	$Sh=4.8167 Re^{0.3155} Sc^{1/3}$	$Sh=4.9993 Re^{0.3416} Sc^{1/3}$
<b>7</b>	<b>E2_CV</b>	<b>E2_PT</b>
	$Sh=5.6791 Re^{0.3202} Sc^{1/3}$	$Sh=12.9903 Re^{0.2394} Sc^{1/3}$
<b>7</b>	<b>E3_CV</b>	<b>E3_PT</b>
	$Sh=3.2210 Re^{0.4067} Sc^{1/3}$	$Sh=7.4992 Re^{0.3107} Sc^{1/3}$
<b>7</b>	<b>E4_CV</b>	<b>E4_PT</b>
	$Sh=2.7303 Re^{0.4006} Sc^{1/3}$	$Sh=9.2971 Re^{0.2648} Sc^{1/3}$

Nótese que en casi todos los casos se tiene un exponente del número de Reynolds inferior a 0.5, lo cual indica que efectivamente se tiene un régimen de flujo laminar, además, en las gráficas Reynolds contra Sherwood no se observa cambio de pendiente, por lo cual se asume que existe 1 régimen únicamente.

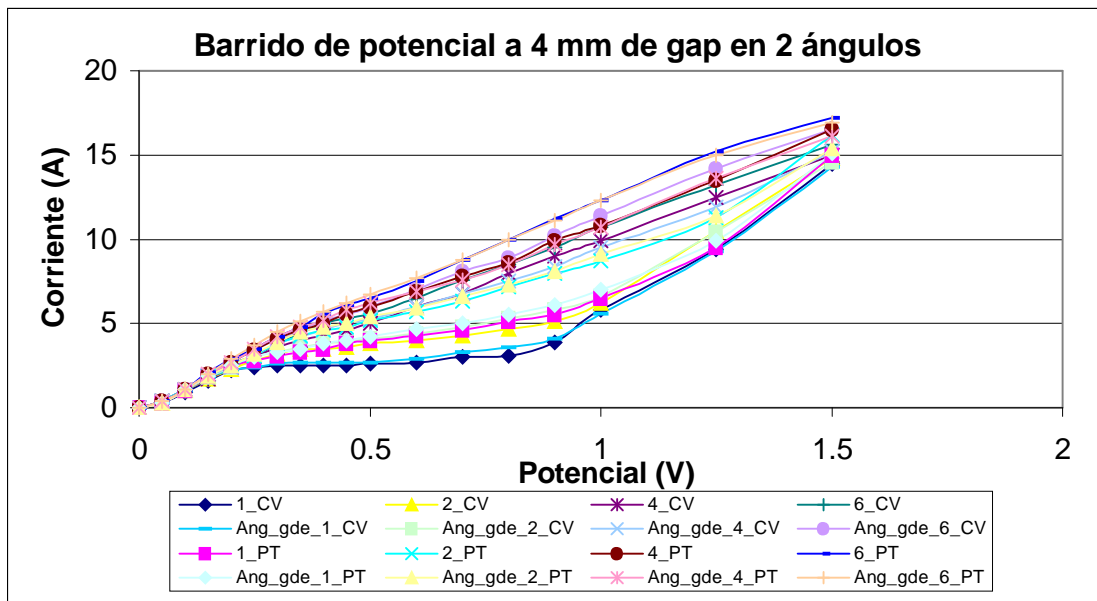
### 5.3.2.- INFLUENCIA DEL ÁNGULO ENTRADA SOBRE LA TRANSFERENCIA DE MASA.

Para estudiar este efecto sobre la transferencia de masa, se hace variar el ángulo, colocando el ángulo grande en lugar del ángulo mediano.

#### 5.3.2.1.- DETERMINACIÓN DE CORRIENTE LÍMITE.

A continuación se presentan las gráficas de la entrada 2 para los dos ángulos empleados.

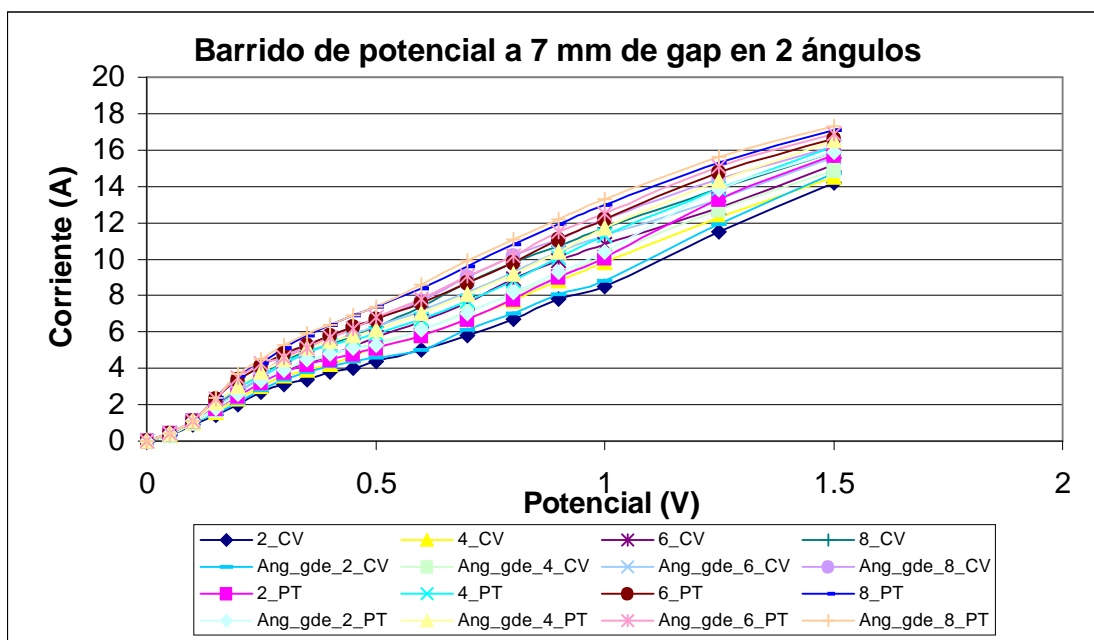
La figura 74 muestra lo referente al barrido de potencial a un gap de 4 mm. En esta figura se observa que la corriente es siempre mayor al estar presente el promotor de turbulencia que cuando se tiene el canal vacío, lo cual ya había sido observado en toda la serie de experimentos. También se observa que la meseta se hace menos pronunciada al aumentar el flujo.



**Figura 74.-** Barrido de potencial para la entrada 2 a 4 mm de gap en los dos ángulos.

En la figura 75 se muestra este mismo barrido de potencial pero a 7 mm de gap. En esta figura se observa una curva con valores más altos para la condición de promotor

de turbulencia en el interior del reactor, además se observa que la meseta se hace menos pronunciada conforme se incrementa el flujo.



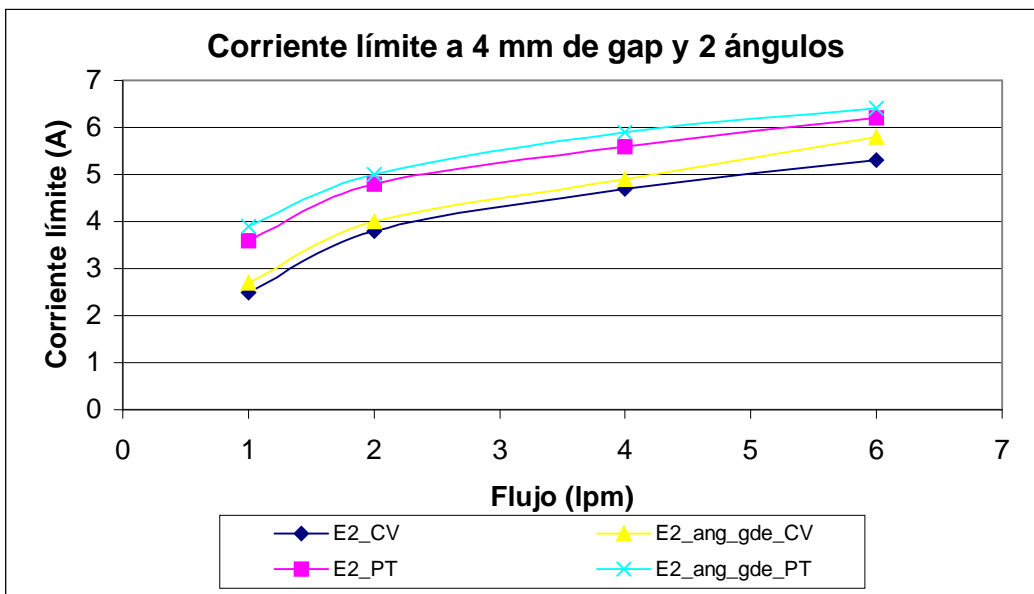
**Figura 75.-** Barrido de potencial para la entrada 2 en 7 mm de gap en los dos ángulos.

La corriente límite obtenida en cada caso se muestra en la tabla XXV.

**Tabla XXV.-** CORRIENTE LÍMITE PARA LA ENTRADA 2 CON LOS DOS ÁNGULOS.

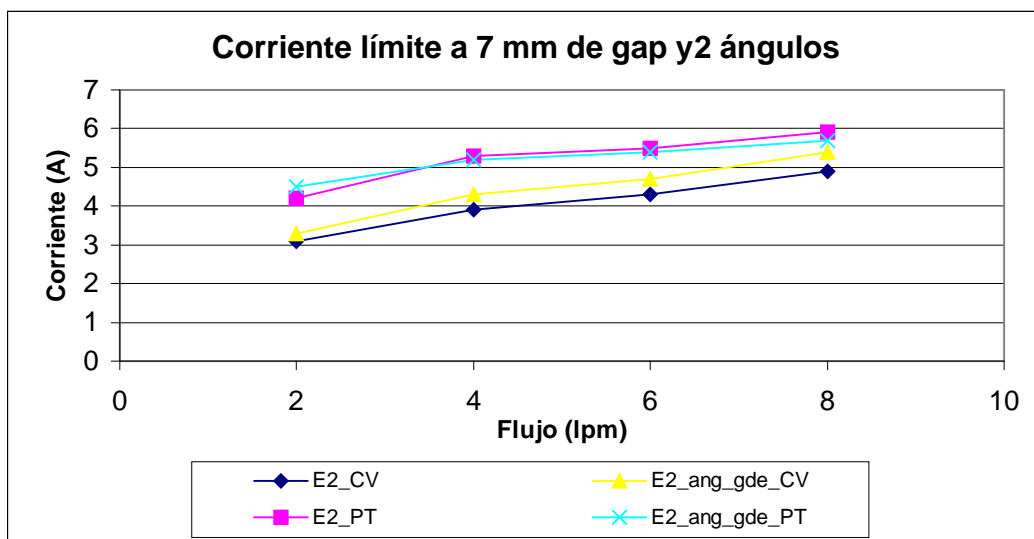
ASPECTO		CORRIENTE LIMITE (A)			
GAP (mm)	FLUJO (lpm)	E2_CV	E2_PT	E2_ang_gde_CV	E2_ang_gde_PT
4	1	2.5	3.6	2.7	3.9
4	2	3.8	4.8	4	5
4	4	4.7	5.6	4.9	5.9
4	6	5.3	6.2	5.8	6.4
7	2	3.1	4.2	3.3	4.5
7	4	3.9	5.3	4.3	5.2
7	6	4.3	5.5	4.7	5.4
7	8	4.9	5.9	5.4	5.7

Los resultados mostrados en la tabla XXV son graficados y expuestos en las figuras 76 y 77. Nótese que ambas se presenta la tendencia de incrementar la corriente límite conforme se aumenta el flujo, lo cual es esperado y además coincide con los resultados obtenidos anteriormente. La figura 76 muestra los resultados cuando se emplean 4 mm de gap.



**Figura 76.-** Corrientes límite: 4 mm de gap, 2 ángulos, entrada 2.

La figura 77 muestra los resultados de la corriente límite cuando se emplean 7 mm de gap a diferentes flujos.



**Figura 77.-** Corrientes límite: 7 mm de gap, 2 ángulos, entrada 2.

Las figuras 76 y 77 ponen al descubierto que la corriente límite es siempre mayor cuando se coloca el promotor de turbulencia que cuando este está ausente, lo cual ya se había observado en los experimentos realizados anteriormente. Algo también importante que se observa en las figuras 80 y 81, es que la corriente límite es mayor para el ángulo grande (véase también la tabla XXV), lo cual puede deberse a que al usar este ángulo se cubra una pequeña pero aparentemente significativa área del reactor que no se cubre al emplear el otro ángulo. La diferencia de valores entre los 2 ángulos se hace, en general, más significativa cuando se tienen flujos más altos.

### 5.3.2.2.- COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.

Este es obtenido de la forma descrita en la sección 5.3.1.2, considerando obviamente los valores mostrados en la tabla XXV. Este valor es mostrado en la tabla XXVI.

**Tabla XXVI.- COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA  
AL EMPLEAR LOS 2 ÁNGULOS EN LA ENTRADA 2.**

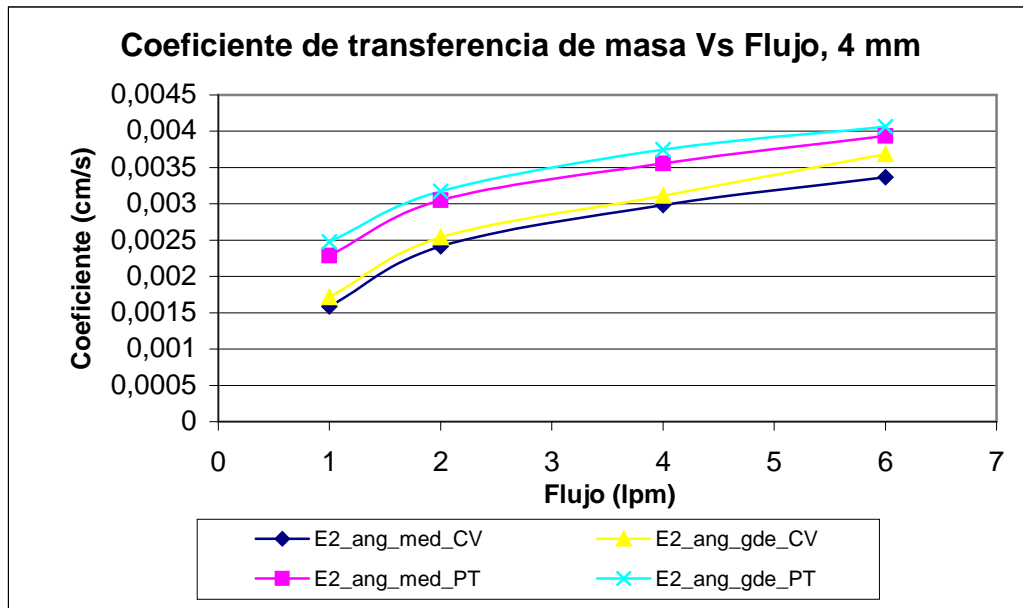
ASPECTO		10 <sup>3</sup> * COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA [cm/s]			
GAP (mm)	FLUJO (lpm)	E2_CV	E2_PT	E2_ang_gde_CV	E2_ang_gde_PT
4	1	1.588	2.286	1.715	2.477
4	2	2.413	3.048	2.540	3.175
4	4	2.985	3.556	3.112	3.747
4	6	3.366	3.937	3.683	4.064
7	2	1.97	2.67	2.096	2.858
7	4	2.48	3.37	2.731	3.302
7	6	2.73	3.49	2.985	3.429
7	8	3.11	3.75	3.429	3.62

Los coeficientes de transferencia de masa mostrados en la tabla XXVI son graficados y mostrados en las figuras 78 y 79.

Las figuras 78 y 79 muestran que, como era esperado, los coeficientes de transferencia de masa son siempre mayores cuando se tiene presente el promotor de turbulencia, además de que este coeficiente generalmente es un poco mayor para el ángulo más grande; esto es consecuencia de la corriente límite.

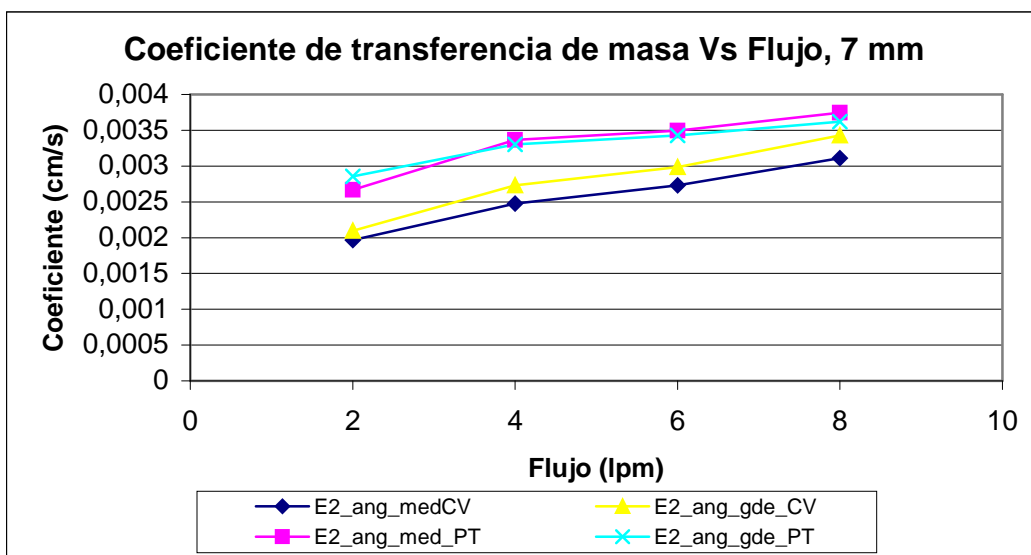


La figura 78 muestra los coeficientes de transferencia de masa con respecto al flujo al tener un gap interelectrodo de 4 mm.



**Figura 78.-** Comportamiento del coeficiente de transferencia de masa con respecto al flujo a un gap de 4 mm.

La figura 79 muestra el comportamiento del coeficiente de transferencia de masa con respecto al flujo al hacer variar el ángulo de entrada a 7 mm de gap.



**Figura 79.-** Comportamiento del coeficiente de transferencia de masa con respecto al flujo a un gap de 7 mm.

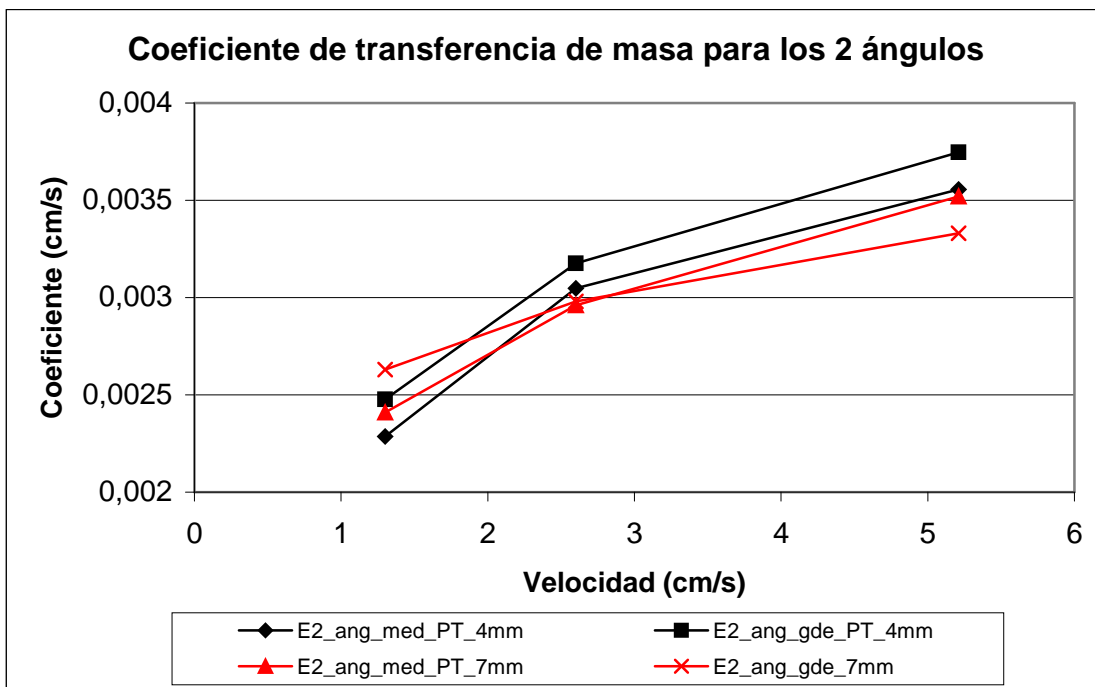
5.3.2.2.1.- INFLUENCIA DEL GAP SOBRE EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.

Es necesario conocer la influencia del gap al emplear 2 ángulos de entrada; para ello, son extrapolados los resultados del gap de 7 mm y comparados con el gap de 4 mm. Los resultados de 4 y 7 mm son mostrados en la tabla XXVII.

**Tabla XXVII.- COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA PARA LOS 2 ÁNGULOS EMPLEADOS A LA MISMA VELOCIDAD.**

10 <sup>3</sup> * COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA PARA LOS 2 ÁNGULOS (cm/s)				
Velocidad (cm/s)	4 mm		7 mm	
	E2_PT	E2_ang_gde_PT	E2_PT	E2_ang_gde_PT
1.3	2.29	2.48	2.41	2.63
2.6	3.05	3.18	2.96	2.98
5.21	3.56	3.75	3.52	3.33

Los valores mostrados en la tabla XXVII son graficados y mostrados en la figura 80.



**Figura 80.- Coeficiente de transferencia de masa para los 2 ángulos empleados.**

En la figura 80 se muestra que el coeficiente de transferencia de masa es ligeramente mayor para el ángulo grande, y también es ligeramente mayor para el gap de 4 mm, lo cual ya había sido observado en las pruebas anteriores.

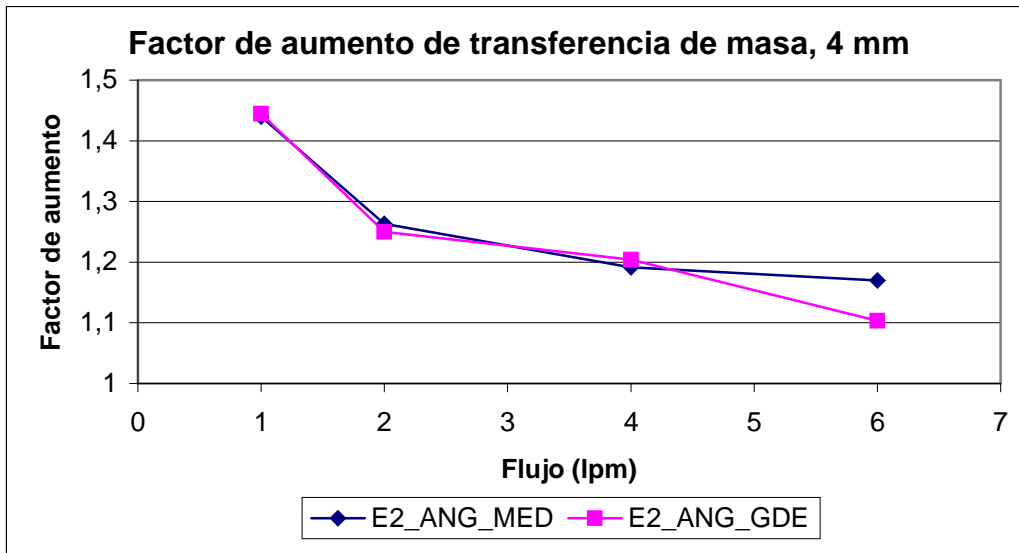
### 5.3.2.3.- FACTOR DE AUMENTO DE TRANSFERENCIA DE MASA.

La forma de obtener el coeficiente de transferencia de masa es explicada en la sección 5.3.1.3. A continuación, en la tabla XXVIII, se muestran los valores de este factor de aumento (ecuación 9) para la entrada 2 al hacer variar el ángulo de entrada.

**Tabla XXVIII.- FACTOR DE AUMENTO DE TRANSFERENCIA DE MASA.**

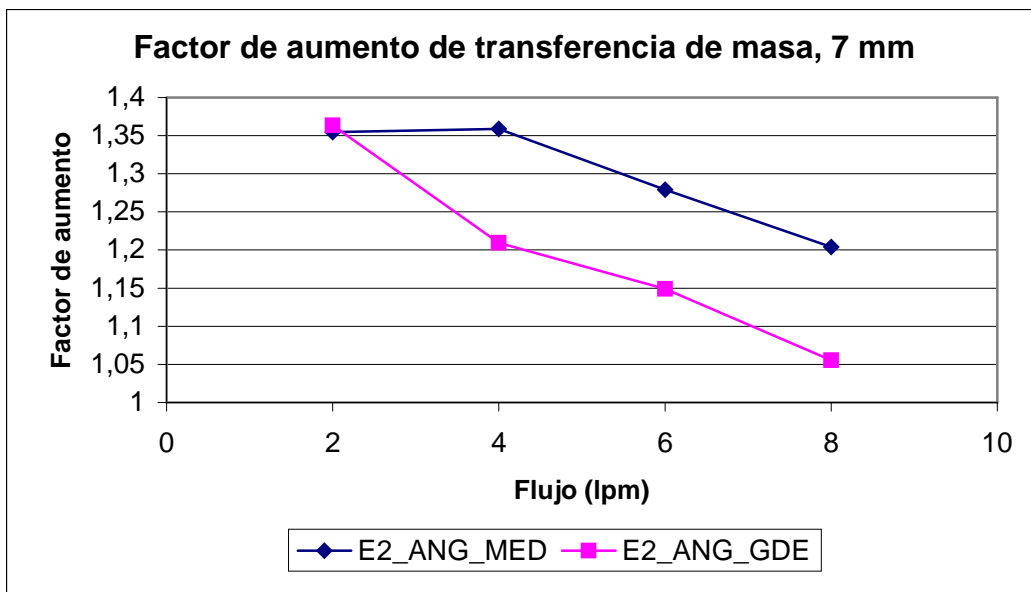
ASPECTO		FACTOR DE AUMENTO	
GAP (mm)	FLUJO (lpm)	E2_ANG_MED	E2_ANG_GDE
4	1	1.44	1.44
4	2	1.26	1.25
4	4	1.19	1.20
4	6	1.17	1.10
7	2	1.35	1.36
7	4	1.36	1.21
7	6	1.28	1.15
7	8	1.20	1.06

El comportamiento del factor de aumento de transferencia de masa con respecto al flujo cuando el gap interelectrodo es de 4 mm, se muestra en la figura 81.



**Figura 81.-** Comportamiento del factor de aumento de transferencia de masa con respecto al flujo al variar el ángulo de entrada, 4 mm de gap.

El comportamiento del factor de aumento de transferencia de masa al variar el ángulo de entrada, teniendo un gap interelectrodo de 7 mm se muestra en la figura 82.



**Figura 82.-** Comportamiento del factor de aumento de transferencia de masa con respecto al flujo al variar el ángulo de entrada, 7 mm de gap.

En la figura 81 se observa que el comportamiento del factor de aumento a 4 mm de gap es el mismo para los 2 ángulos de entrada empleados, además de que los valores obtenidos son muy parecidos. Por su parte, cuando el gap es de 7 mm (figura 82), el factor de aumento es menor para el ángulo grande.

#### 5.3.2.4.- ECUACIÓN QUE DESCRIBE EL COMPORTAMIENTO DE LA TRANSFERENCIA DE MASA.

Tal como se menciona en la sección 5.3.1.4, la forma más común de expresar la transferencia de masa es en función de números adimensionales. La forma de la ecuación es:

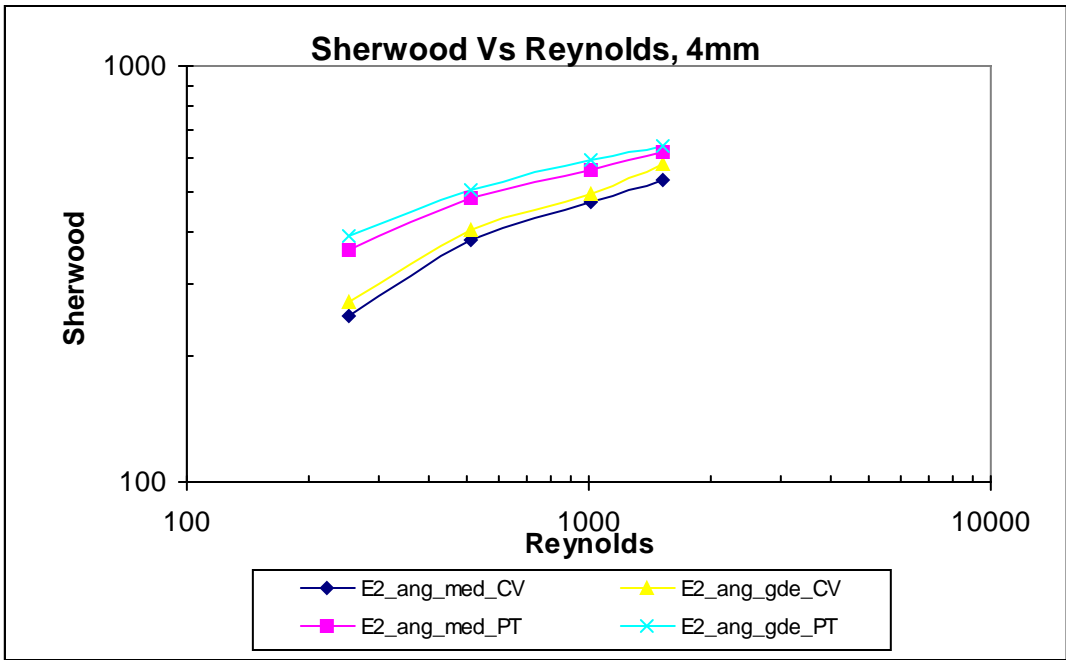
$$Sh = aRe^bSc^c$$

El valor del número de Schmidt se mantiene constante, mientras que el valor del número de Sherwood varía con la velocidad; la relación existente entre Reynolds y Sherwood cuando se varía el gap se muestra en la tabla XXIX.

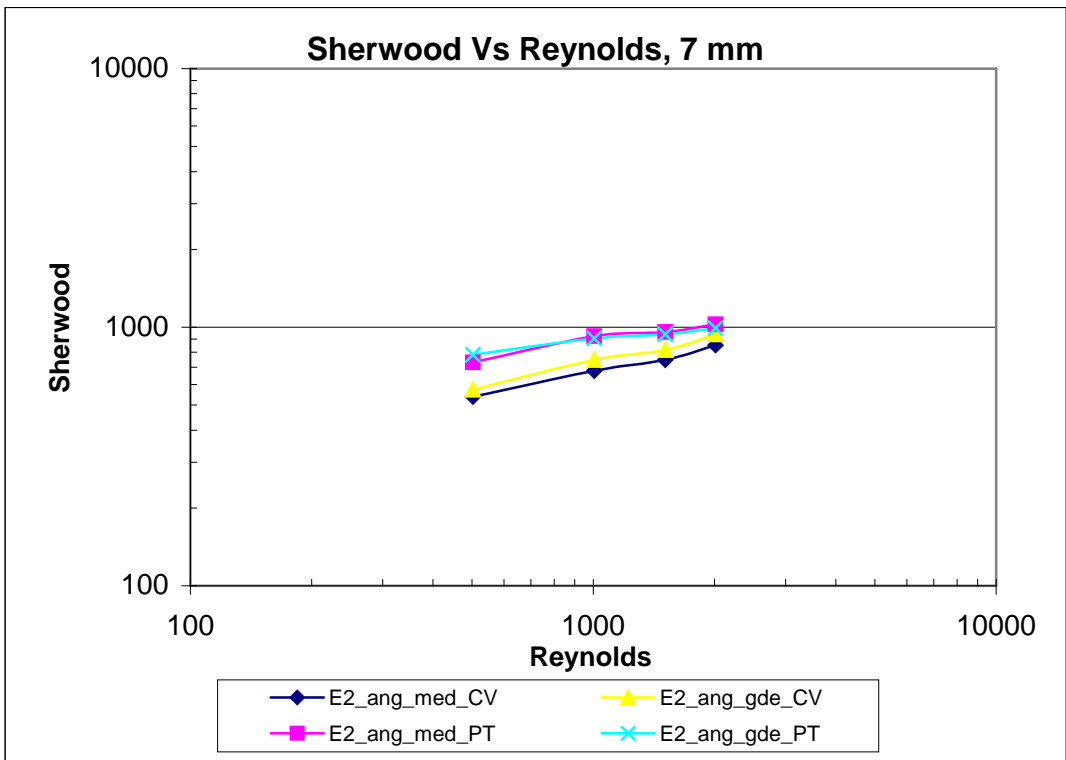
**Tabla XXIX.- NÚMERO DE SHERWOOD CON RELACIÓN AL NÚMERO DE REYNOLDS EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE ENTRADA.**

ASPECTO			NÚMERO DE SHERWOOD			
GAP (mm)	FLUJO (lpm)	REYNOLDS	E2_ang_med_CV	E2_ang_med_PT	E2_ang_gde_CV	E2_ang_gde_PT
4	1	254	250.85	361.22	270.91	391.32
4	2	507	381.29	481.63	401.35	501.69
4	4	1016	471.60	561.89	491.66	591.99
4	6	1524	531.79	622.10	581.96	642.17
7	2	503	539.42	730.82	574.22	783.02
7	4	1006	678.62	922.23	748.22	904.83
7	6	1509	748.22	957.03	817.82	939.63
7	8	2012	852.62	1026.63	939.63	991.83

Los valores mostrados en la tabla XXIX se muestran gráficamente en las figuras 83 y 84. Nótese que el número de Sherwood es normalmente ligeramente mayor para el ángulo grande.



**Figura 83.-** Relación entre Reynolds y Sherwood a 4 mm de gap en función del ángulo de entrada.



**Figura 84.-** Relación entre Reynolds y Sherwood a 7 mm de gap en función del ángulo de entrada.

En las figuras 83 y 84 se muestra que el número de Sherwood es siempre mayor al estar presente el promotor de turbulencia.

En todos los casos se presenta la tendencia a incrementar el número de Sherwood conforme se aumenta el número de Reynolds debido a la disminución de la capa de difusión.

Las ecuaciones que representan esta relación de números adimensionales cambiar el ángulo de entrada se muestran en la tabla XXX. Nótese que las variables de las ecuaciones son muy similares.

**Tabla XXX.- ECUACIONES QUE REPRESENTAN LA TRANSFERENCIA DE MASA EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE ENTRADA.**

GAP (mm)	SITUACIÓN			
	E2_ANG_MED_CV	E2_ANG_GDE_CV	E2_ANG_MED_PT	E2_ANG_GDE_PT
4	$Sh = 2.09 Re^{0.4115} Sc^{1/3}$	$Sh = 2.20 Re^{0.4132} Sc^{1/3}$	$Sh = 5.57 Re^{0.2966} Sc^{1/3}$	$Sh = 6.75 Re^{0.2749} Sc^{1/3}$
	$Sh = 5.68 Re^{0.3202} Sc^{1/3}$	$Sh = 5.27 Re^{0.3432} Sc^{1/3}$	$Sh = 12.99 Re^{0.2394} Sc^{1/3}$	$Sh = 21.62 Re^{0.1667} Sc^{1/3}$

Nótese que en todos los casos se tiene un valor del exponente de Reynolds menor a 0.5, por lo cual se asume que efectivamente se está operando a flujo laminar, además, en las gráficas de Reynolds contra Sherwood no hay cambio de pendiente, lo cual indica que solamente existe un tipo de flujo en el interior del reactor.

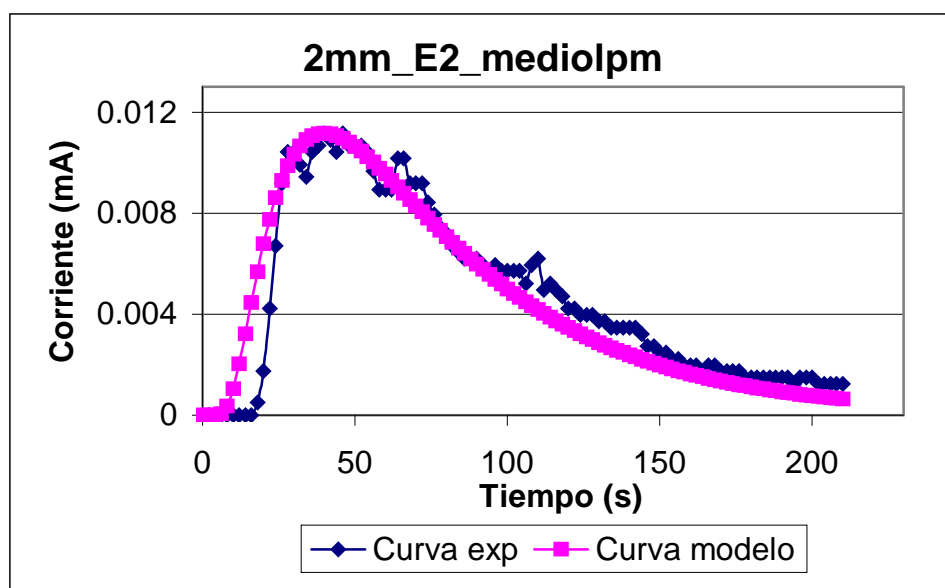
En la tabla XXX se observan valores muy cercanos de las variables para los 2 ángulos empleados, lo cual es esperado pues todos los resultados son muy similares.

## ANEXO A

En este anexo se presentan las gráficas de los resultados a 2 mm de gap para las entradas 2, 3 y 4, además los resultados a 4 y 7 mm de gap. Nótese que en todos los casos se presentan los mismo fenómenos observados en la entrada 1.

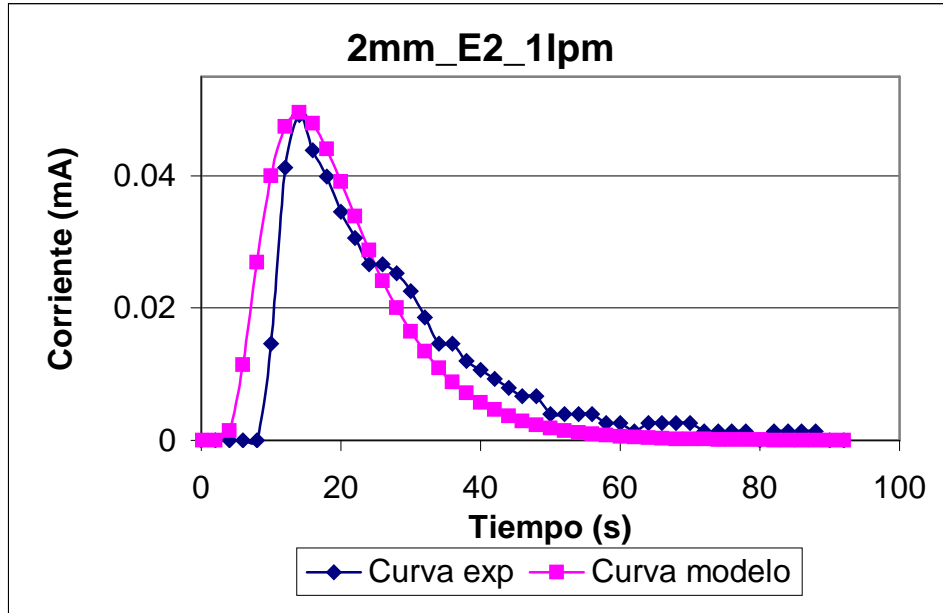
### A.1.-GAP DE 2 mm, ENTRADA 2.

Las gráficas 1-5 corresponden a las pruebas realizadas con 2 milímetros de gap pero ahora en la entrada 2.

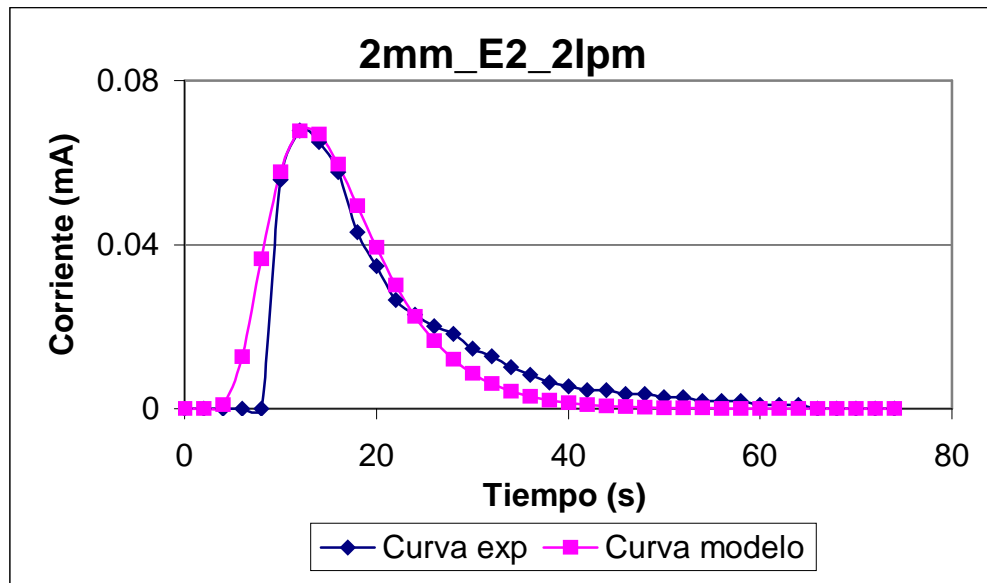


**Figura 1.-** Distribución de tiempo de residencia para un gap de 2mm, en la entrada 2 a medio litro por minuto.

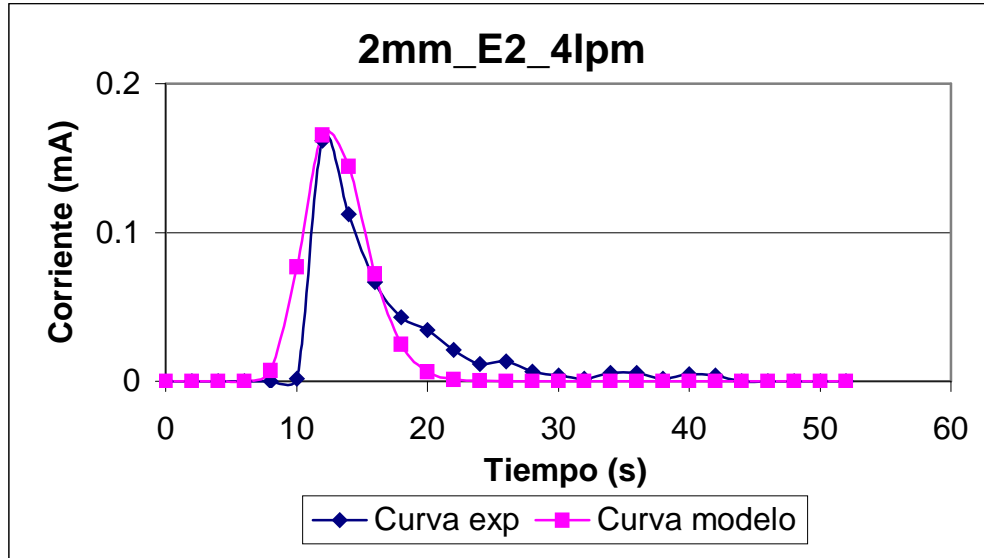




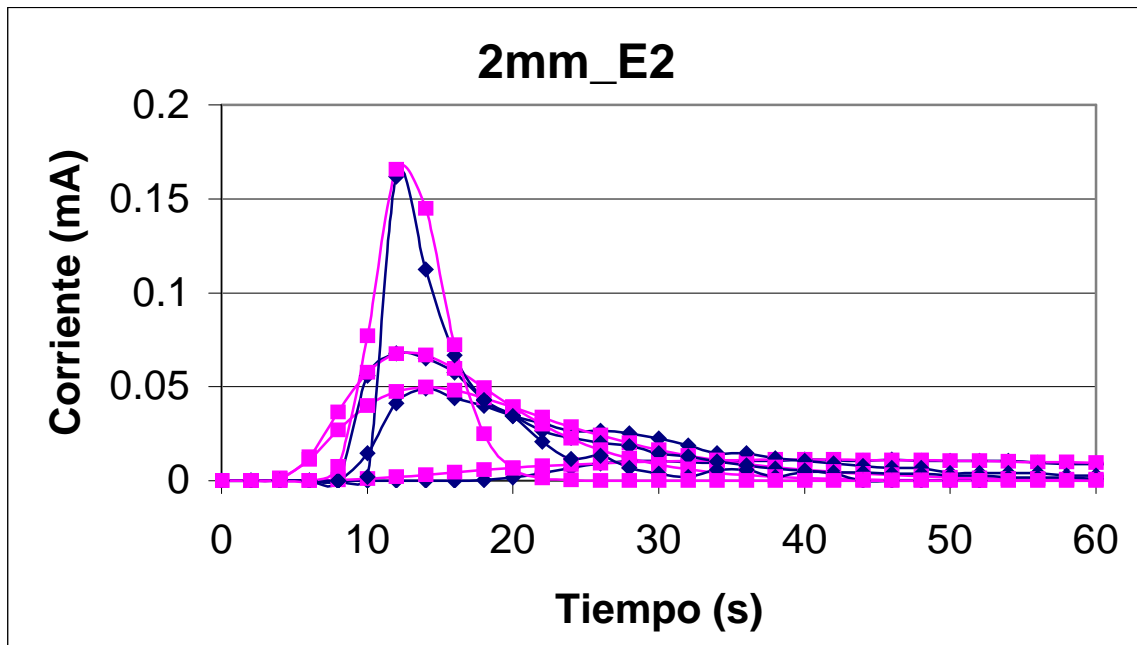
**Figura 2.-** Distribución de tiempo de residencia para un gap de 2mm, en la entrada 2 a un litro por minuto.



**Figura 3.-** Distribución de tiempo de residencia para un gap de 2mm, en la entrada 2 a dos litros por minuto.



**Figura 4.-** Distribución de tiempo de residencia para un gap de 2mm, en la entrada 2 a cuatro litros por minuto.



**Figura 5.-** Distribución de tiempo de residencia para un gap de 2mm, en la entrada 2.

En estas 5 gráficas se observa que operando a medio litro por minuto se tiene la distribución más alejada del flujo pistón, mientras que a 1 y 2 litros por minuto se tienen las más cercanas al flujo chato.

A.2.- GAP DE 2 mm, ENTRADA 3.

Las siguientes 5 gráficas corresponden a los resultados de las pruebas a 2 milímetros de gap en la entrada 3.

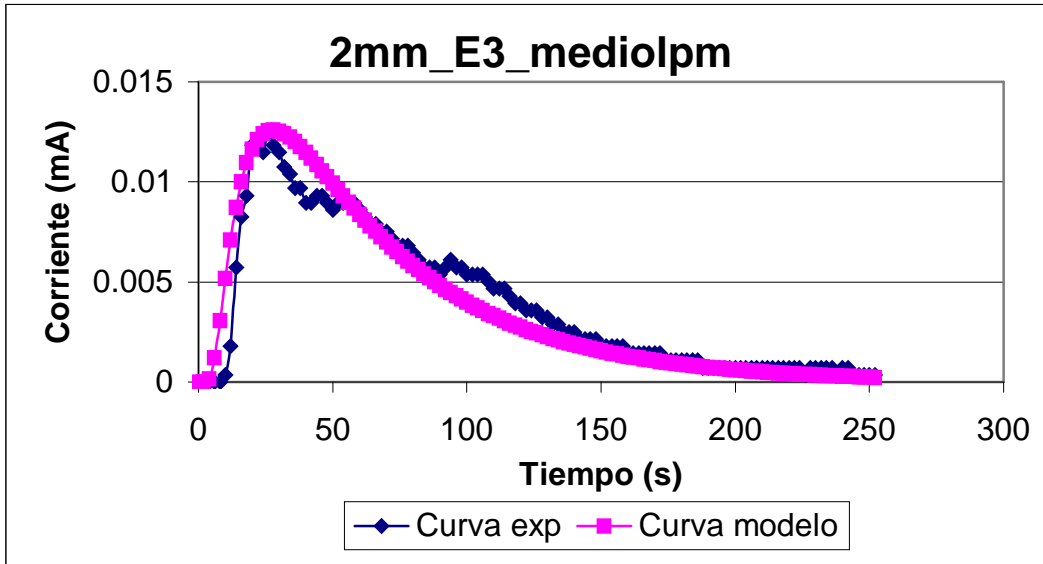


Figura 6.- Distribución de tiempo de residencia para 2 mm de gap, en la entrada 3, a medio litro por minuto.

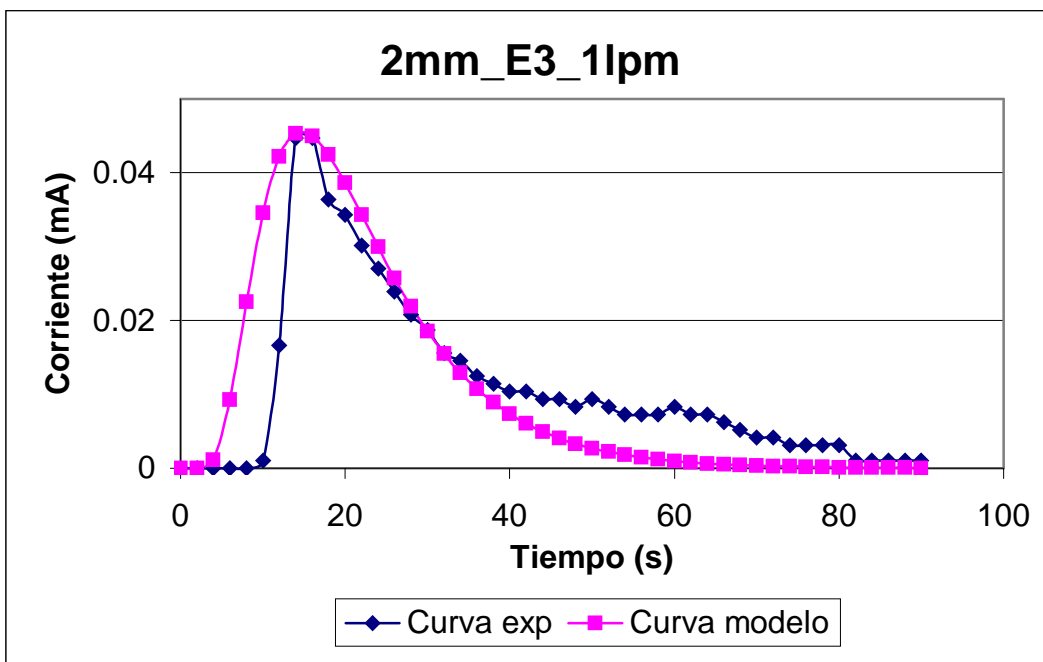
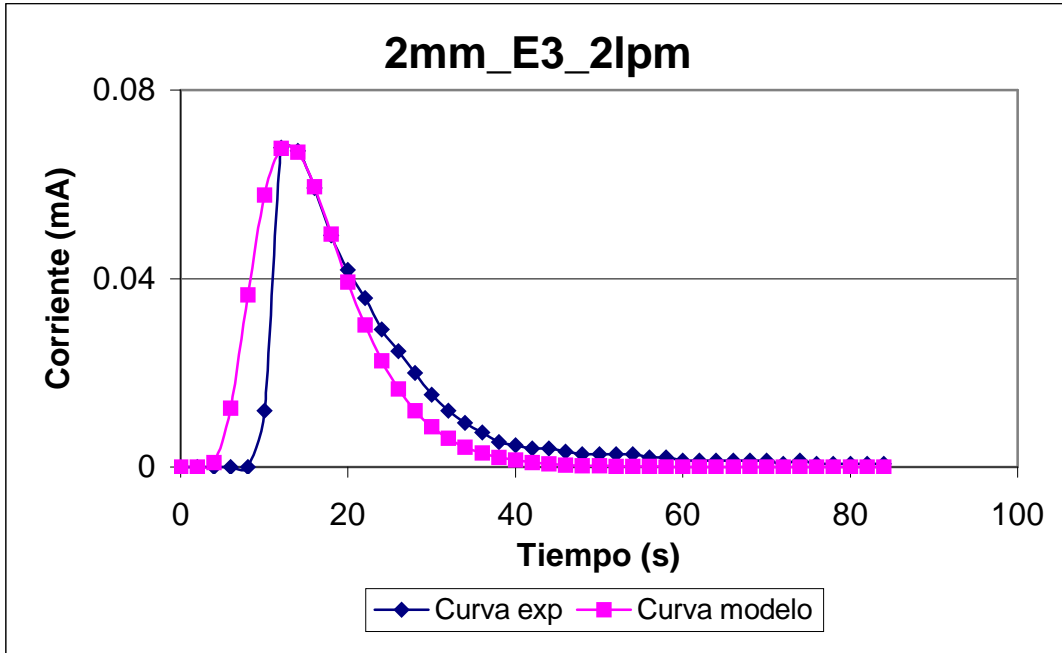
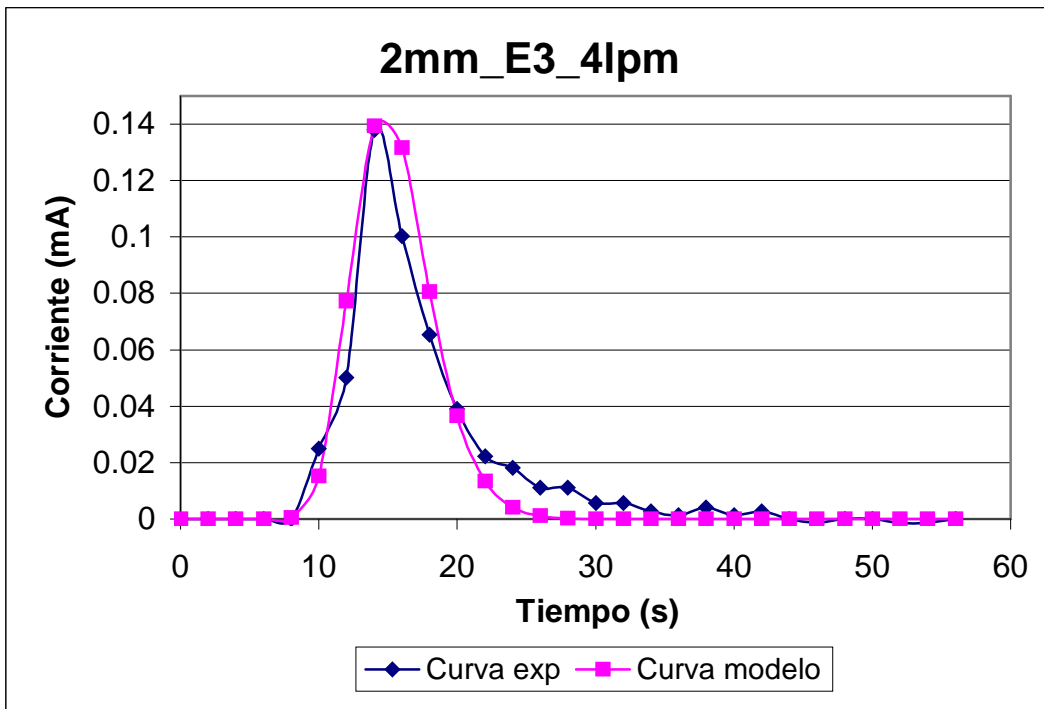


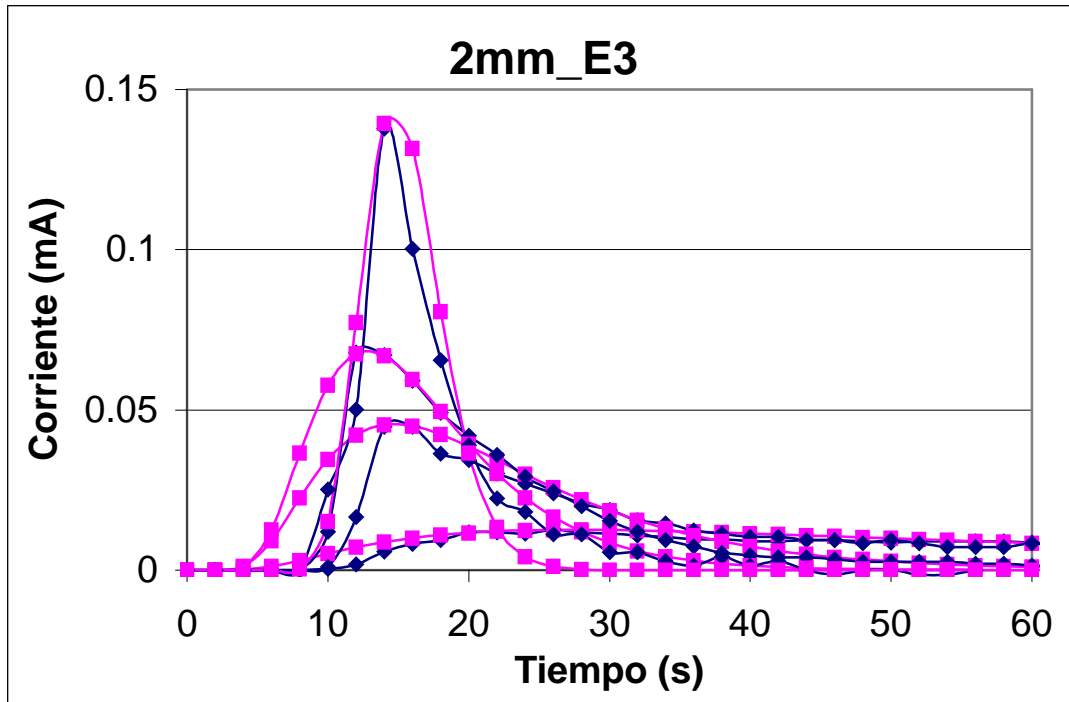
Figura 7.- Distribución de tiempo de residencia para 2 mm de gap, en la entrada 3, a un litro por minuto.



**Figura 8.-** Distribución de tiempo de residencia para 2 mm de gap, en la entrada 3, a dos litros por minuto.



**Figura 9.-** Distribución de tiempo de residencia para 2 mm de gap, en la entrada 3, a cuatro litros por minuto.



**Figura 10.-** Distribución de tiempo de residencia para 2 mm de gap, en la entrada 3.

En las figuras 6-9 se observa también una pequeña zona de alta velocidad y otra zona de baja velocidad. En esas gráficas también se nota que estas diferencias entre las dos curvas disminuye conforme se incrementa el flujo, lo cual se presenta en las otras entradas.

Los resultados de la entrada 3 a 2 mm de gap son muy parecidos a los de la entrada 2, los tiempos de residencia promedio son prácticamente iguales; este fenómeno ya ha sido observado en las pruebas colorimétricas, en donde se señala un comportamiento similar entre las entradas 1-4 y las entradas 2-3, esto porque es el mismo separador empleado para dichos pares de entradas.

La figura 10 muestra que el tiempo de residencia promedio disminuye primero exponencialmente y después asintóticamente conforme se incrementa el flujo.

En estas gráficas se observa que es mejor operar a flujos altos, ya que es en estos cuando la similitud entre las curvas experimental y modelo es mayor.

A.3.- GAP DE 2 mm, ENTRADA 4.

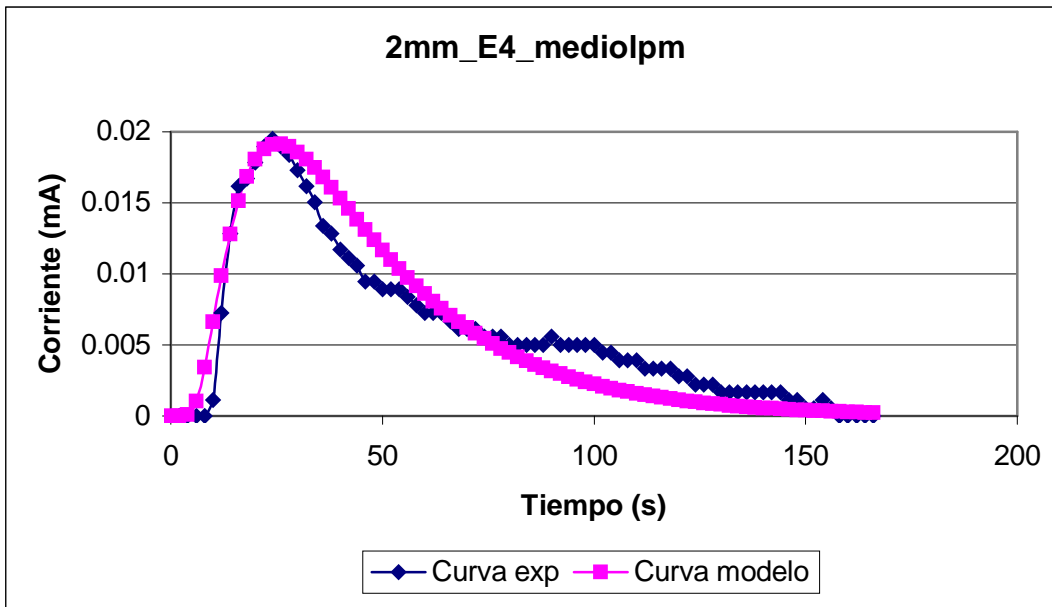


Figura 11.- Distribución de tiempo de residencia a un gap de 2mm, en la entrada 4 a medio litro por minuto.

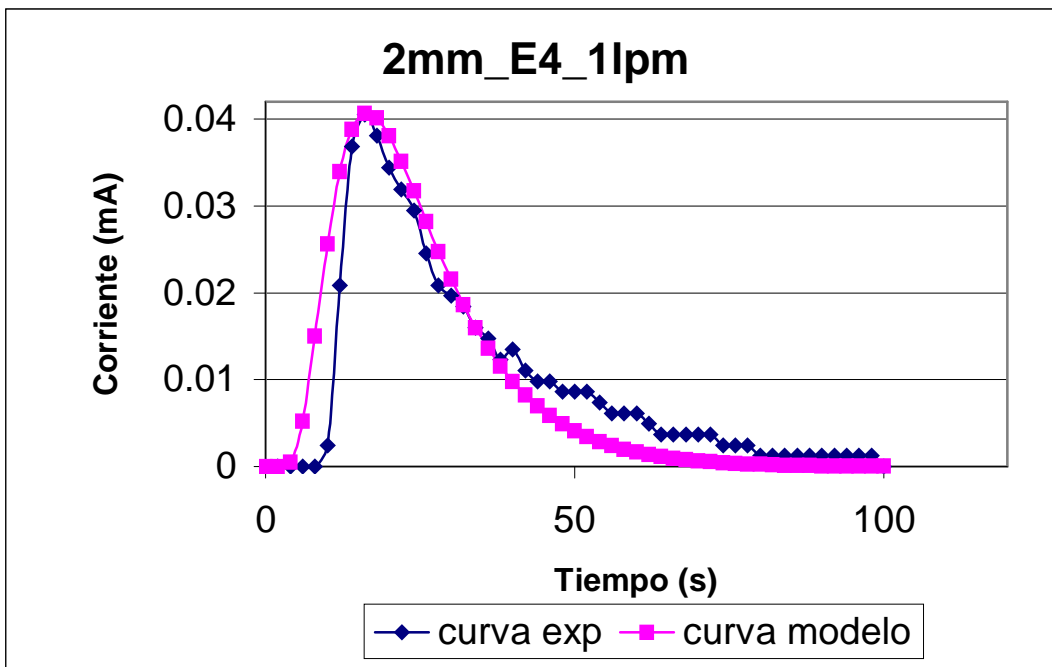
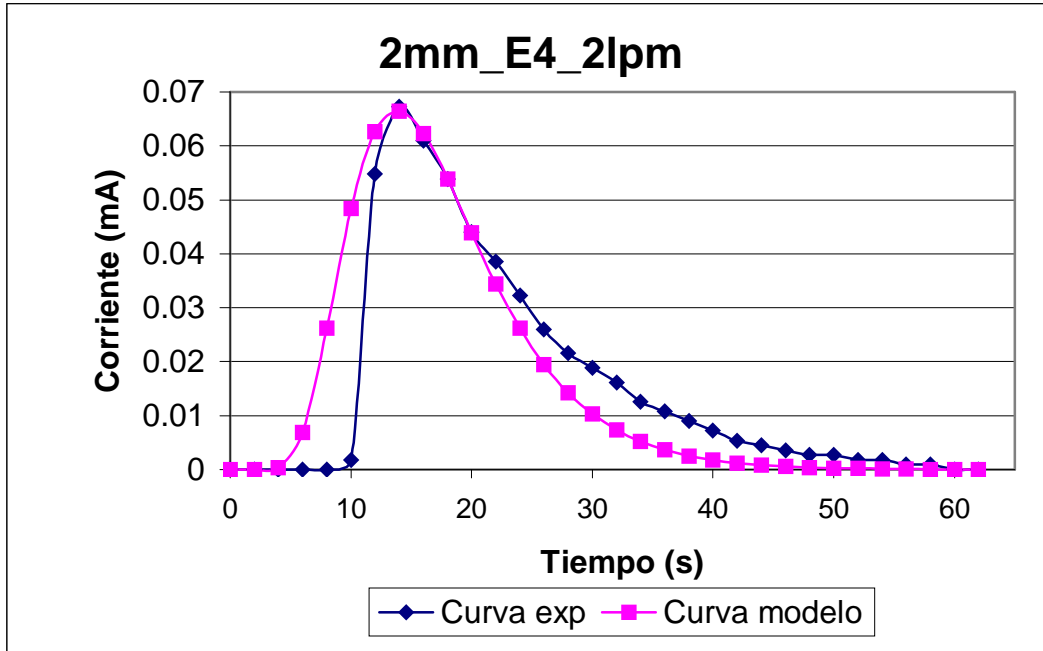
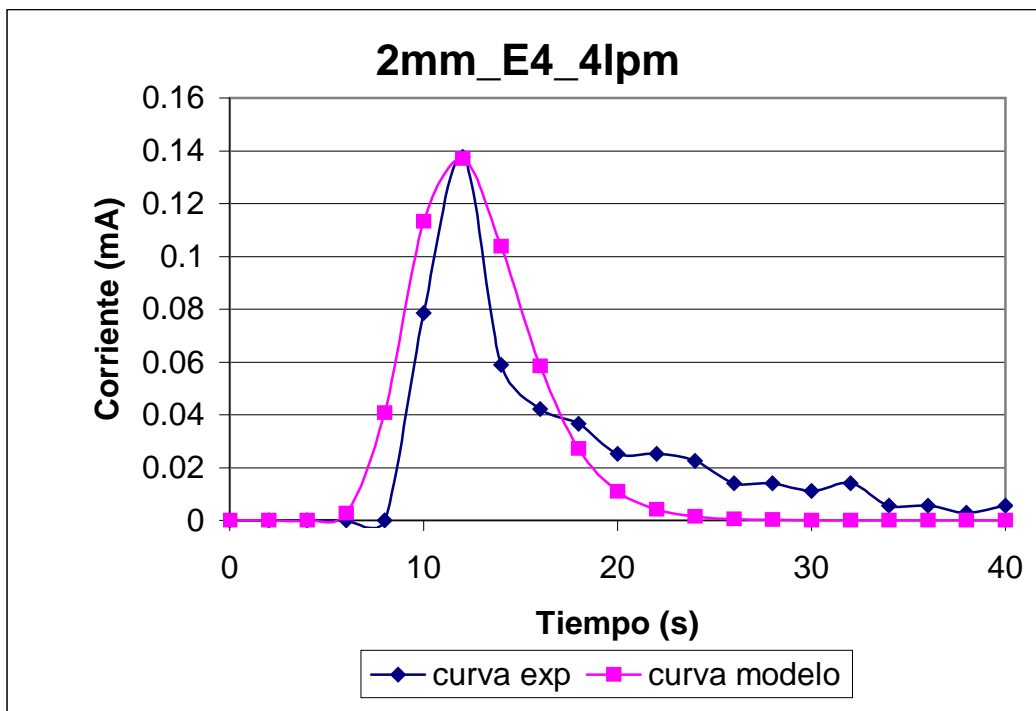


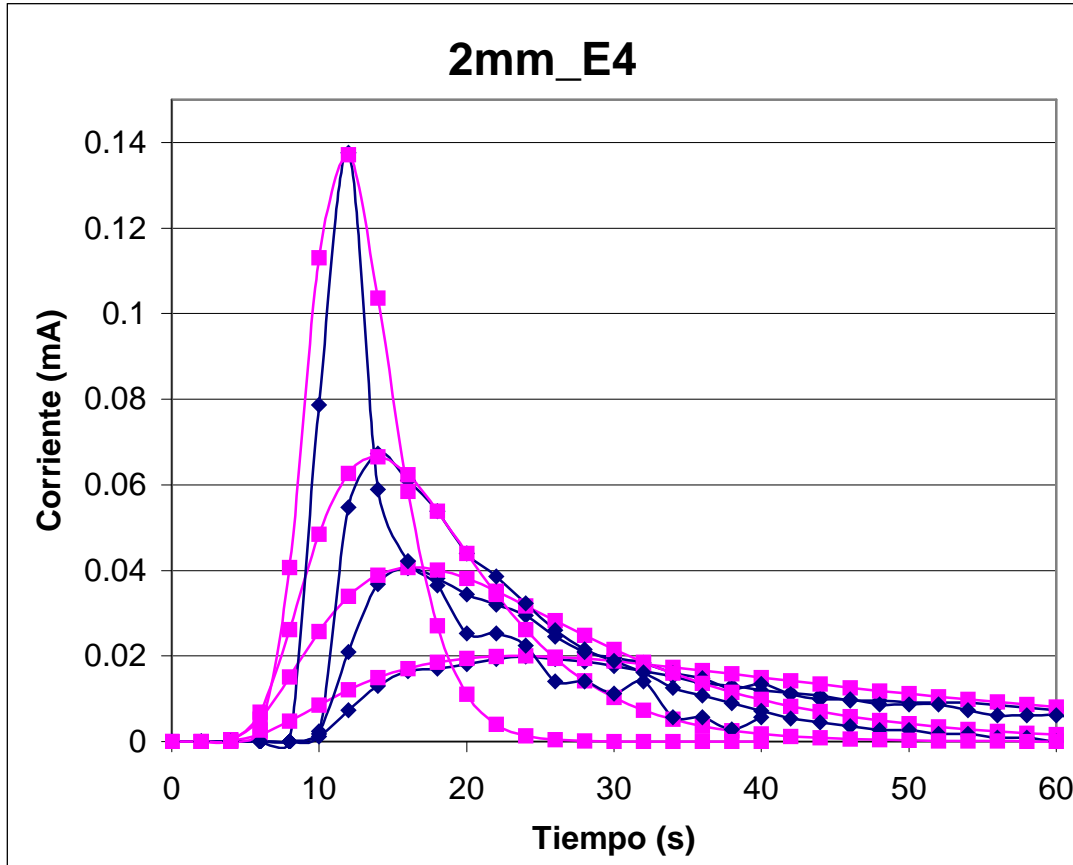
Figura 12.- Distribución de tiempo de residencia a un gap de 2mm, en la entrada 4 a un litro por minuto.



**Figura 13.-** Distribución de tiempo de residencia a un gap de 2mm, en la entrada 4 a dos litros por minuto.



**Figura 14.-** Distribución de tiempo de residencia a un gap de 2mm, en la entrada 4 a cuatro litros por minuto.



**Figura 15.-** Distribución de tiempo de residencia a un gap de 2mm, en la entrada 4.

Las figuras 11-14 muestran los gráficos de las pruebas realizadas a 2 mm de gap en la entrada 4, en ellas se observa que las curvas que más se asemejan a un flujo pistón son las de uno y dos litros por minuto, y que la peor opción es usar el flujo de medio litro por minuto pues en esa situación se está más alejado del flujo chato ideal.

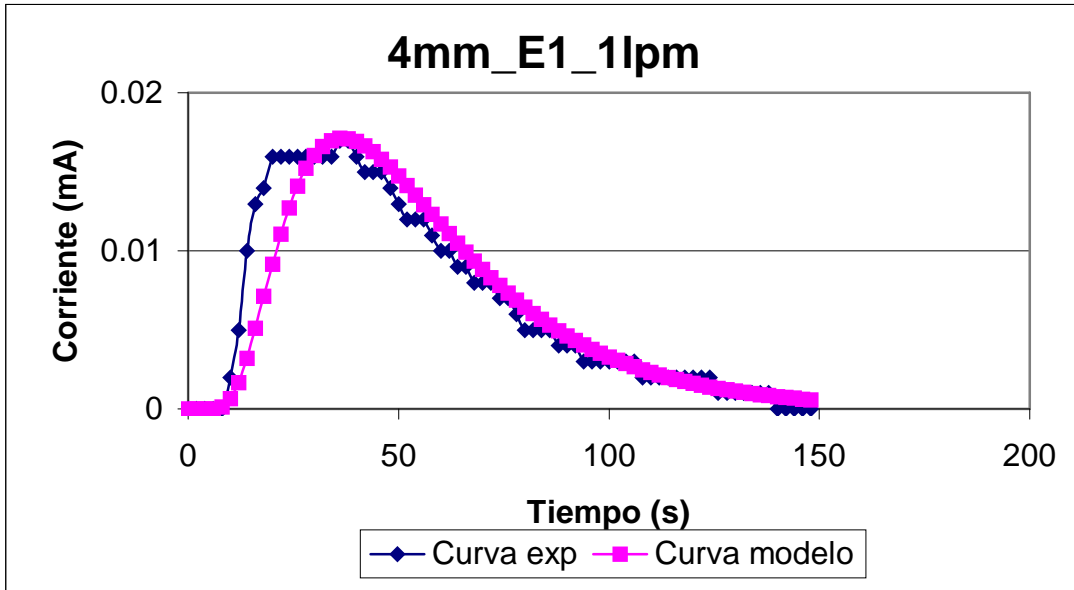
La figura 15 pone al descubierto el comportamiento del tiempo de residencia promedio de las pruebas, en ella se observa que este no es lineal, y a primera instancia los valores son muy parecidos a los de la entrada 1, lo cual era algo esperado.

Los resultados de 2 mm de gap muestran que las entradas 1 y 4 tienen valores semejantes, lo cual ocurre también para las entradas 2 y 3. La diferencia máxima entre cada par de entradas es de aproximadamente 15 %.

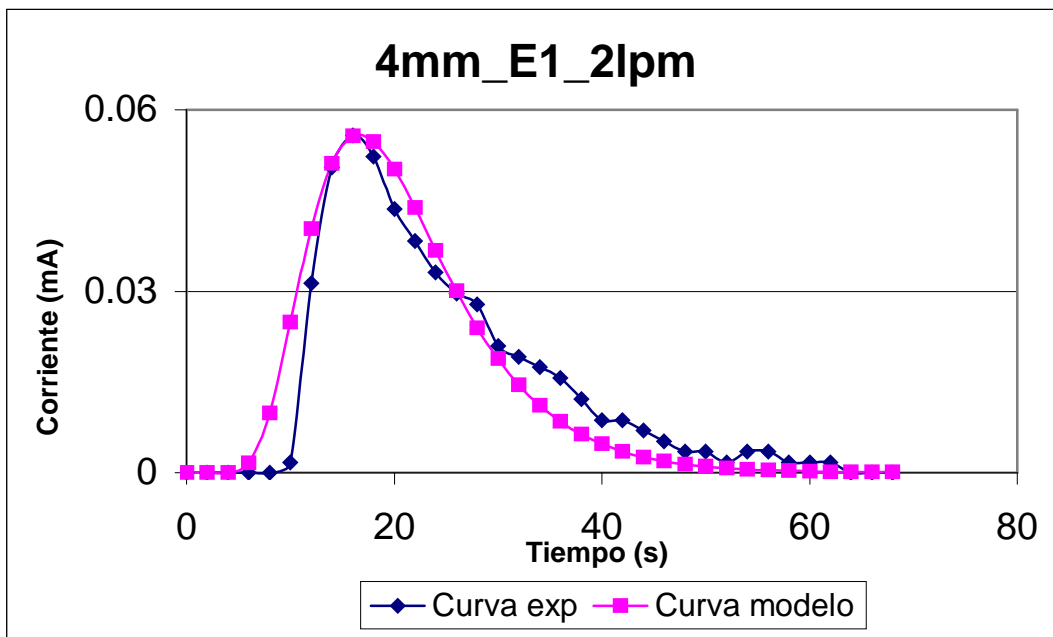


#### A.4.- GAP DE 4 mm, ENTRADA 1.

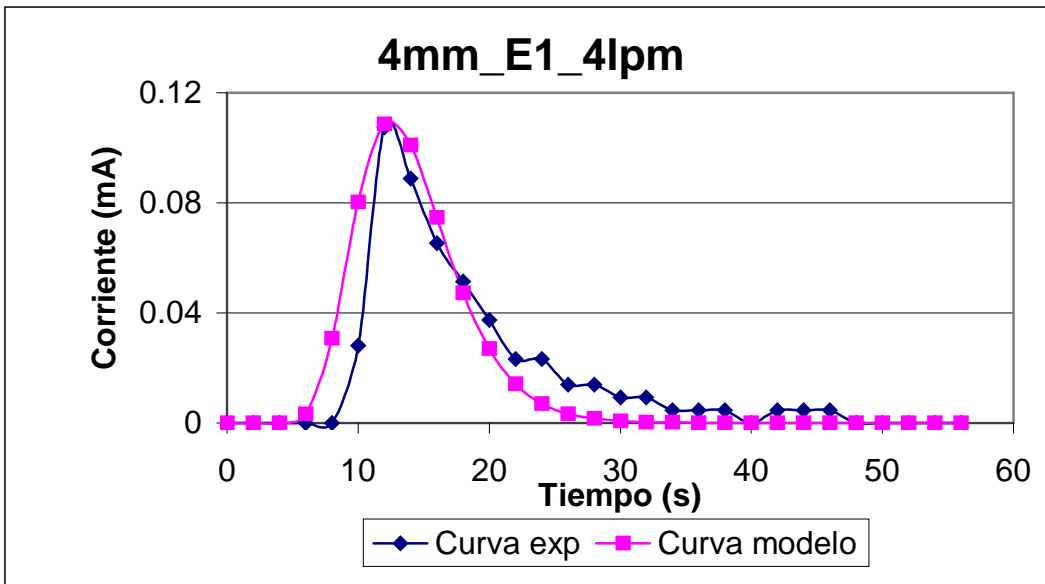
Para 4 milímetros de gap, probando la entrada 1, los resultados son los mostrados en las siguientes 5 gráficas.



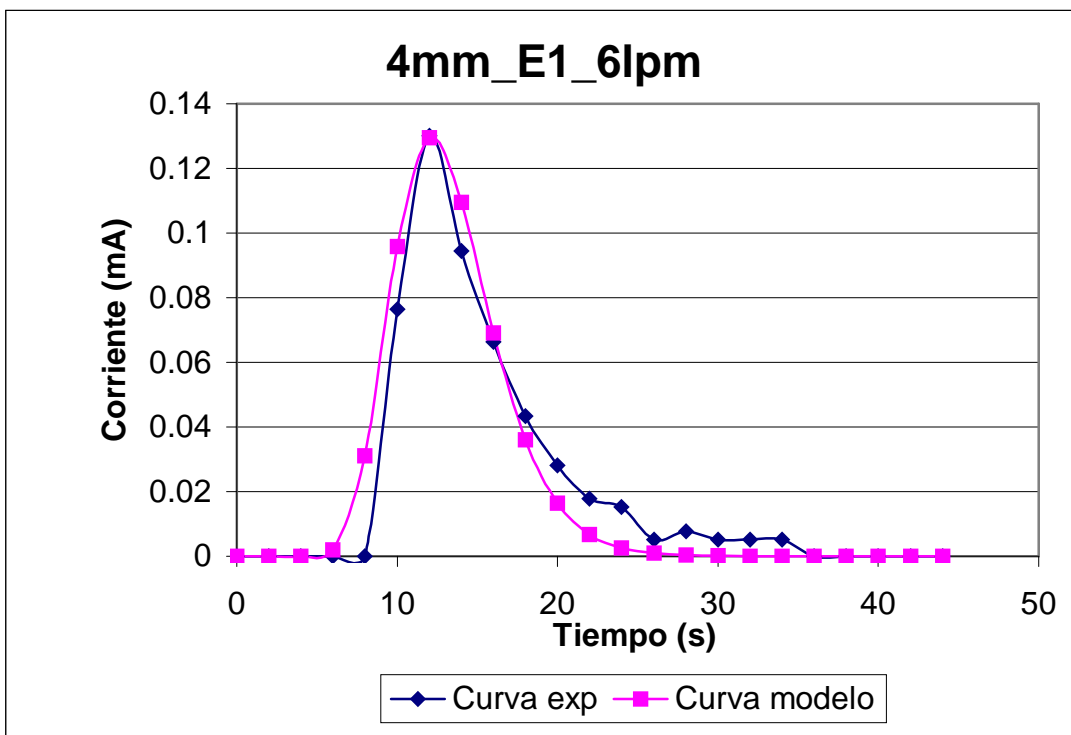
**Figura 16.-** Distribución de tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 1 a un litro por minuto.



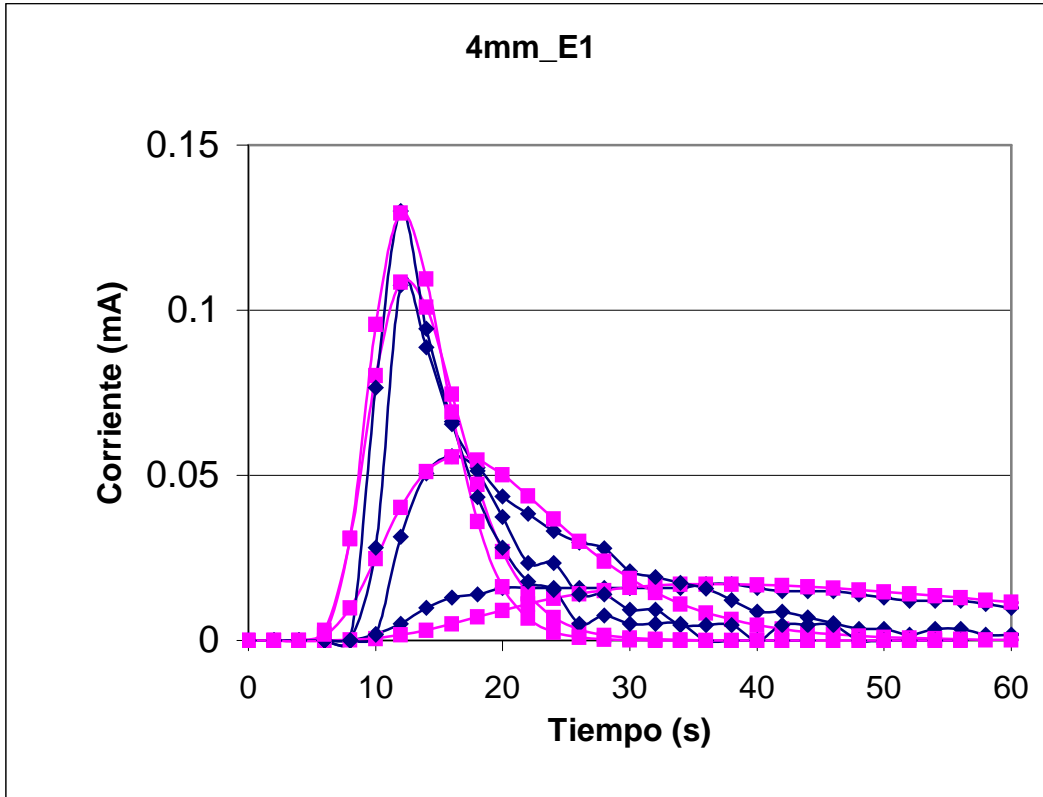
**Figura 17.-** Distribución de tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 1 a dos litros por minuto.



**Figura 18.-** Distribución de tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 1 a cuatro litros por minuto.



**Figura 19.-** Distribución de tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 1 a seis litros por minuto.



**Figura 20.-** Distribución de tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 1.

En las figuras 16-19 se muestran los resultados de los experimentos hechos a 4 mm de gap en la entrada 1, en ellas se aprecia que se tiene una ligera zona de alta velocidad y una zona de baja velocidad, aunque se aprecia una gran similitud entre las curvas experimental y modelo.

En estos casos, la mayor semejanza entre las dos curvas existe a los flujos de dos y cuatro litros por minuto, siendo el peor caso al menor flujo.

La figura 20 pone de manifiesto que al menos para este gap y esta entrada existe una disminución primero exponencial y después asintótica del tiempo de residencia promedio, lo cual coincide con los resultados obtenidos usando el gap de 2 mm.

A.5.- GAP DE 4 mm, ENTRADA 2.

Ahora son mostrados los resultados obtenidos con el gap de 4 milímetros pero ahora para la entrada 2.

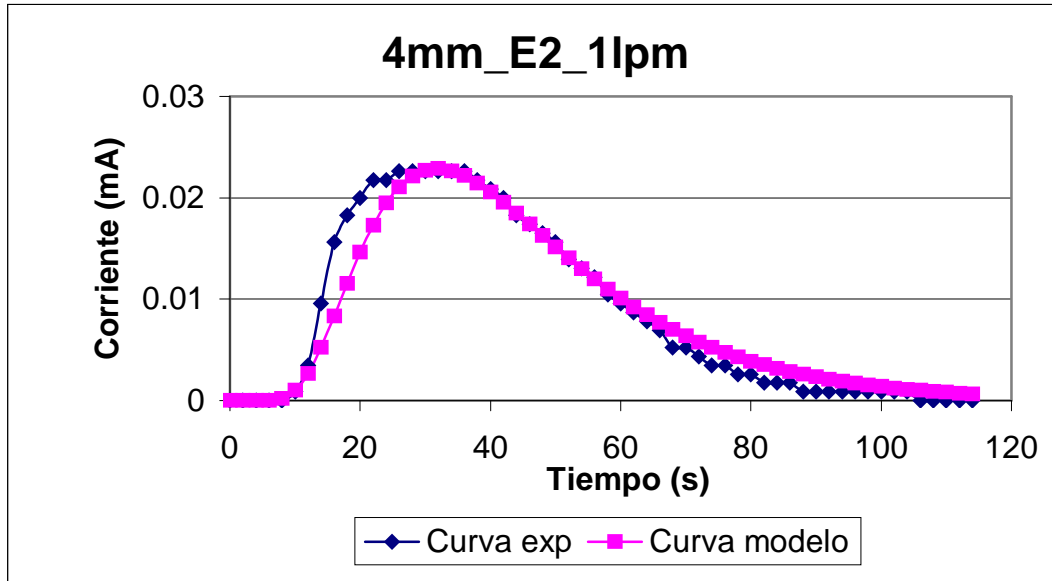


Figura 21.- Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap para la entrada 2 a un litro por minuto.

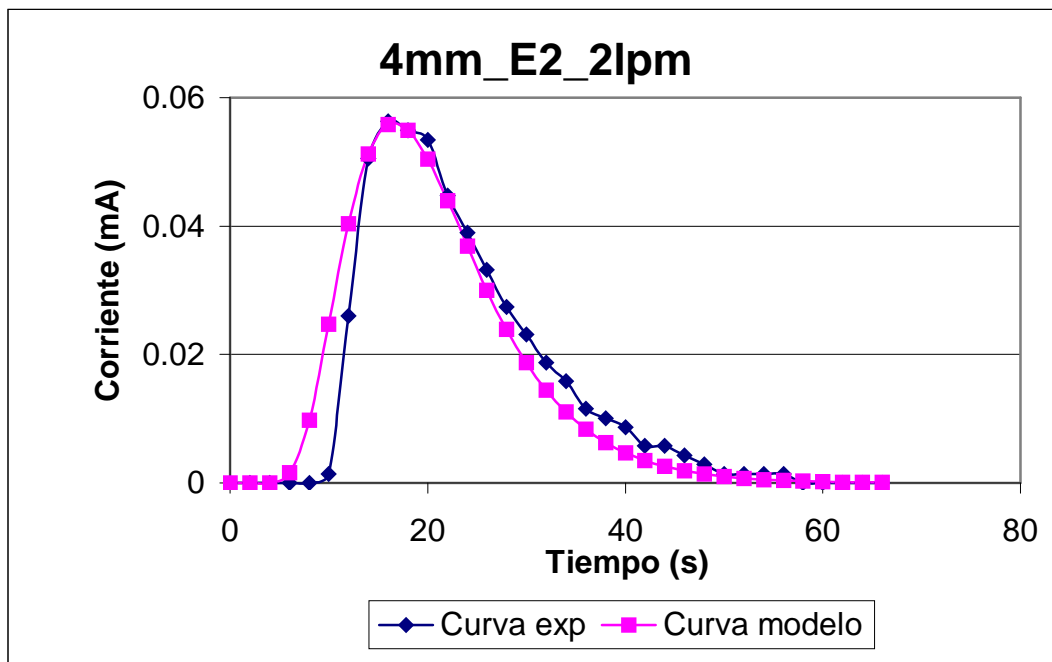
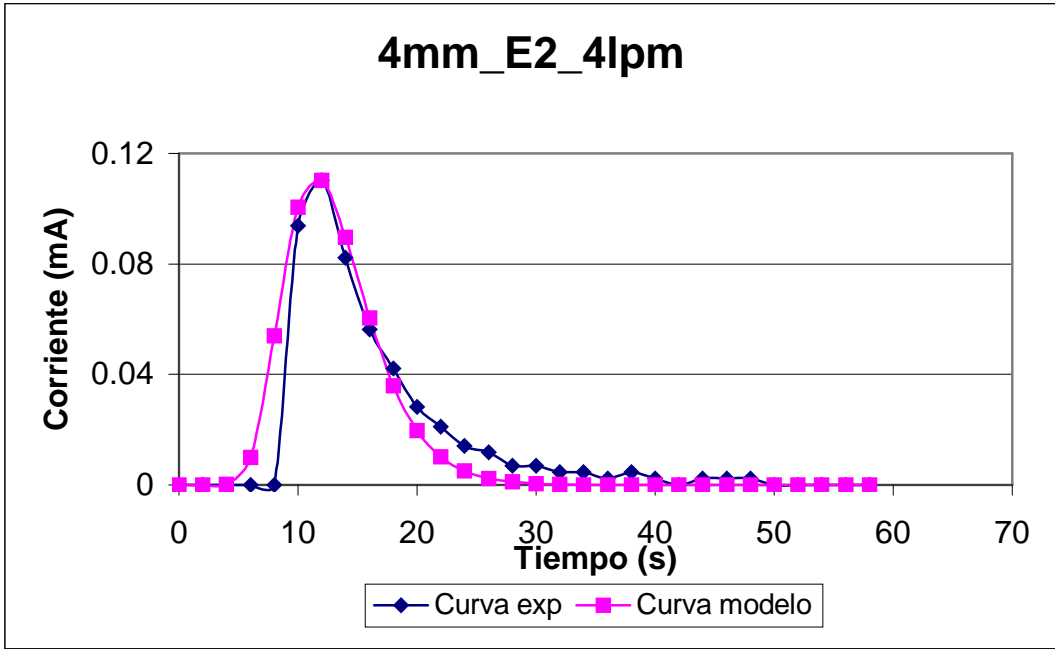
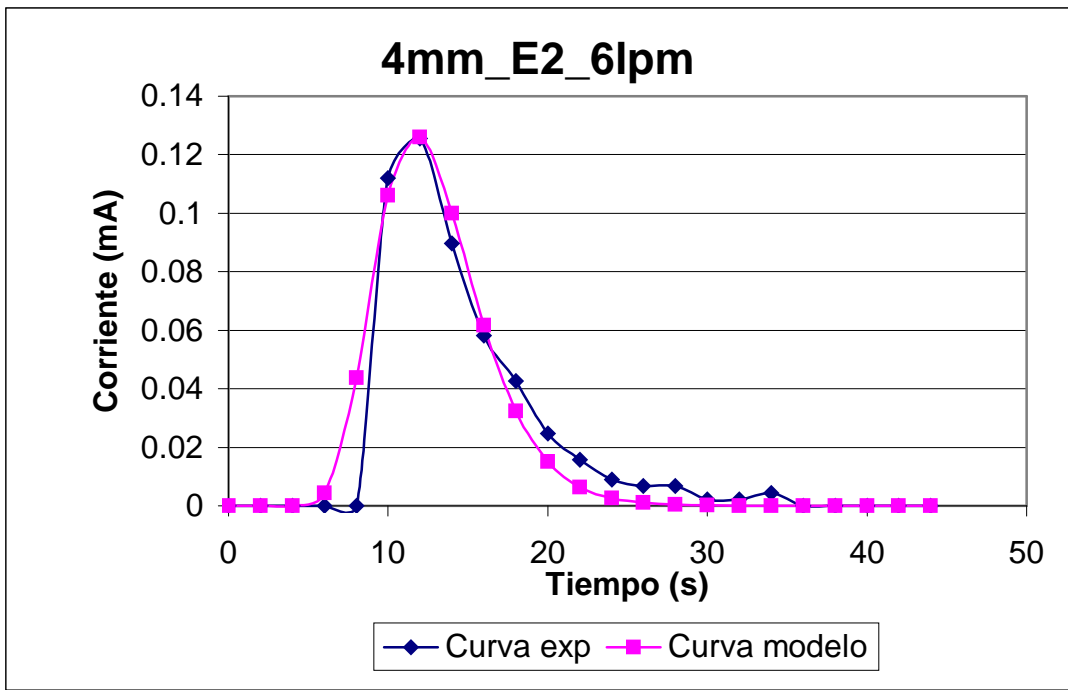


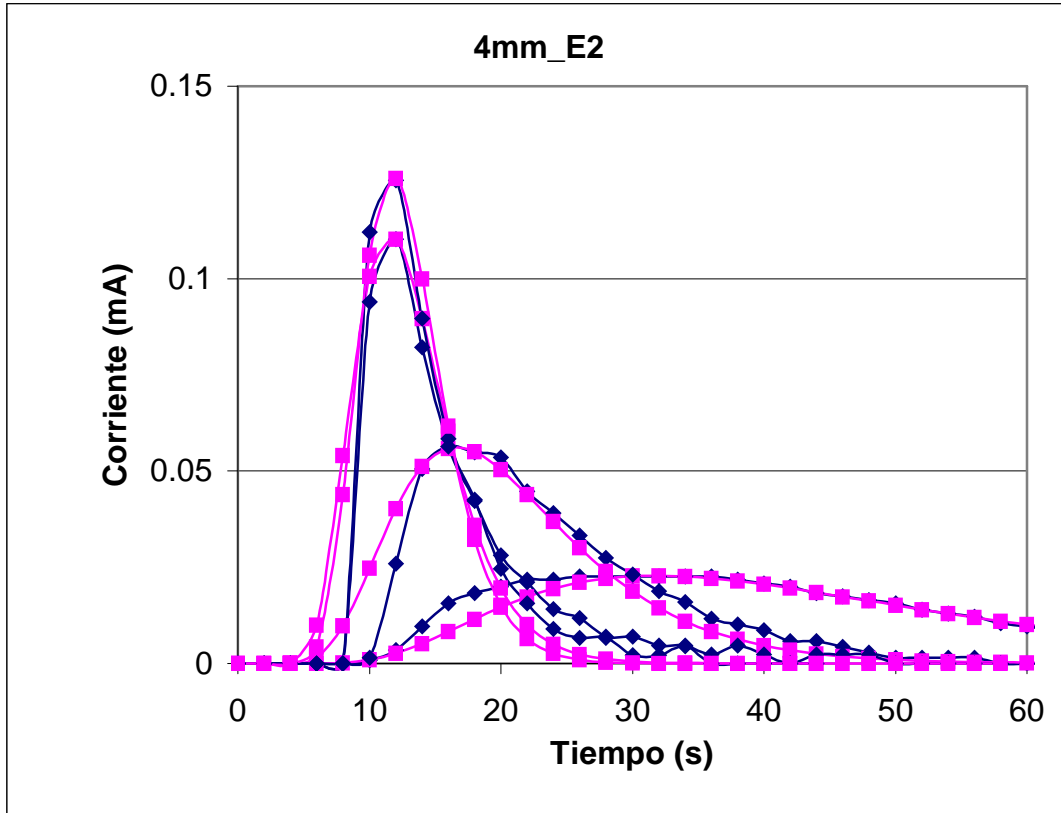
Figura 22.- Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap para la entrada 2 a dos litros por minuto.



**Figura 23.-** Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap para la entrada 2 a cuatro litros por minuto.



**Figura 24.-** Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap para la entrada 2 a seis litros por minuto.



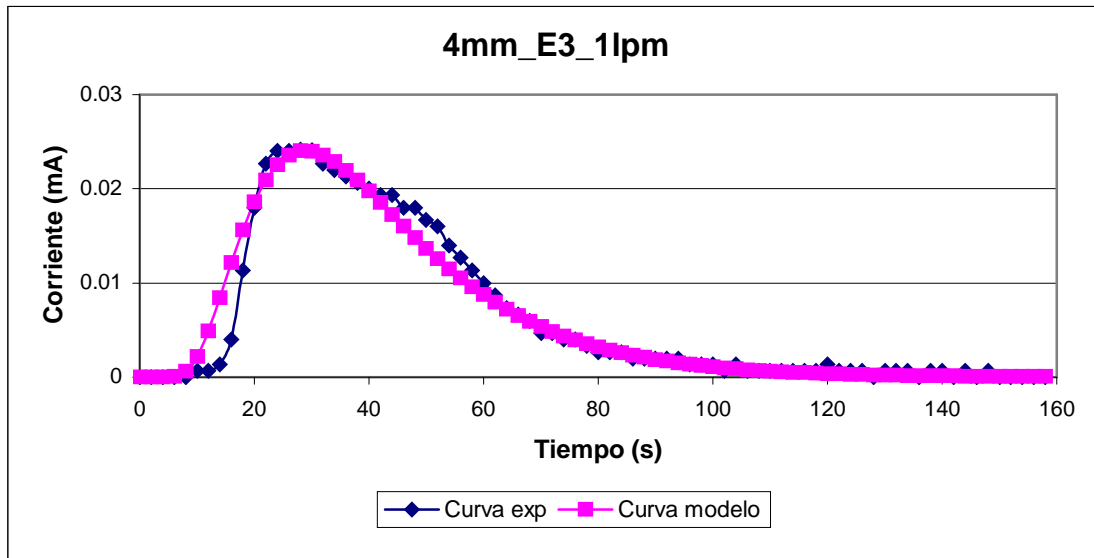
**Figura 25.-** Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap para la entrada 2.

En las figuras 21-24 se muestran los resultados gráficamente de la distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap, pero ahora para la entrada 2, en ellas se observa que existe una gran similitud entre las dos curvas, sobre todo a flujos altos, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en la entrada 1.

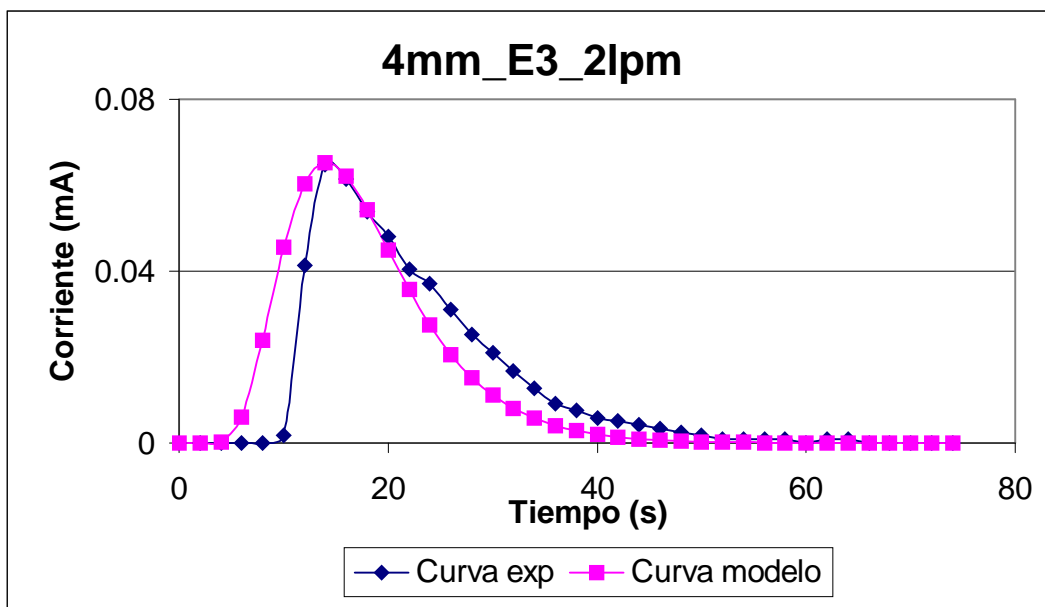
La figura 25 muestra la disminución primero exponencial y después asintótica del tiempo de residencia promedio, resultado ya esperado y que además concuerda con todos los resultados previamente mostrados.

A.6.- GAP DE 4 mm, ENTRADA 3.

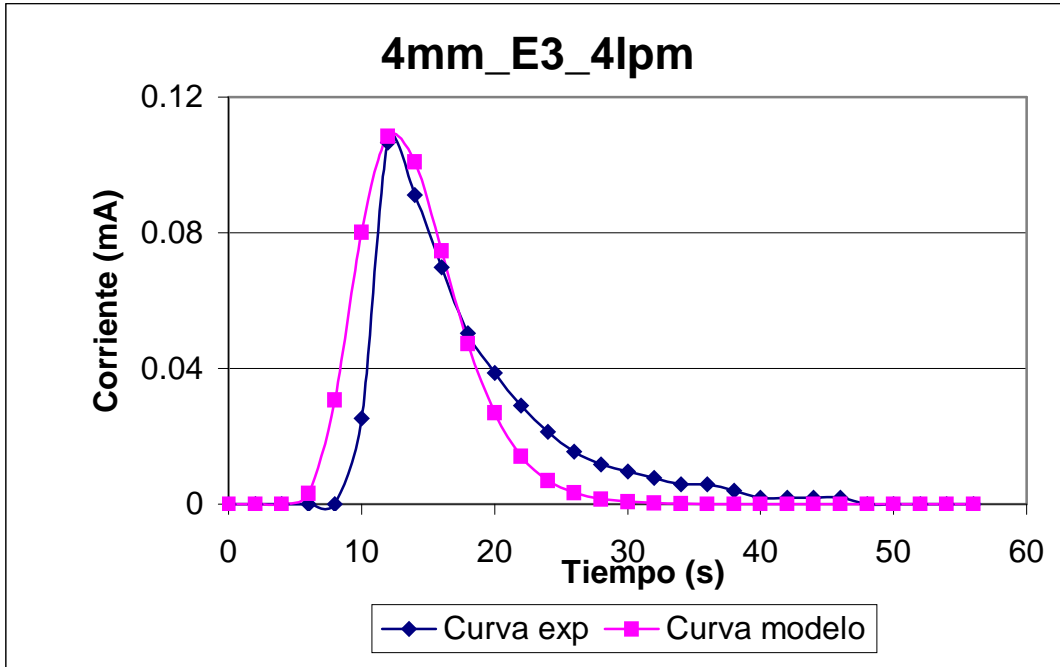
Los resultados de las pruebas hechas a 4 milímetros de gap en la entrada 3 son mostrados en las siguientes 5 gráficas.



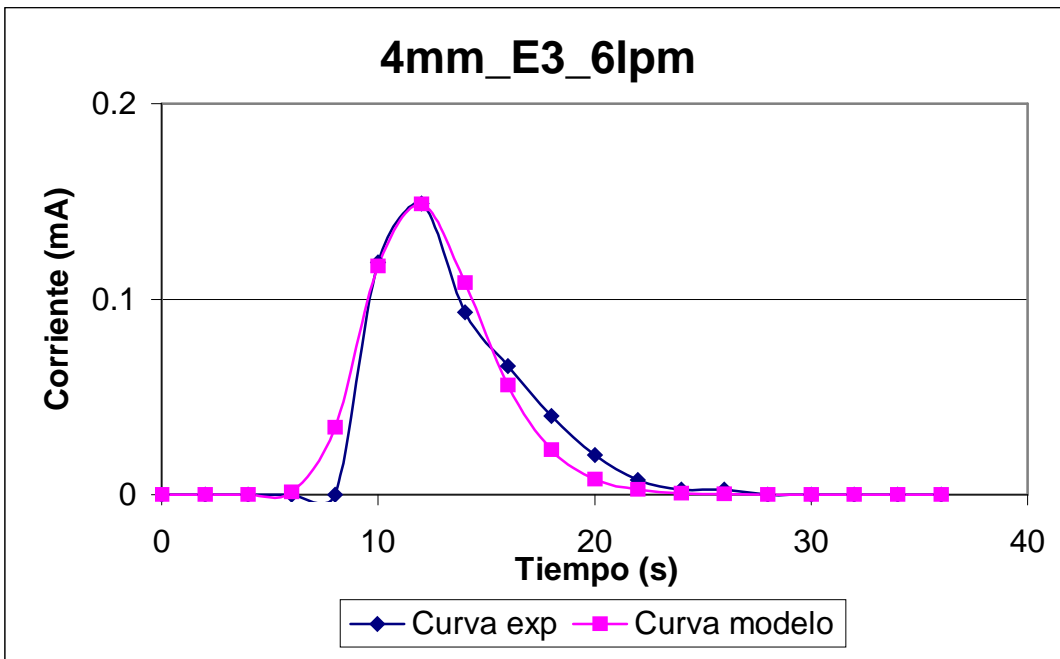
**Figura 26.-** Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 3 a un litro por minuto.



**Figura 27.-** Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 3 a dos litros por minuto.

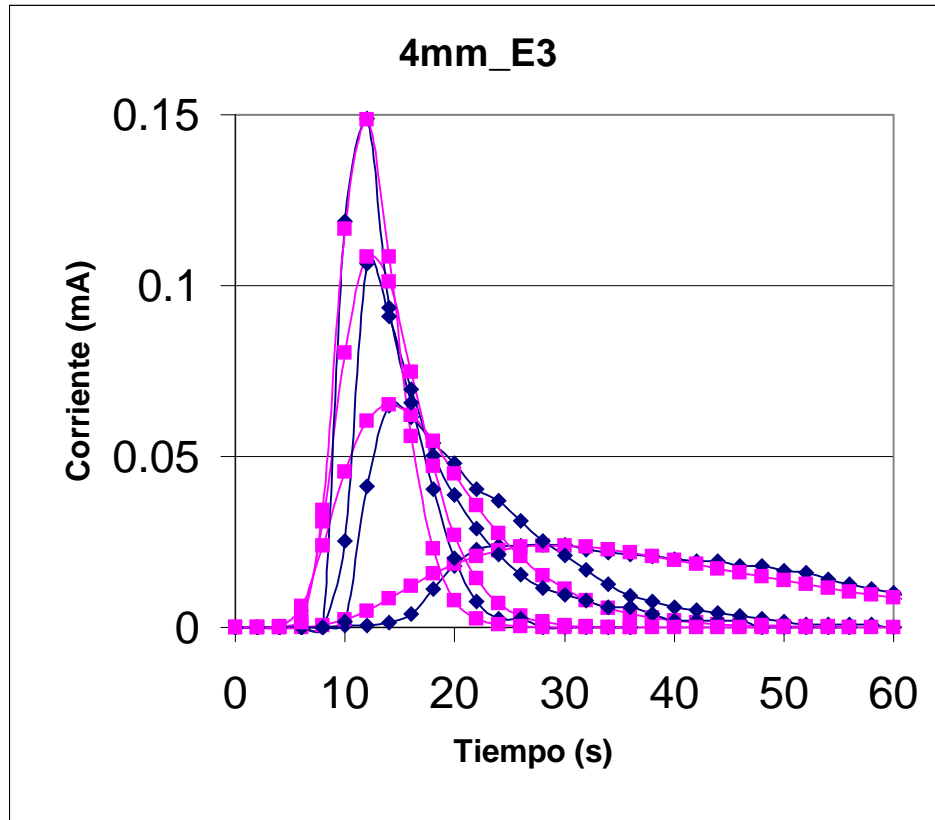


**Figura 28.-** Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 3 a cuatro litros por minuto.



**Figura 29.-** Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 3 a seis litros por minuto.





**Figura 30.-** Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 3.

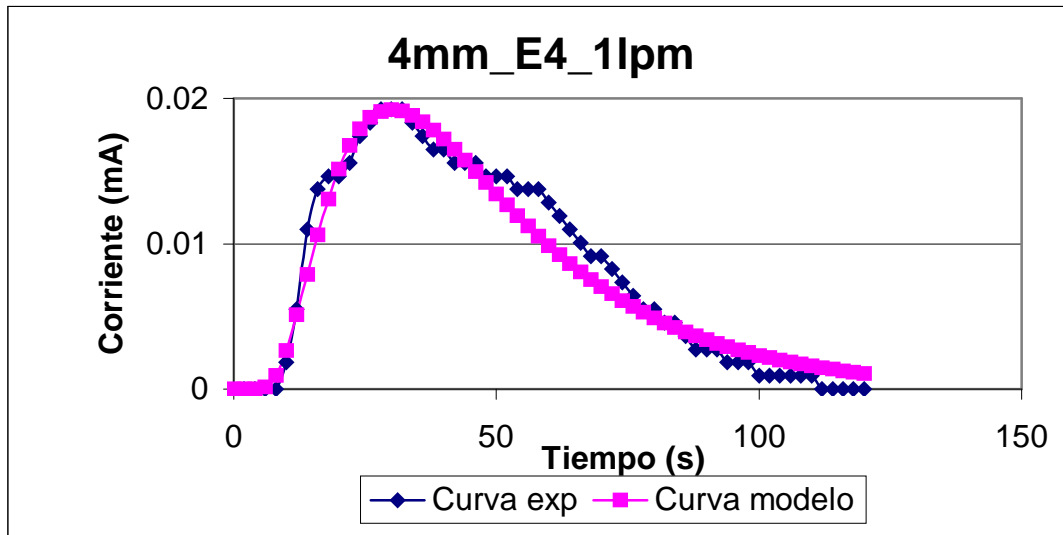
Las figuras 26-29 muestran los resultados obtenidos al realizar las pruebas a un gap de 4 mm, para la entrada 3 a los cuatro flujos manejados, en ellas se observa que existe una gran similitud entre las curvas experimental y modelo, lo cual significa que existe una gran cercanía al flujo pistón ideal.

Como en los casos expuestos anteriormente, la peor situación se presenta al flujo más bajo (un litro por minuto).

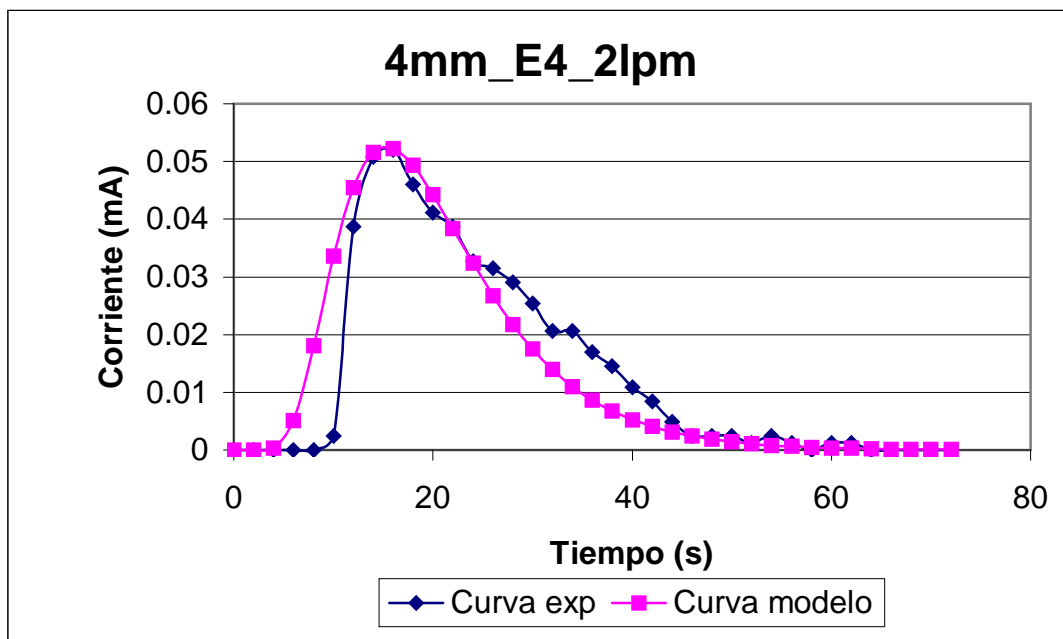
La figura 30 muestra los resultados a cuatro flujos superpuestos, en ella se observa que el tiempo de residencia promedio disminuye exponencial y asintóticamente conforme se aumenta el flujo; este resultado ya se había presentado en todos los casos mostrados con anterioridad, no solo a un gap de 4 mm, si no también a 2 mm de gap.

A.7.- GAP DE 4 mm, ENTRADA 4.

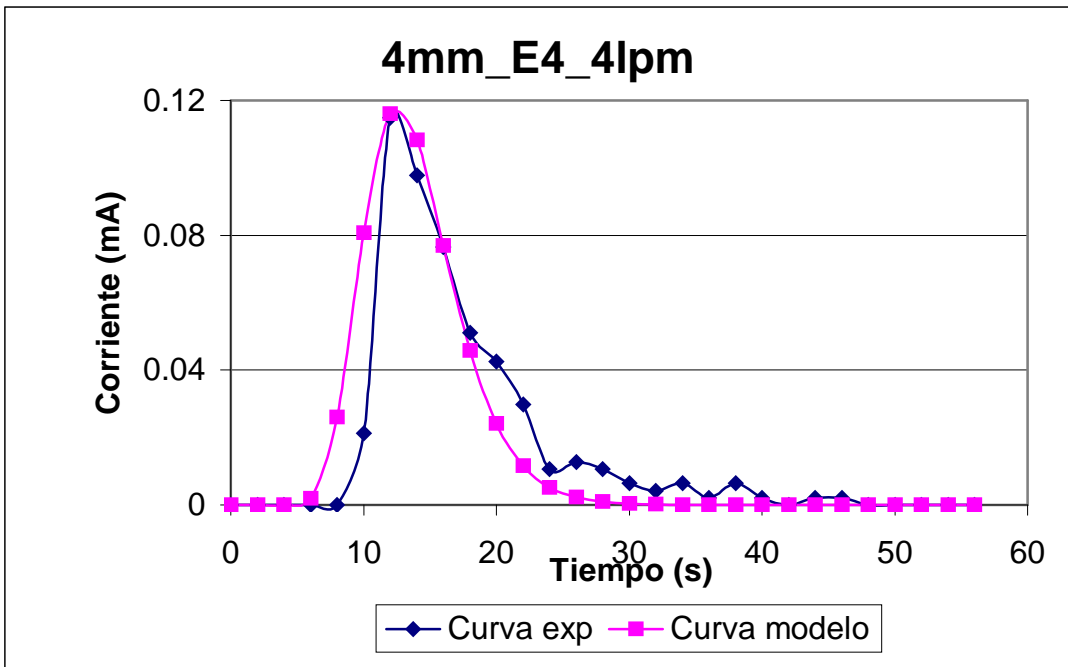
Los resultados de los experimentos hechos en la entrada 4 con un gap de 4 milímetros se muestran en las siguientes 5 gráficas.



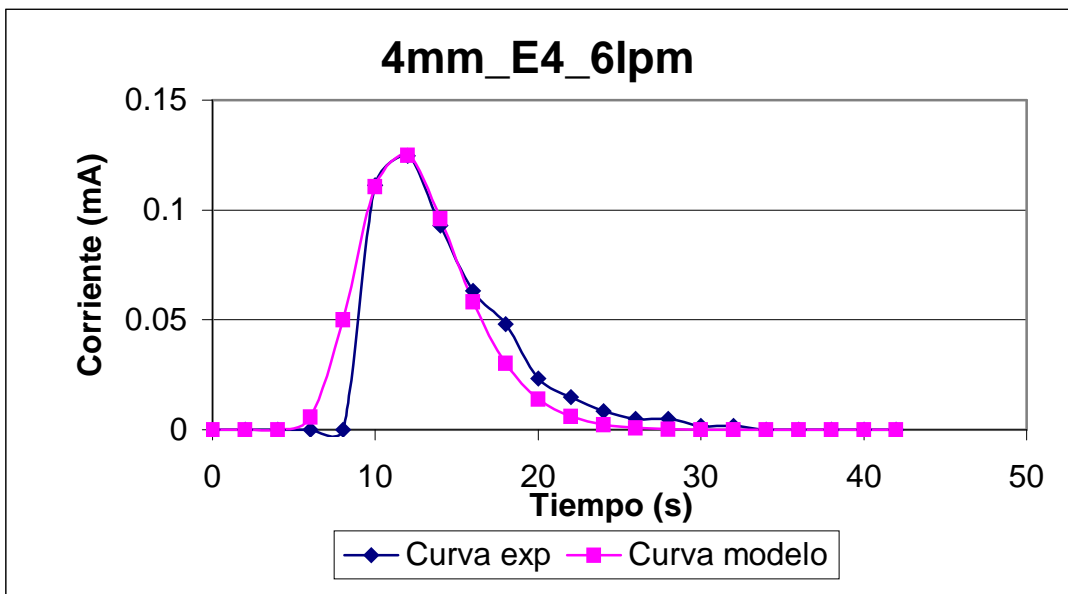
**Figura 31.-** Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 4 a un litro por minuto.



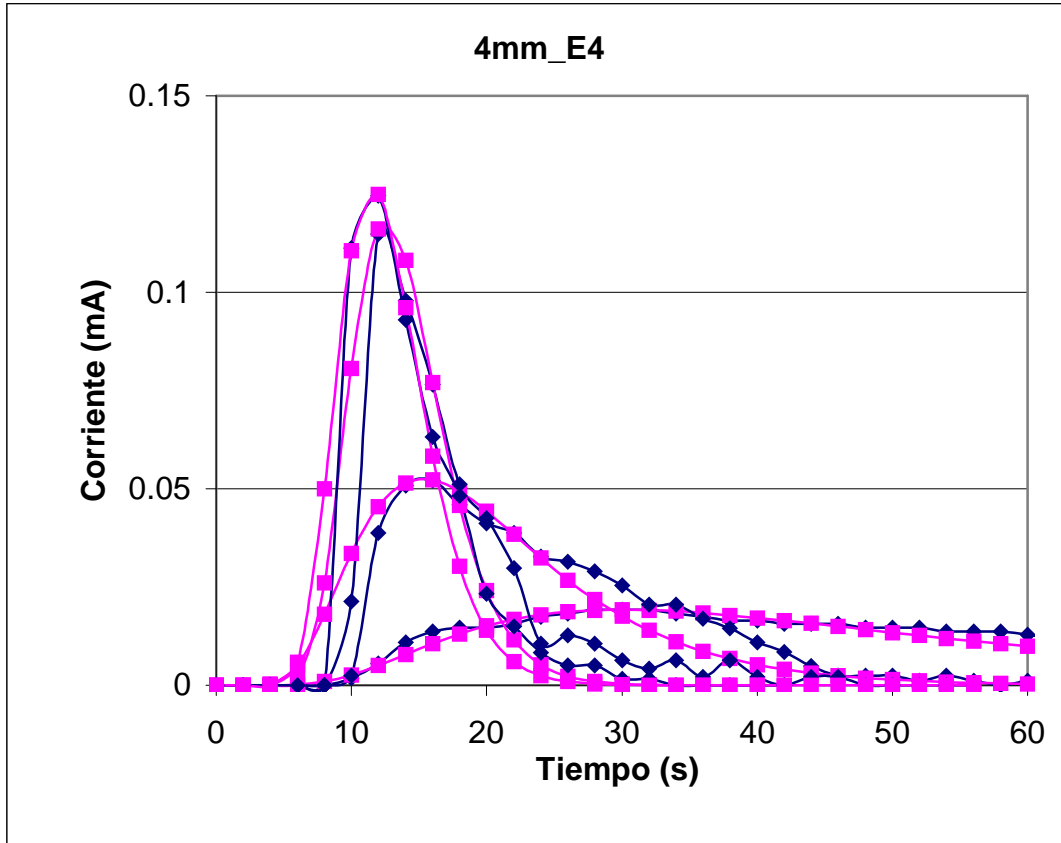
**Figura 32.-** Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 4 a dos litros por minuto.



**Figura 33.-** Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 4 a cuatro litros por minuto.



**Figura 34.-** Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 4 a seis litros por minuto.



**Figura 35.-** Distribución del tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 4.

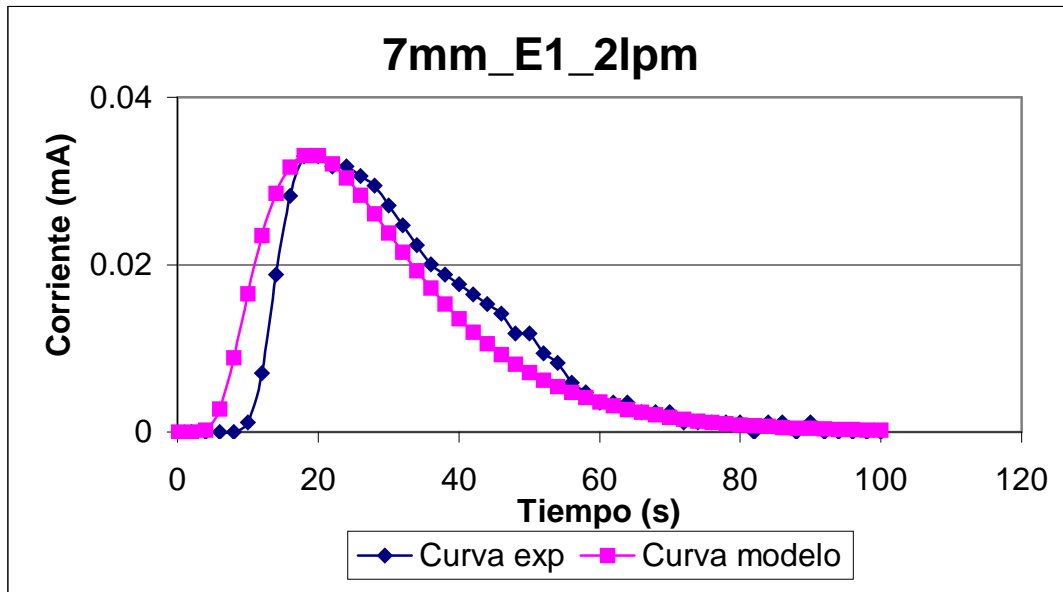
En las figuras 31-34 se muestran los resultados de las pruebas de distribución de tiempo de residencia a 4 mm de gap, para la entrada 4 a los cuatro flujos usados, en ellas también se observa que al aumentar el flujo se presenta una mayor semejanza entre las curvas experimental y modelo, por lo que es mejor usar flujos altos.

La figura 35 presenta los gráficos superpuestos de la entrada 4 a 4 mm de gap, en ella es posible observar un decremento primero exponencial y después asintótico del tiempo de residencia promedio conforme se aumenta el flujo. En esta figura también se observa que las semejanzas entre las curvas se incrementan conforme el flujo lo hace.

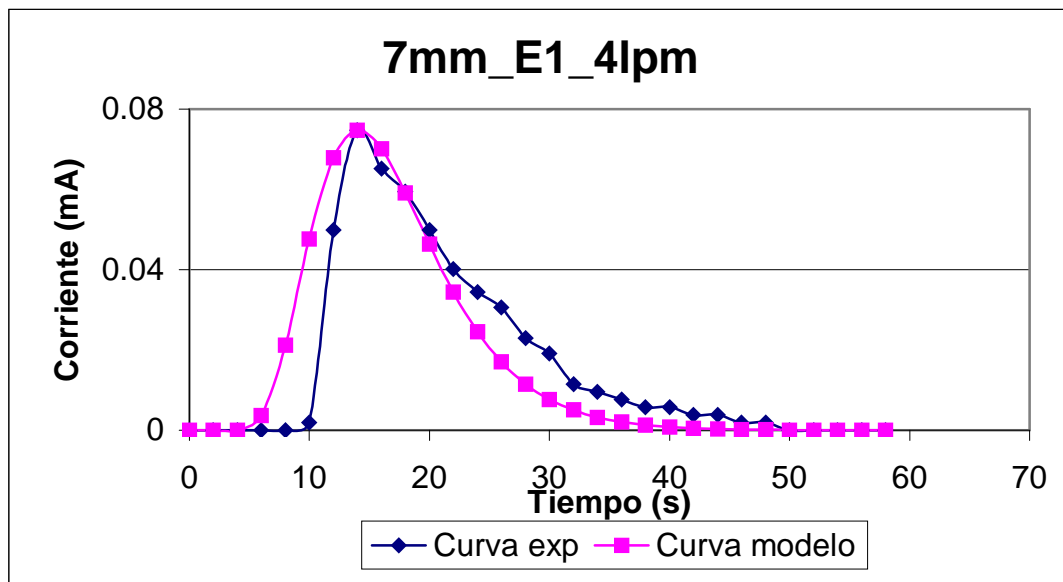
La máxima diferencia existente entre par de entradas es del 15 %.

A.8.- GAP DE 7 mm, ENTRADA 1.

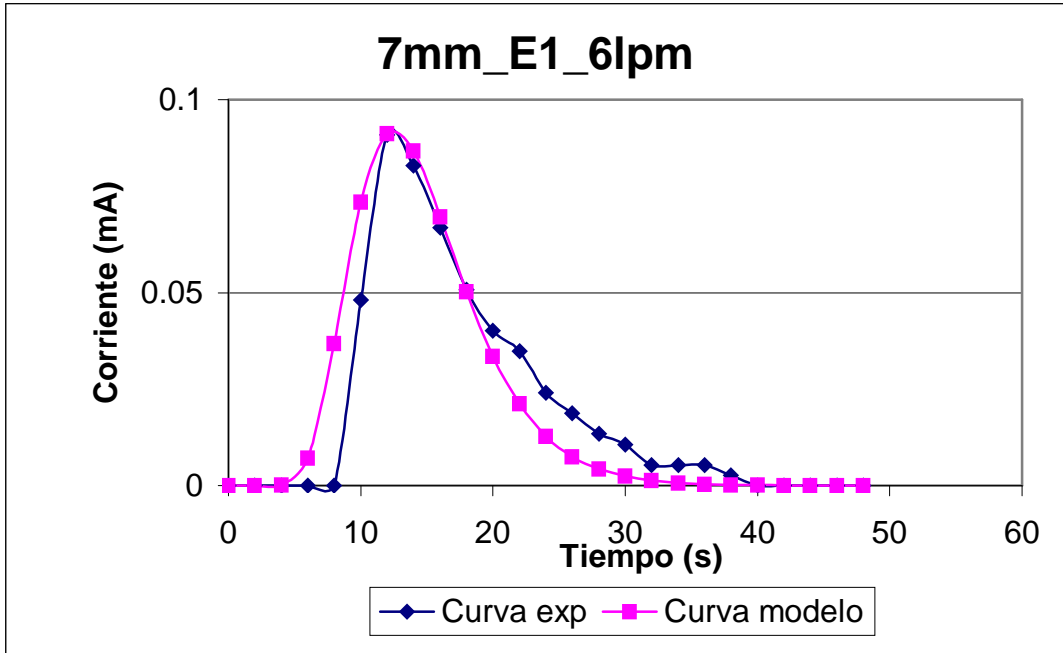
A continuación se muestran los resultados obtenidos a un gap de 7 milímetros; las siguientes 5 gráficas corresponden a la entrada 1.



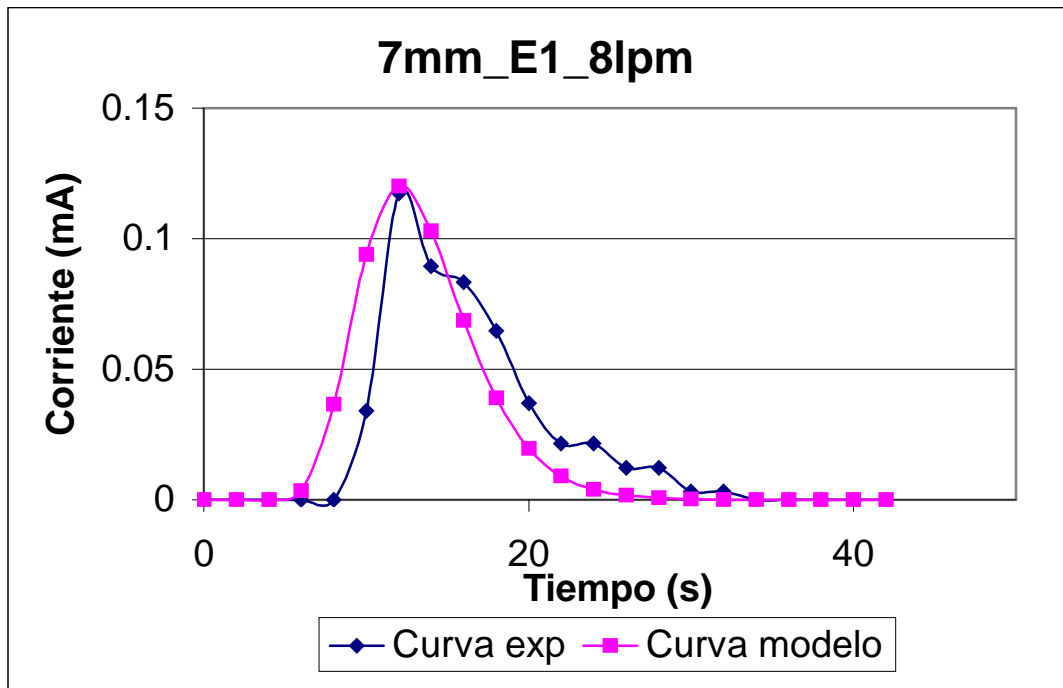
**Figura 36.-** Distribución del tiempo de residencia a un gap de 7 mm para la entrada 1 a dos litros por minuto.



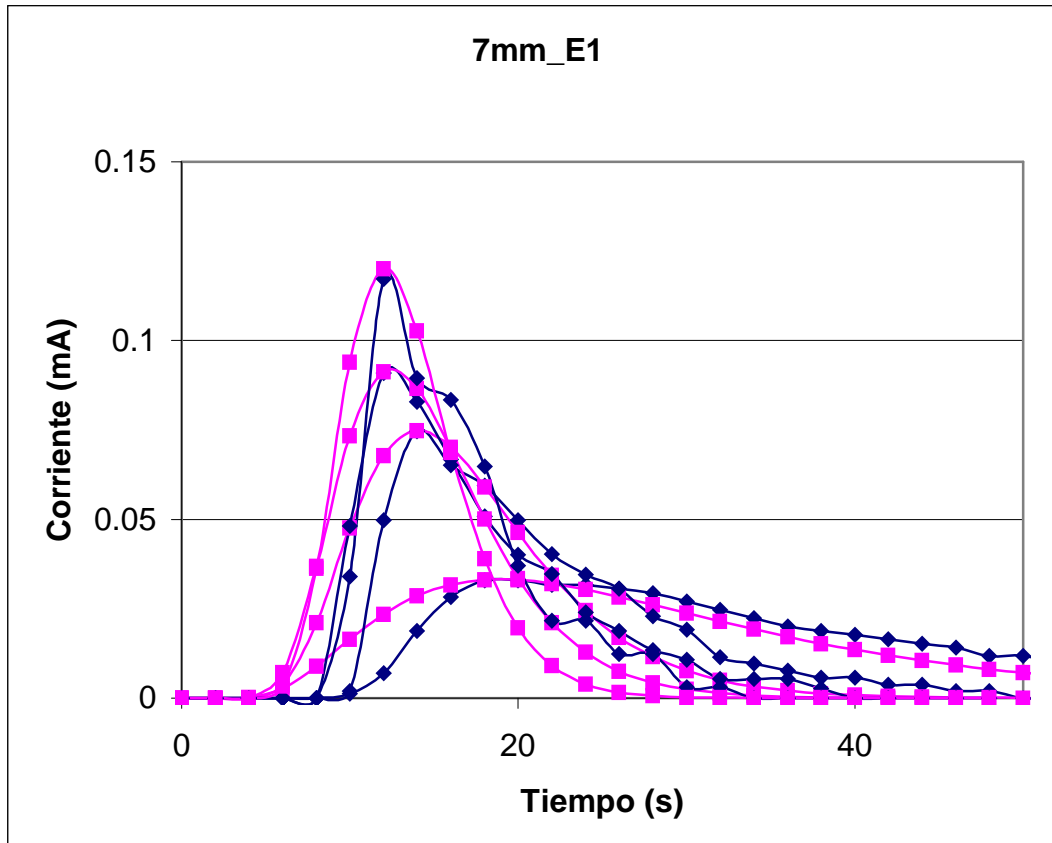
**Figura 37.-** Distribución del tiempo de residencia a un gap de 7 mm para la entrada 1 a cuatro litros por minuto.



**Figura 38.-** Distribución del tiempo de residencia a un gap de 7 mm para la entrada 1 a seis litros por minuto.



**Figura 39.-** Distribución del tiempo de residencia a un gap de 7 mm para la entrada 1 a ocho litros por minuto.



**Figura 40.-** Distribución del tiempo de residencia a un gap de 7 mm para la entrada 1

Las figuras 36-39 muestran los resultados de las pruebas de distribución de tiempo de residencia hechas con 7 mm de gap en la entrada 1, en ellas se aprecia que los mejores resultados son obtenidos a flujos intermedios, es decir a cuatro y seis litros por minuto, aunque la diferencia entre ellas es muy pequeña.

En esas gráficas se observa, al igual que en todos los casos anteriores que la altura del pico de la curva se incrementa con el flujo, lo cual es lógico pues el flujo hace que la solución salga más rápido del reactor y sean censadas con mayor intensidad a la salida de la zona de reacción.

En la figura 40 se publican los gráficos 36-39 superpuestos de forma tal que es más fácil hacer una comparación entre ellos. En esta gráfica se observa que el tiempo disminuye primero exponencial y después asintóticamente, lo cual coincide con todos los resultados previamente mostrados.

A.9.- GAP DE 7 mm, ENTRADA 2.

Al probar la entrada 2 con un gap de 7 milímetros, los resultados son:

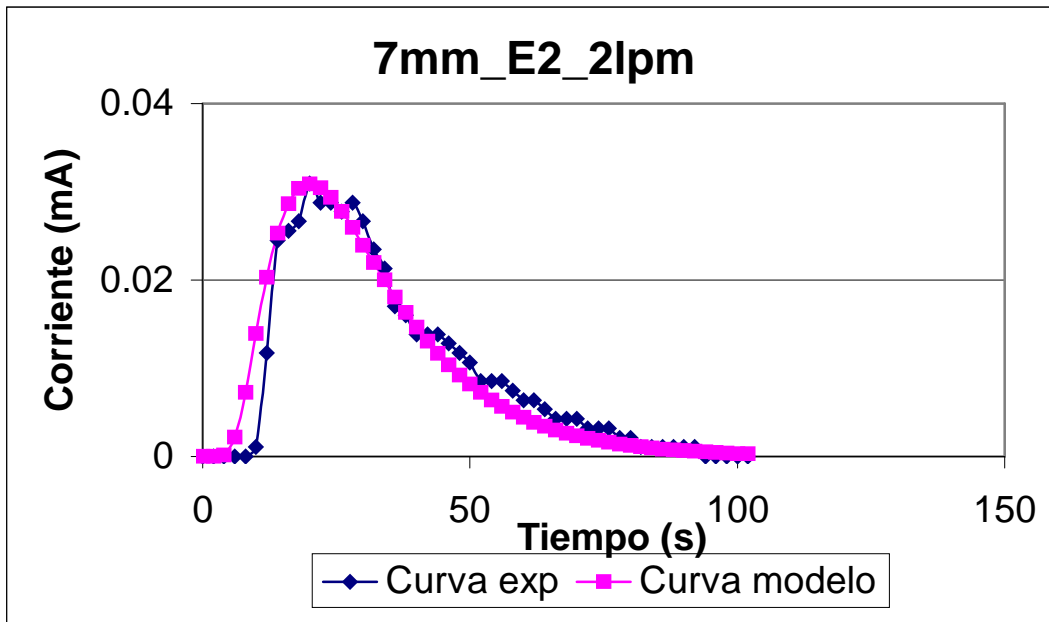


Figura 41.- Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 2 a dos litros por minuto.

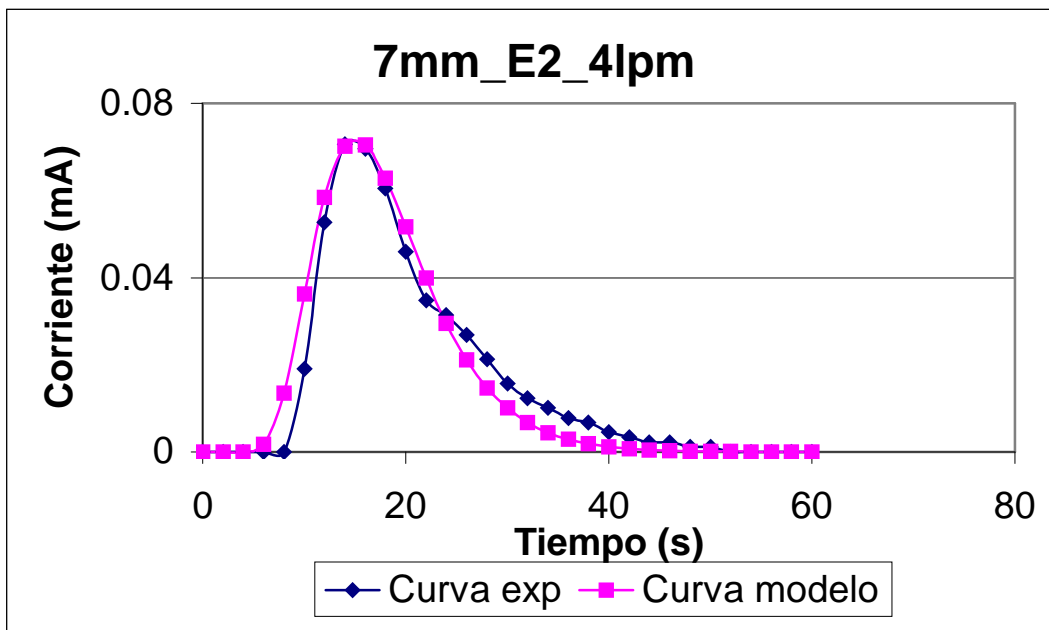
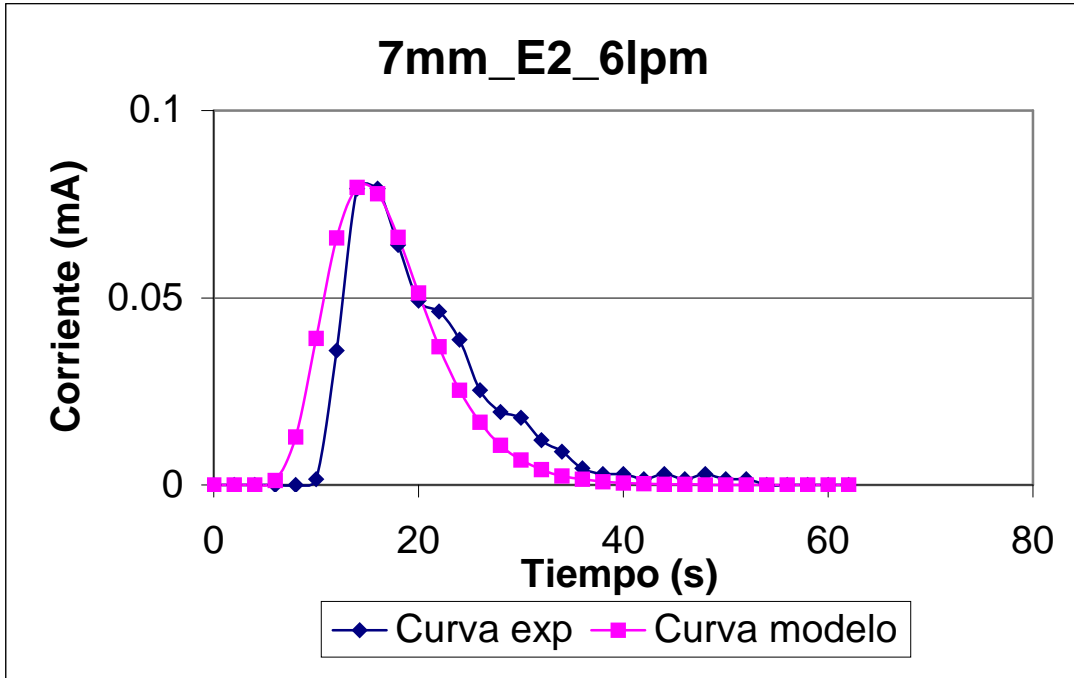
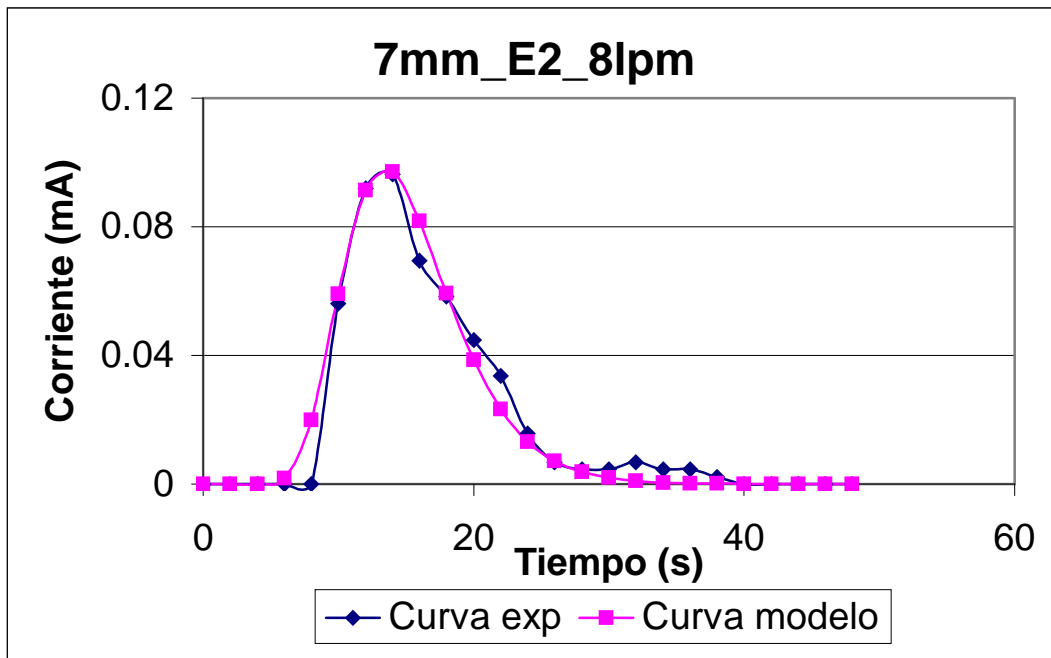


Figura 42.- Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 2 a cuatro litros por minuto.

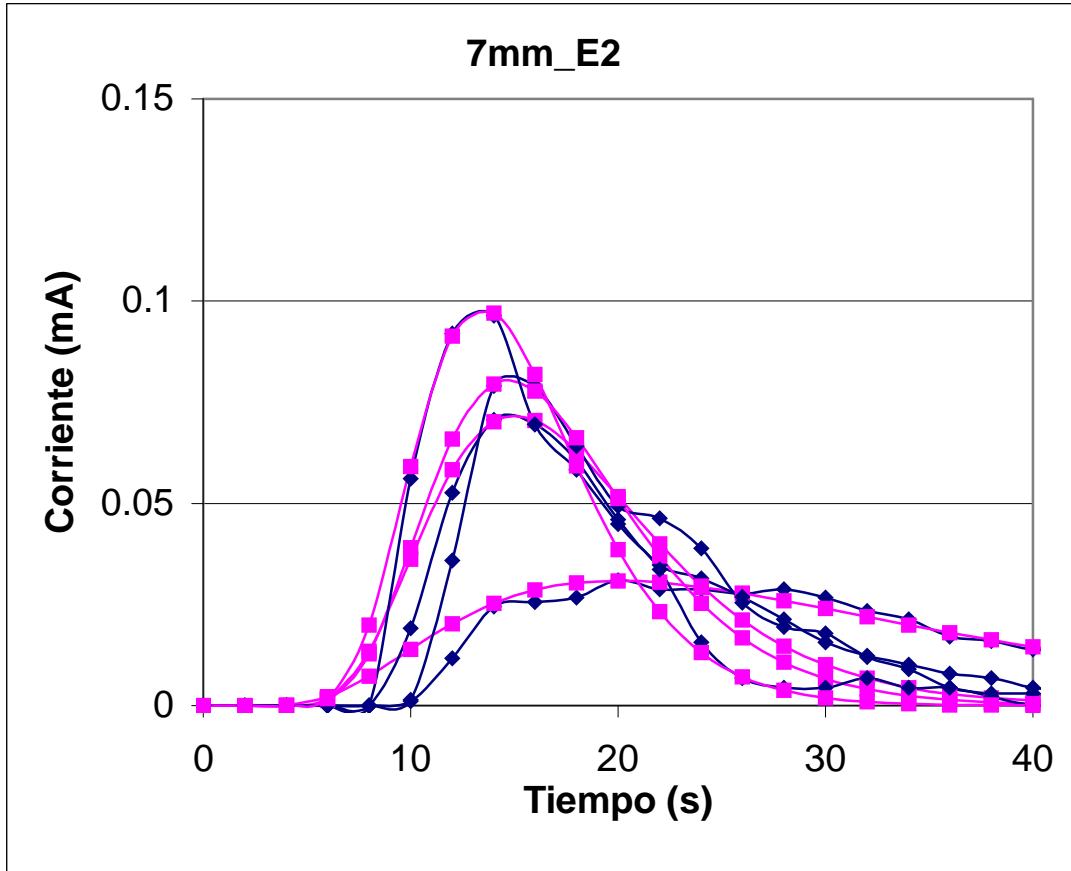




**Figura 43.-** Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 2 a seis litros por minuto.



**Figura 44.-** Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 2 a ocho litros por minuto.



**Figura 45.-** Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 2.

En las figuras 41-44 se muestran los resultados de los experimentos de distribución de tiempo de residencia hechos a un gap de 7 mm en la entrada 2, en ellas se observa que los mejores resultados son obtenidos al emplear los flujos del medio, ya que en los extremos se aleja un poco más del flujo pistón ideal predicho por el modelo de dispersión axial de Levenspiel.

La figura 45 muestra los tiempos de residencia promedio de las pruebas, en ella se aprecia que la disminución del tiempo de residencia promedio es también exponencial en un principio y después asintótica, haciéndose congruentes estos resultados con los ya obtenidos.

A.10.- GAP DE 7 mm, ENTRADA 3.

Las siguientes 5 gráficas muestran los resultados obtenidos para las pruebas hechas con el gap de 7 milímetros pero con la entrada 3.

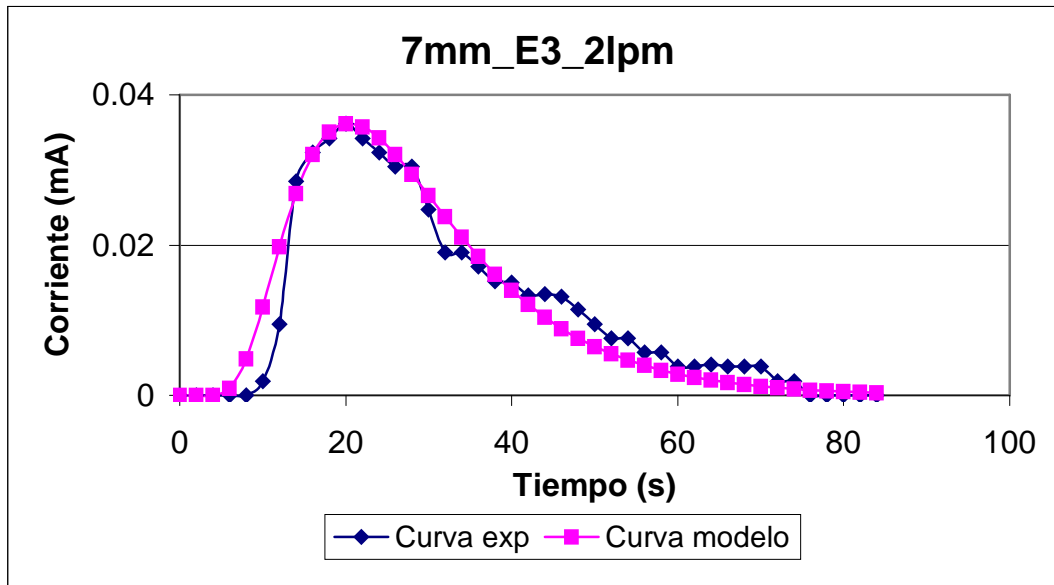


Figura 46.- Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 3 a dos litros por minuto.

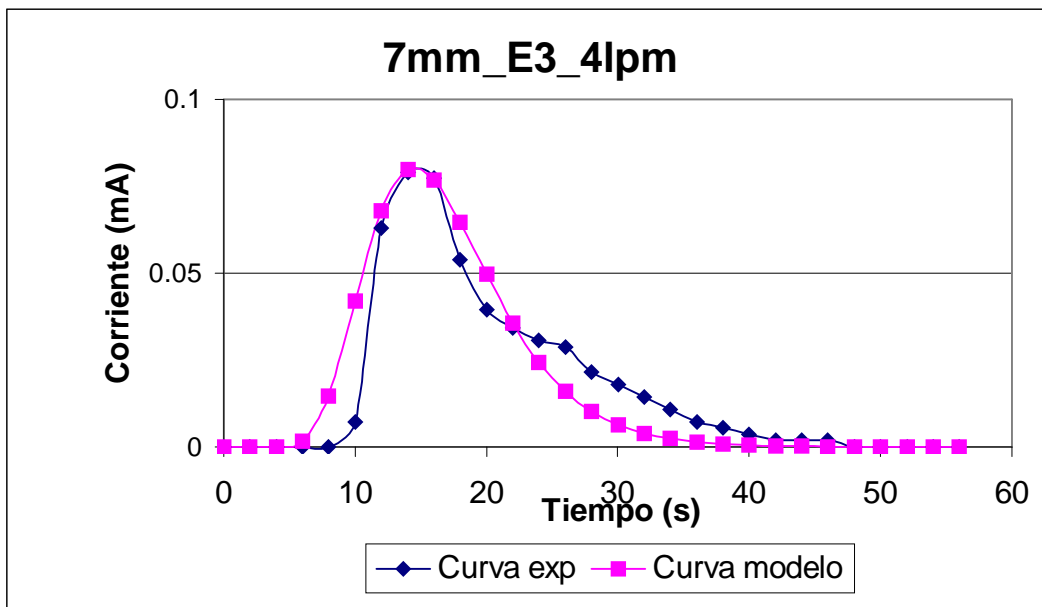
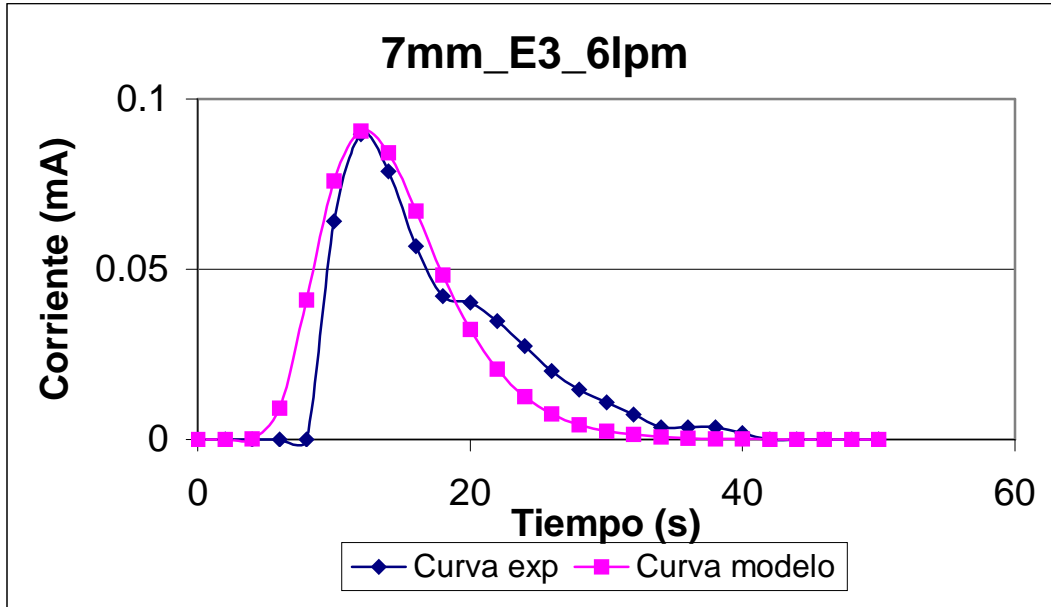
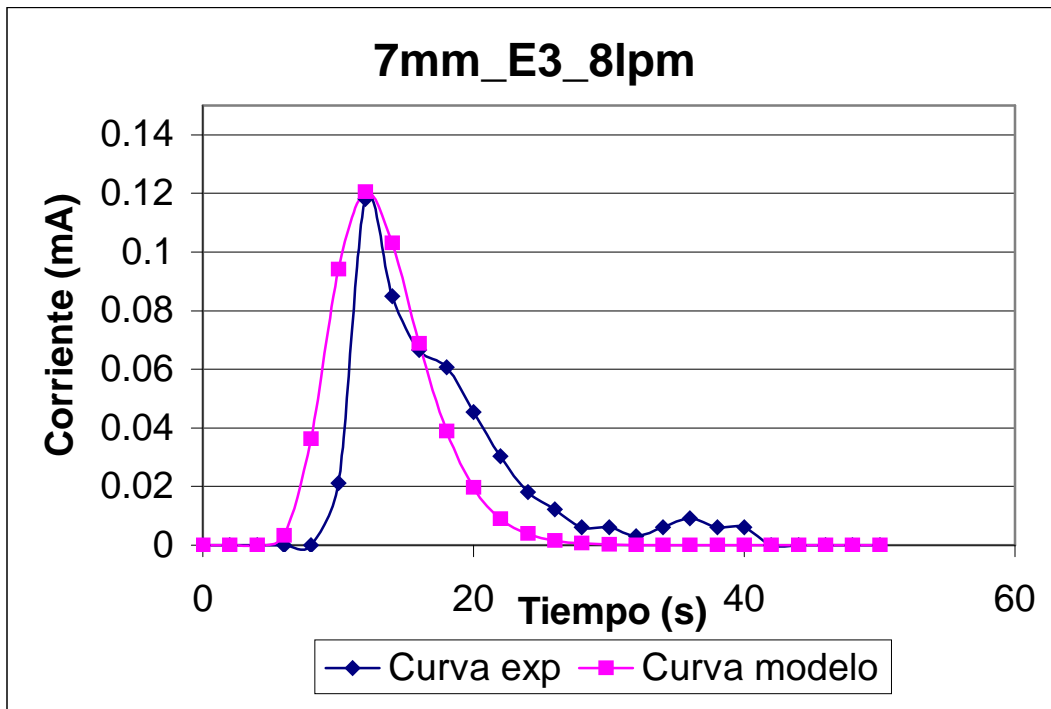


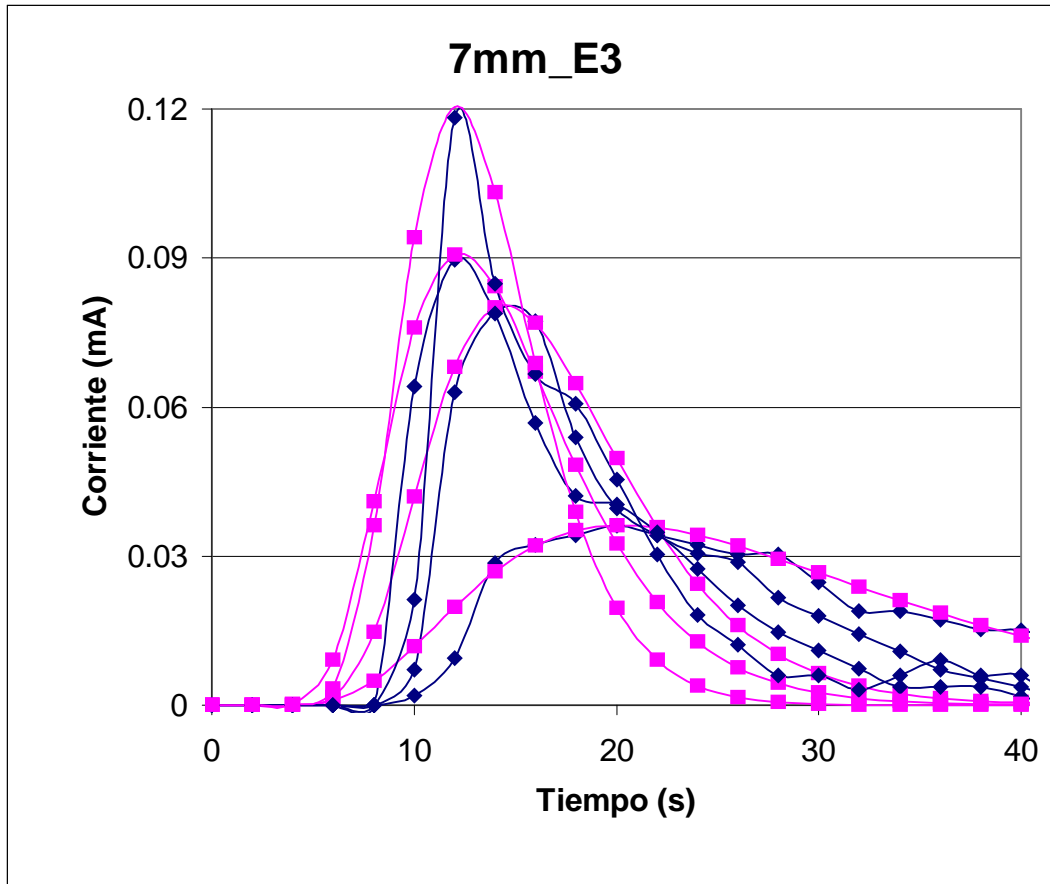
Figura 47.- Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 3 a cuatro litros por minuto.



**Figura 48.-** Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 3 a seis litros por minuto.



**Figura 49.-** Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 3 a ocho litros por minuto.



**Figura 50.-** Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 3.

Las figuras 46-49 muestran los resultados de las pruebas de distribución de tiempo de residencia para un gap de 7 mm en la entrada 3, en ellas se aprecia que existe una gran similitud entre las curvas experimental y modelo, siendo la más alejada la de flujo más bajo.

La gráfica de la figura 50 muestra los tiempos de residencia promedio de las pruebas hechas a 7 mm en la entrada 3, ahí se aprecia una disminución no lineal del tiempo conforme al flujo, este cambio es primero exponencial y después asintótico, lo cual coincide con los resultados previos.

A.11.- GAP DE 7 mm, ENTRADA 4.

A continuación se presentan las gráficas correspondientes a 7 milímetros de gap, entrada 4.

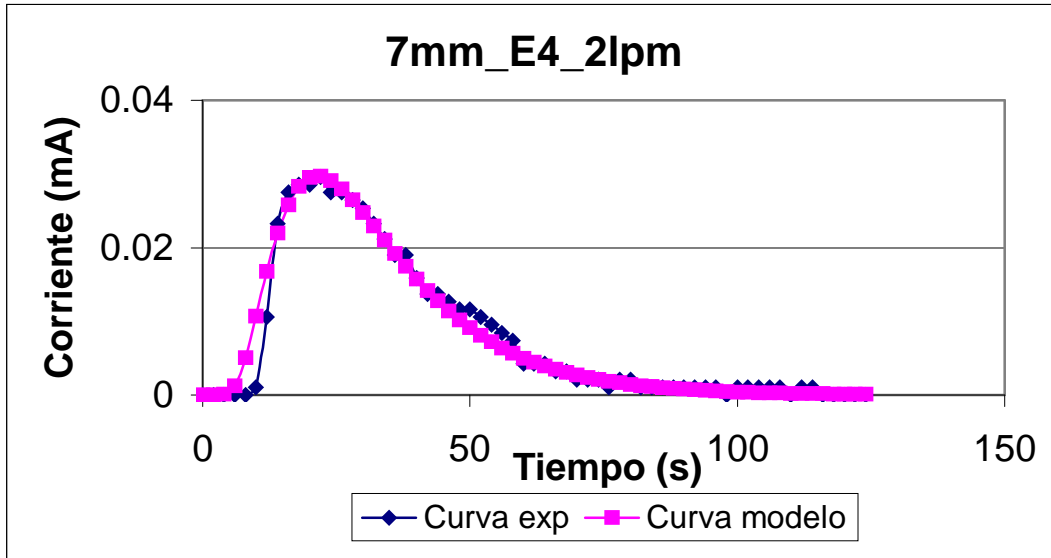


Figura 51.- Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 4 a dos litros por minuto.

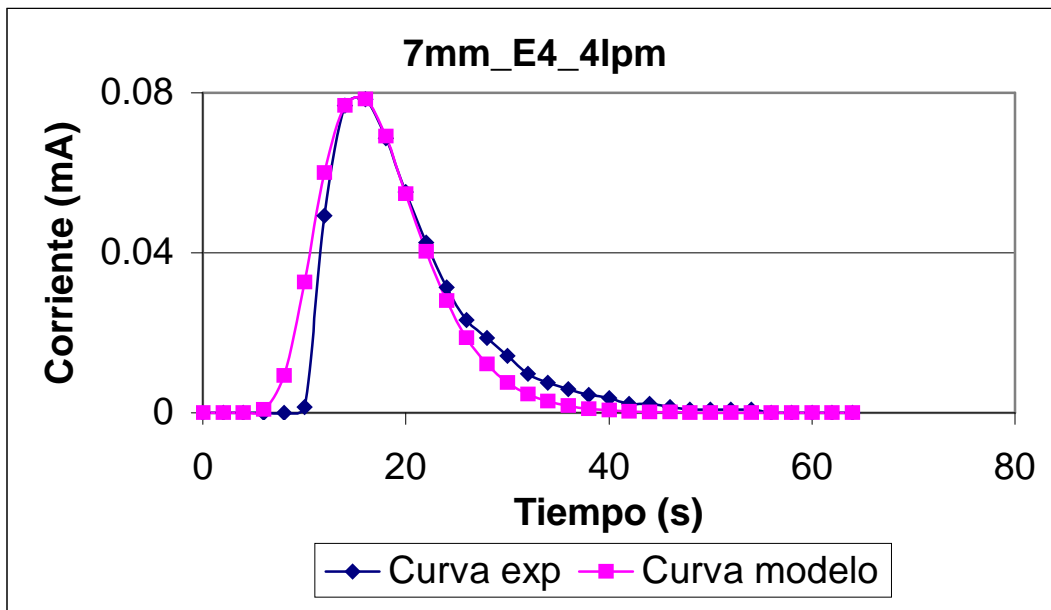
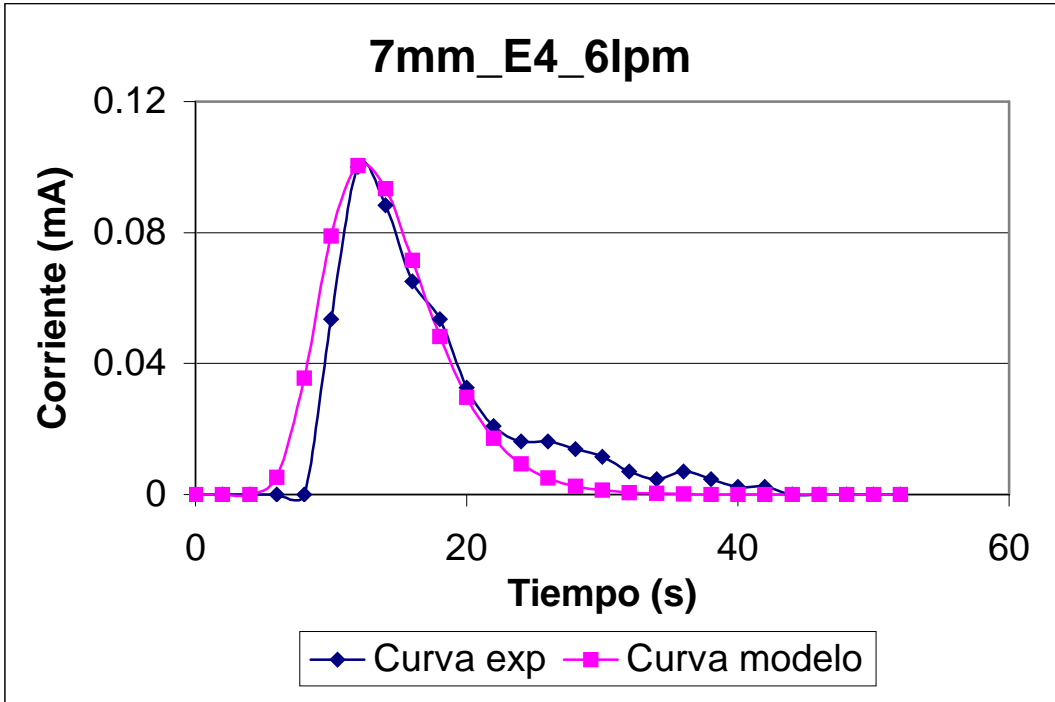
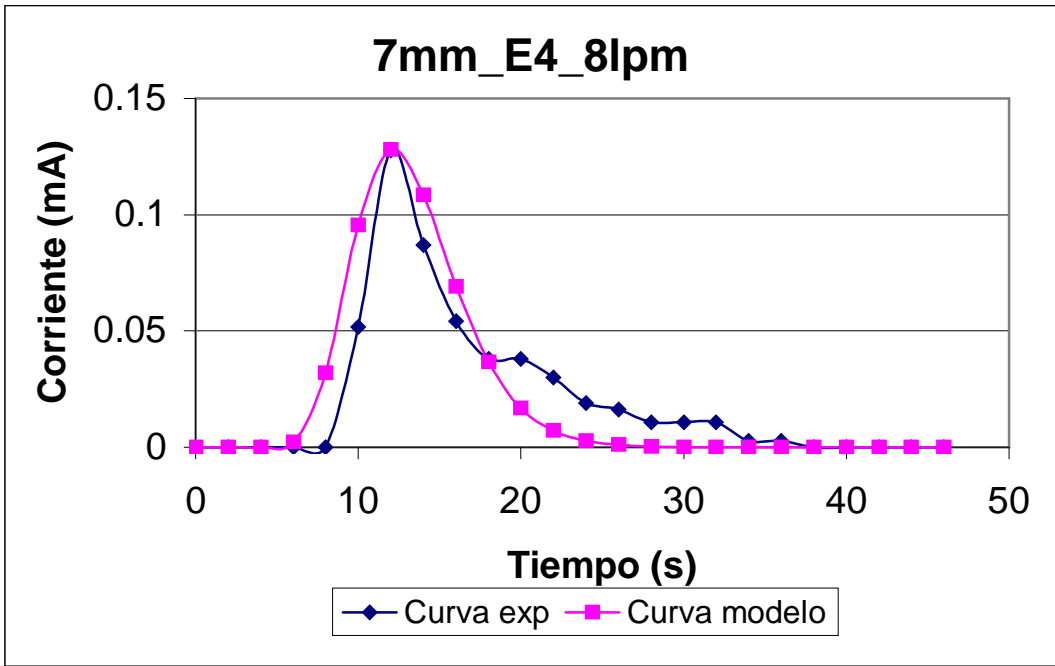


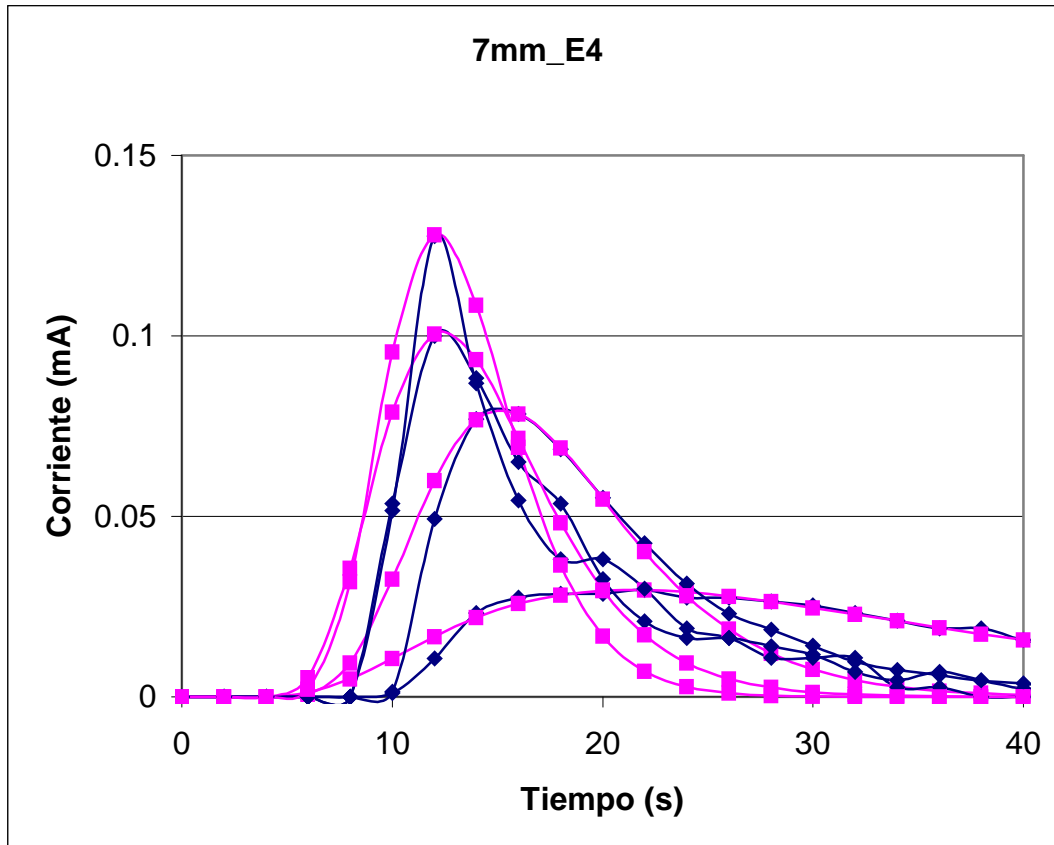
Figura 52.- Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 4 a cuatro litros por minuto.



**Figura 53.-** Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 4 a seis litros por minuto.



**Figura 54.-** Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 4 a ocho litros por minuto.



**Figura 55.-** Distribución del tiempo de residencia con un gap de 7 mm en la entrada 4.

En las figuras 51-54 se muestran los resultados de las pruebas de distribución de tiempo de residencia en la celda al tener un gap de 7 mm en la entrada 4. En ellas se aprecia una gran similitud entre las curvas experimental y modelo, siendo las mejores las de los flujos centrales, lo cual coincide con los resultados obtenidos con anterioridad.

La figura 55 muestra que en este caso la disminución del tiempo de residencia promedio es asintótico, resultado congruente también con lo esperado.

La diferencia máxima entre las gráficas para la misma condición pero a diferente entrada es aproximadamente del 18 %.



## ANEXO B

En la tabla I de este anexo presentan los tiempos de residencia promedio para todas las pruebas.

**Tabla I.- TIEMPO DE RESIDENCIA  
PROMEDIO Vs FLUJO**

<b>Tiempo de residencia promedio Vs Flujo</b>				
<b>Gap</b>	<b>Tiempo (s)</b>			
<b>2mm</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
<b>Flujo (lpm)</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
0.5	33	36	35	32
1	19	16	16	18
2	14	13	13	14
4	11	11.5	12	11
<b>4mm</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
<b>Flujo (lpm)</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
1	34	36	36	35
2	18	16	15	17
4	13	12.5	12.5	13
6	11.5	11	11	11.7
<b>7mm</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
<b>Flujo (lpm)</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
2	23	23	23	23
4	14	15	15	15
6	12.8	13.8	12.5	12.5
8	11.8	12	11.5	11.8

La tabla II de este anexo presenta los valores del número de Péclet en función del flujo. Nótese que en todos los casos el valor del número adimensional se incrementa conforme se aumenta el flujo, lo cual indica que es recomendable operar a flujos altos. Además, esto se une con que las curvas experimental y modelo a flujos altos son más parecidas.

**Tabla II.- NÚMERO DE PÉCLET Vs FLUJO.**

<b>Péclet Vs flujo</b>				
<b>Gap</b>	<b>Número de Péclet</b>			
<b>2mm</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
<b>Flujo (lpm)</b>				
<b>0.5</b>	3.7	2.7	3.4	4.2
<b>1</b>	6.4	7.2	7	6.3
<b>2</b>	19.4	11	12.5	12.6
<b>4</b>	24.5	67	70	25.1
<b>4mm</b>				
<b>Flujo (lpm)</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
<b>1</b>	5.7	7.6	7.4	5.8
<b>2</b>	11.6	11.9	13.2	16.5
<b>4</b>	26	21.8	25.8	28.2
<b>6</b>	29.9	29.5	40.2	32
<b>7mm</b>				
<b>Flujo (lpm)</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
<b>2</b>	6.2	6.7	8.2	7
<b>4</b>	16.5	15.1	17.8	16.4
<b>6</b>	17.8	16.9	17.2	19.8
<b>8</b>	28.3	30.7	31.4	27.1

La tabla III de este anexo muestra los valores del coeficiente de dispersión axial en función del flujo para los 3 gaps empleados.

**Tabla III.- COEFICIENTE DE DISPERSIÓN AXIAL Vs FLUJO.**

<b>Coeficiente de dispersión axial Vs flujo</b>				
<b>Gap</b>	<b>Coeficiente de dispersión axial (cm<sup>2</sup>/s)</b>			
<b>2mm</b>				
<b>Flujo (lpm)</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
<b>0.5</b>	17.9	24.6	19.5	15.8
<b>1</b>	20.7	18.4	18.9	21
<b>2</b>	13.7	24.2	21.3	21.1
<b>4</b>	21.7	7.9	7.6	21.2
<b>4mm</b>				
<b>Flujo (lpm)</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
<b>1</b>	11.6	8.7	8.96	11.4
<b>2</b>	11.4	11.1	10	8
<b>4</b>	10.21	12.2	10.29	9.4
<b>6</b>	13.1	13.5	9.9	12.5
<b>7mm</b>				
<b>Flujo (lpm)</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
<b>2</b>	12.2	11.3	9.26	10.8
<b>4</b>	9.2	10.1	8.5	9.3
<b>6</b>	12.8	13.5	13.2	11.5
<b>8</b>	10.7	9.9	9.7	11.2

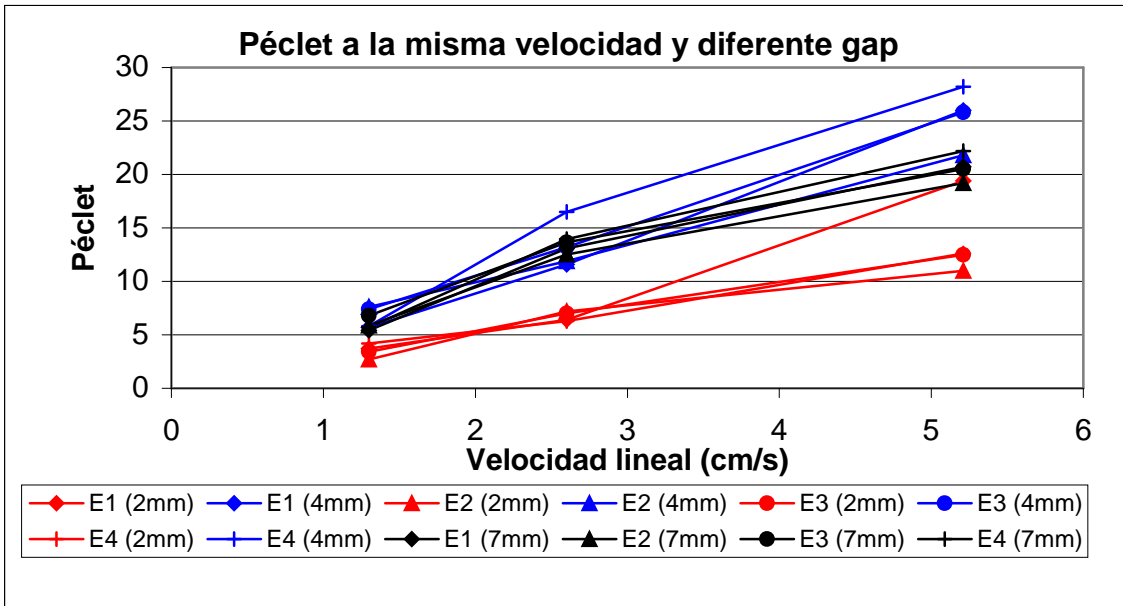
La tabla IV de este anexo muestra un resumen de los valores del tiempo de residencia promedio, número de Péclet y coeficiente de dispersión axial obtenidos durante las pruebas experimentales.

**Tabla IV.- TIEMPO DE RESIDENCIA PROMEDIO, NÚMERO DE PÉCLET Y COEFICIENTE DE DISPERSIÓN AXIAL Vs FLUJO.**

Flujo (lpm)	Tiempo de residencia promedio (s)			Péclet			Coeficiente de dispersión axial (cm <sup>2</sup> /s)			
	2mm	4mm	7mm	2mm	4mm	7mm	2mm	4mm	7mm	
0.5	40	36		2.3	2.7		28.83	24.6		
1	20.5	16		7.3	7.2		18.16	18.4		
2	14.2	13		17.5	11		15.18	24.2		
4	10.5	11.5		55	67		9.6	7.9		
1		25	36		9.8	7.6		6.77	8.7	
2		17	16		15.6	11.9		8.5	11.1	
4		12.5	12.5		28	21.8		9.49	12.2	
6		12	11		30	29.5		13.28	13.5	
2			17.5	23		19.2	6.7		3.95	11.3
4			14.5	15		26	15.1		5.84	10.1
6			13.7	13.8		30.5	16.9		7.46	13.5
8			13	12		31	30.7		9.79	9.9

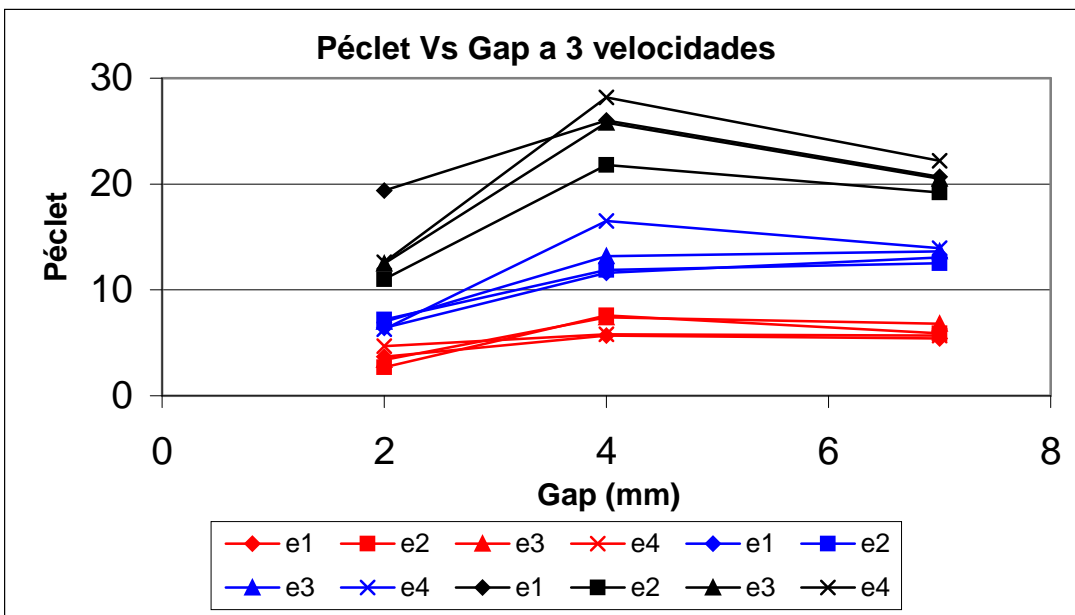
lpm = litros por minuto  
 negro = ángulo grande  
 azul = ángulo principal

A continuación se presentan las gráficas de Péclet y coeficiente de dispersión axial a diferentes condiciones. La figura 1 de este anexo muestra el comportamiento del número de Péclet a la misma velocidad en los 3 gaps empleados.



**Figura 1.-** Comportamiento del número de Péclet a una misma velocidad pero a diferente gap.

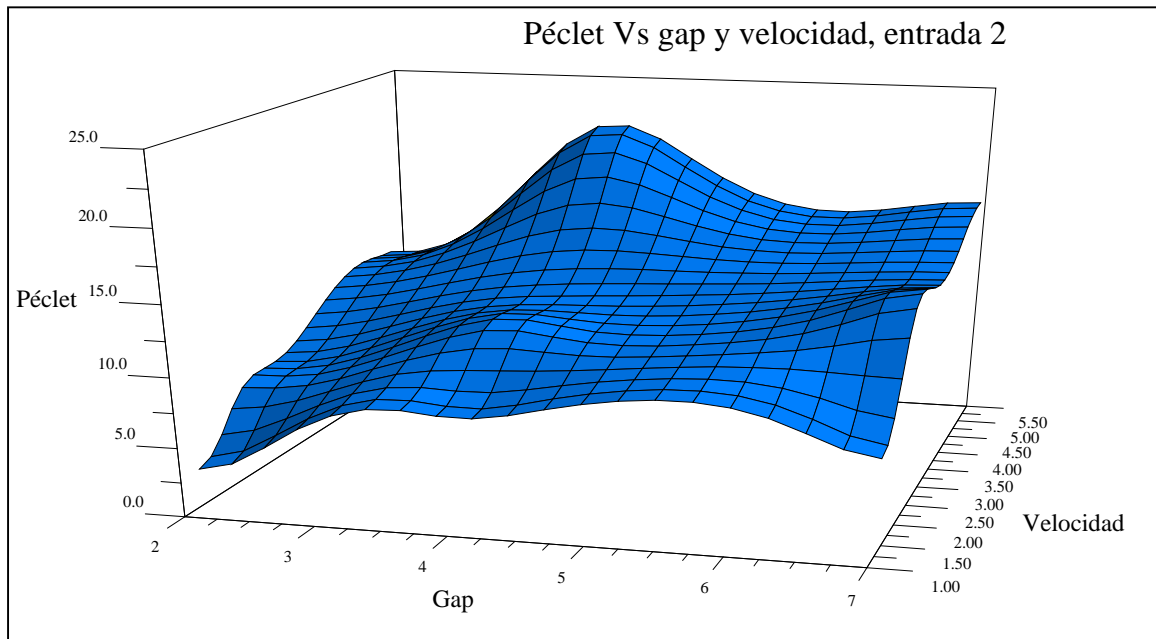
La figura 2 de este anexo muestra el comportamiento del número de Péclet a las diferentes velocidades pero al mismo gap.



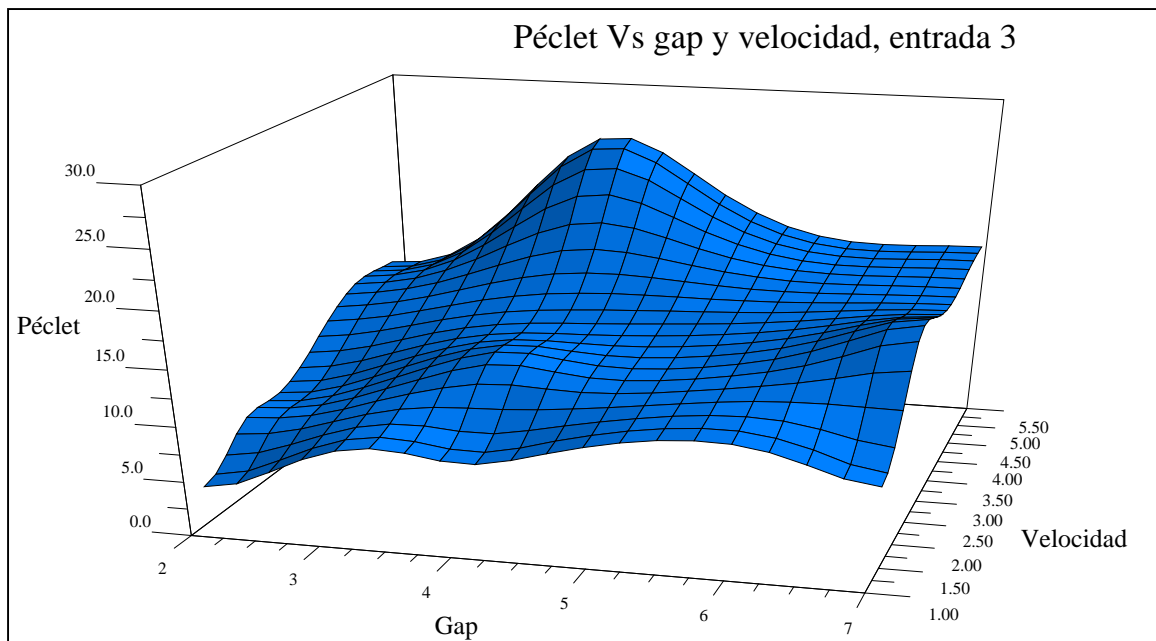
rojo = 1.3 cm/s  
 azul = 2.6 cm/s  
 negro = 5.21 cm/s

**Figura 2.-** Comportamiento del número de Péclet al mismo gap y a diferente velocidad.

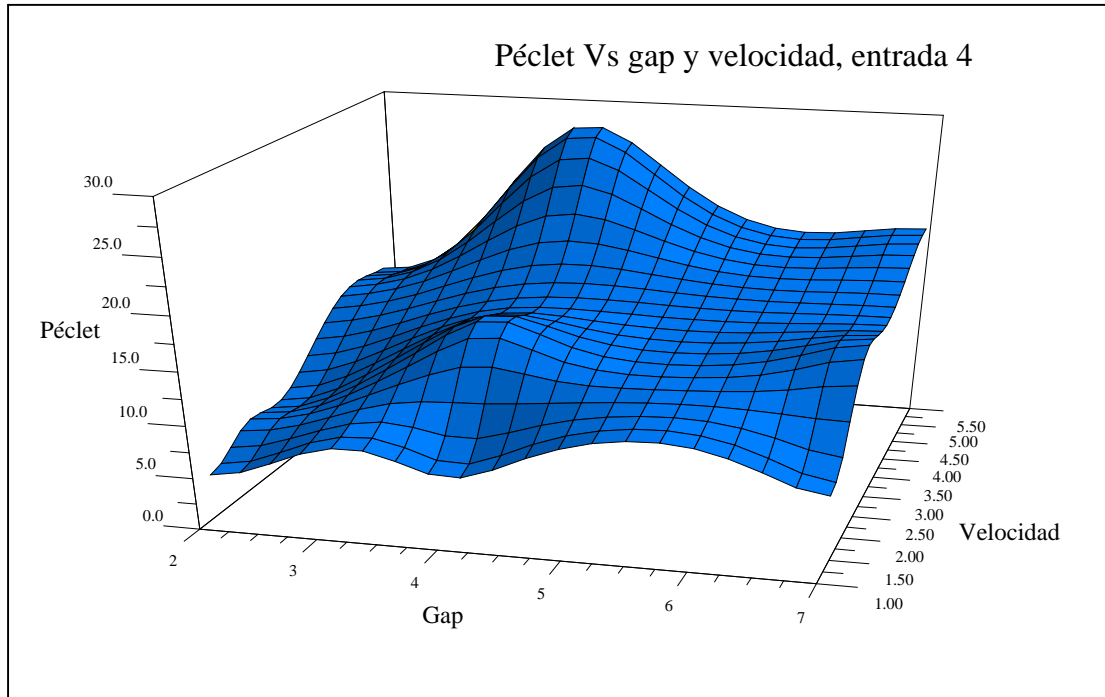
Las figuras 3-5 de este anexo muestran las gráficas de tres dimensiones del número de Péclet en función del gap y la velocidad lineal.



**Figura 3.-** Efecto del gap y la velocidad lineal sobre el número adimensional Péclet en la entrada 2.



**Figura 4.-** Efecto del gap y la velocidad lineal sobre el número adimensional Péclet en la entrada 3.

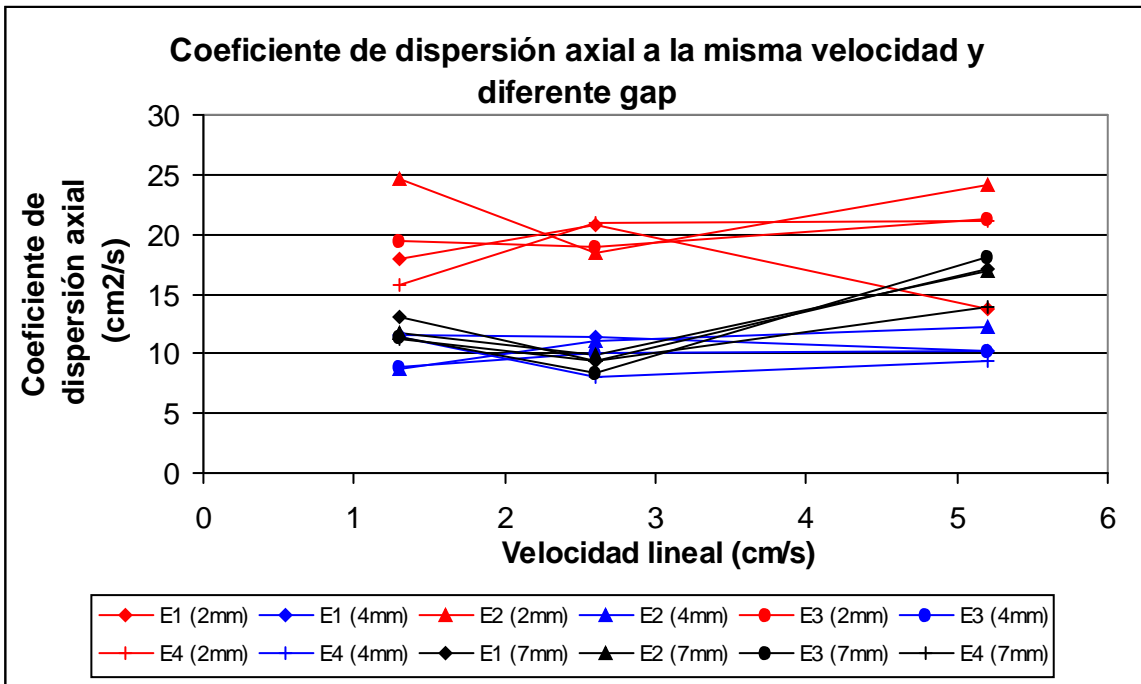


**Figura 5.-** Efecto del gap y la velocidad lineal sobre el número adimensional Péclet en la entrada 3.

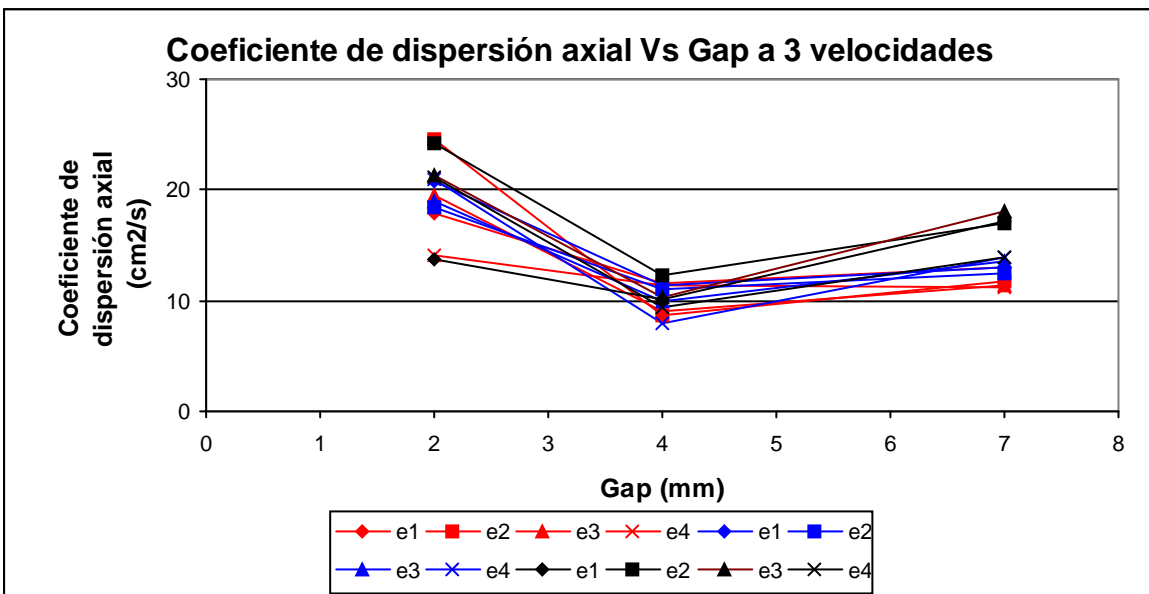
Las figuras 6 y 7 muestran el comportamiento del coeficiente de dispersión axial con respecto a la velocidad y al gap.

La figura 6 muestra el comportamiento del coeficiente de dispersión axial para los 3 gaps a 3 velocidades iguales; en ella se aprecia que el valor del coeficiente de dispersión axial es más alto cuando el gap es de 2 mm, más pequeño para 4 mm e intermedio (o prácticamente igual a 4 mm ) para 7 mm de gap.

En la figura 7 se aprecia que, en general, la dispersión axial más pequeña se presenta a 4 mm de gap. Se asume que estos resultados son válidos para las condiciones de ángulo, gaps, velocidades y sobre todo el promotor de turbulencia empleado en estas pruebas.



**Figura 6.-** Comportamiento del coeficiente de dispersión axial a una misma velocidad pero a diferente gap.



rojo = 1.3 cm/s  
 azul = 2.6 cm/s  
 negro = 5.21 cm/s

**Figura 7.-** Comportamiento del coeficiente a la misma velocidad y a diferente gap.



## ANEXO C

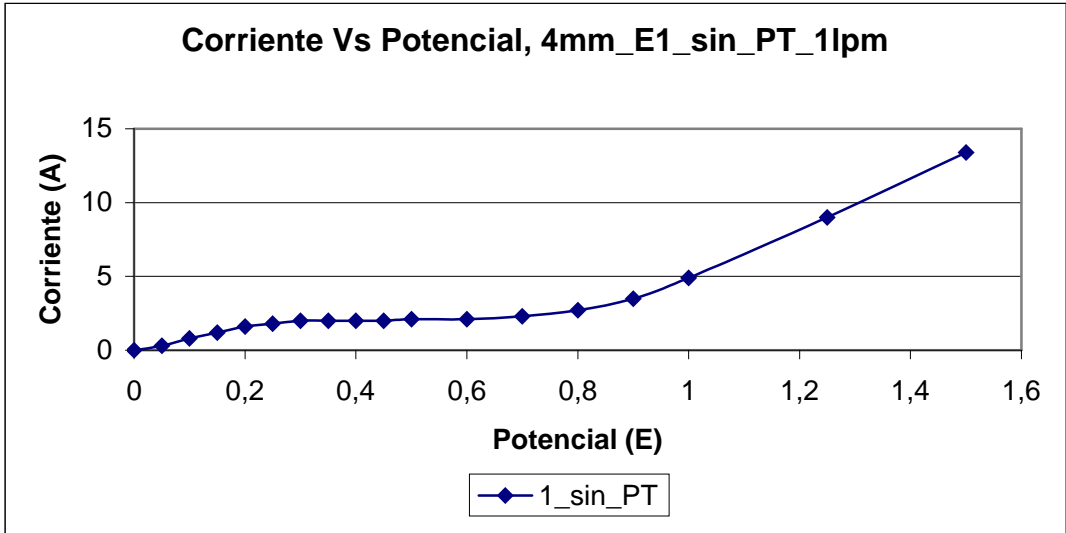
### OBTENCIÓN DE CORRIENTE LIMITE

La técnica de la corriente límite es descrita ampliamente en la literatura, a continuación únicamente se dará una breve explicación.

Al variar la diferencia de potencial entre 2 electrodos, la corriente fluye entre ellos hasta que alcanza cierto valor esta diferencia; si se llega al valor de oxido-reducción de un elemento, la corriente aumenta rápidamente debido a la reacción de este elemento, pero en ciertos valores de diferencia de potencial la corriente no incrementa ya que la fuerza de la diferencia de potencial es compensada por la cantidad de iones que llegan a la superficie del electrodo (difusión de la especie electroactiva), y es a este rango al cual se obtiene una corriente prácticamente constante o límite, ese valor constante es conocido como la *corriente límite*.

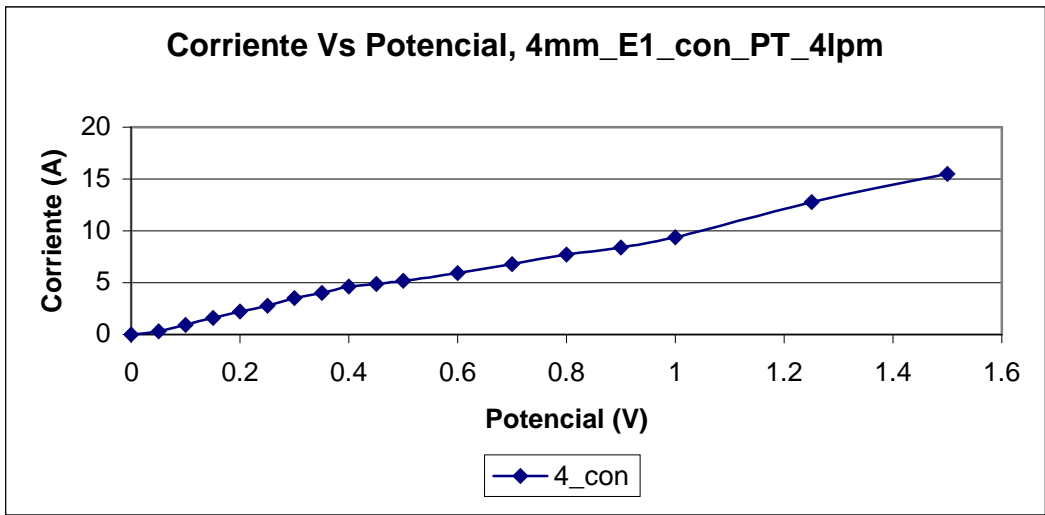
Después de este intervalo de diferencia de potencial, la corriente aumenta debido a que se llega a valores en los que se *atacan* otros iones, ya sea otra especie electroactiva o los iones del solvente.

Para obtener la corriente límite de los barridos de potencial se parte de la gráfica corriente-potencial, por ejemplo, en la figura 1 de este anexo se presenta este barrido para un gap de 4 mm, en la entrada 1 a un litro por minuto sin promotor de turbulencia.



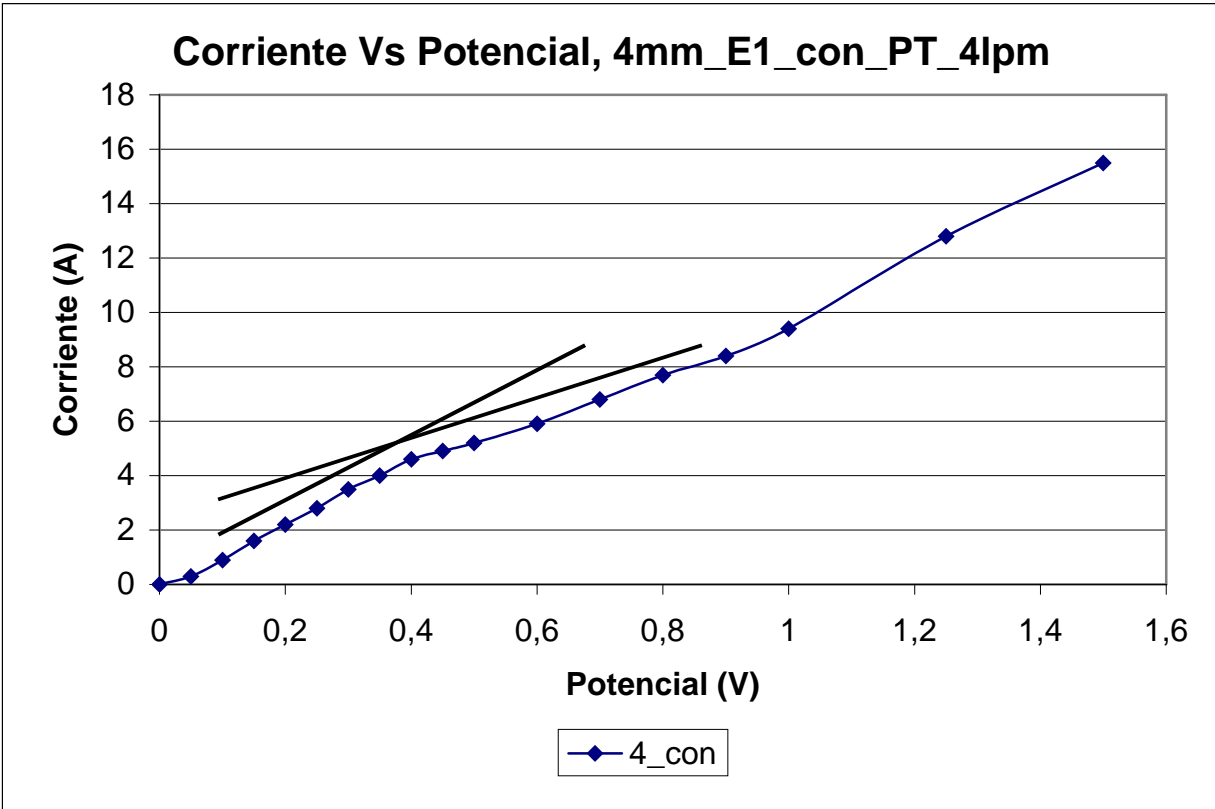
**Figura 1.-** Barrido de potencial para 4 mm, entrada 1, sin promotor de turbulencia.

En esta gráfica se aprecia claramente el valor de la corriente límite, esto es, se observa fácilmente que 2 amperios de corriente se mantienen constante en un rango de potencial, pero esto no siempre ocurre, es decir, hay ocasiones en que la meseta no se aprecia tan marcadamente debido por ejemplo a una alta turbulencia en la superficie de los electrodos, en esos casos se recurre a un método gráfico; un ejemplo de este tipo es mostrado en la figura 2.



**Figura 2.-** Barrido de potencial en donde la meseta de corriente límite no es muy marcada.

En estos casos, la corriente límite se obtiene [42, 84] en el punto en donde cruzan las 2 líneas de tendencia de la curva, tal como se observa en la siguiente figura 3.



**Figura 3.-** Método gráfico para obtención de corriente límite.

El punto en donde cruzan las líneas de tendencia corresponde a la corriente límite, en este caso, 4.8 amperios.

Prueba 1

Tiempo	Corriente	Tiempo	Corriente	Corr.norm	Corrnormport
0	0.00017	0	0.00017	0	0
2	0.00016	2	0.00017	0	0
4	0.00016	4	0.00017	0	0
6	0.00017	6	0.00017	0	0
8	0.00016	8	0.00017	0	0
10	0.00016	10	0.00018	0.00001	0.0001
12	0.00016	12	0.00139	0.00122	0.01464
14	0.00016	14	0.00142	0.00125	0.0175
16	0.00017	16	0.00121	0.00104	0.01664
18	0.00017	18	0.00099	0.00082	0.01476
20	0.00017	20	0.00079	0.00062	0.0124
22	0.00017	22	0.00061	0.00044	0.00968
24	0.00017	24	0.00049	0.00032	0.00768
26	0.00018	26	0.0004	0.00023	0.00598
28	0.00139	28	0.00035	0.00018	0.00504
30	0.00142	30	0.00032	0.00015	0.0045
32	0.00121	32	0.00028	0.00011	0.00352
34	0.00099	34	0.00027	0.0001	0.0034
36	0.00079	36	0.00025	0.00008	0.00288
38	0.00061	38	0.00023	0.00006	0.00228
40	0.00049	40	0.00023	0.00006	0.0024
42	0.0004	42	0.00022	0.00005	0.0021
44	0.00035	44	0.0002	0.00003	0.00132
46	0.00032	46	0.0002	0.00003	0.00138
48	0.00028	48	0.00019	0.00002	0.00096
50	0.00027	50	0.0002	0.00003	0.0015
52	0.00025	52	0.00018	0.00001	0.00052
54	0.00023	54	0.00018	0.00001	0.00054
56	0.00023	56	0.00018	0.00001	0.00056
58	0.00022	58	0.00018	0.00001	0.00058
60	0.0002	60	0.00017	0	0
62	0.0002	62	0.00017	0	0
64	0.00019	64	0.00017	0	0
66	0.0002	66	0.00017	0	0
68	0.00018	68	0.00017	0	0
70	0.00018				
72	0.00018				
74	0.00018				
76	0.00017				
78	0.00017				
80	0.00017				
82	0.00017				
84	0.00017				
86	0.00017				
88	0.00017				
90	0.00016				
92	0.00016				
94	0.00017				
96	0.00017				

98	0.00016
100	0.00017
102	0.00016
104	0.00016
106	0.00017
108	0.00016
110	0.00016
112	0.00016
114	0.00006
116	0.00005
118	0.00002

Suma	Péclet	Tiempo prom
0.01378	20	13.8
Curva exp	Curva modelo	
0	#jDIV/0!	
0	2.664E-12	
0	2.8307E-05	
0	0.003518315	
0	0.026167116	
0.000725689	0.063643299	
0.088534107	0.088898528	
0.090711176	0.090668603	
0.075471698	0.076087134	
0.059506531	0.056121369	
0.044992743	0.037846256	
0.031930334	0.023923845	
0.023222061	0.0144125	
0.016690856	0.008369471	
0.013062409	0.004723072	
0.010885341	0.002605465	
0.007982583	0.001411219	
0.007256894	0.000753024	
0.005805515	0.000396877	
0.004354136	0.000207023	
0.004354136	0.000107054	
0.003628447	5.49513E-05	
0.002177068	2.80286E-05	
0.002177068	1.42185E-05	
0.001451379	7.17875E-06	
0.002177068	3.60953E-06	
0.000725689	1.80833E-06	
0.000725689	9.03068E-07	
0.000725689	4.49714E-07	
0.000725689	2.23389E-07	
0	1.10718E-07	
0	5.47648E-08	
0	2.70399E-08	
0	1.33292E-08	
0	6.56101E-09	



## ANEXO D

### EJEMPLO NUMÉRICO DE LA OBTENCIÓN DE LAS CURVAS EXPERIMENTAL Y MODELO

Los datos obtenidos directamente de la computadora arrojan los valores mostrados en la tabla I de este anexo para la prueba de 2 mm de gap, en la entrada 1 a 2 lpm.

**Tabla I.-** Datos obtenidos directamente de la computadora.

Tiempo (s)	Corriente (mA)	30	0,00142	62	0,0002	94	0,00017
0	0,00017	32	0,00121	64	0,00019	96	0,00017
2	0,00016	34	0,00099	66	0,0002	98	0,00016
4	0,00016	36	0,00079	68	0,00018	100	0,00017
6	0,00017	38	0,00061	70	0,00018	102	0,00016
8	0,00016	40	0,00049	72	0,00018	104	0,00016
10	0,00016	42	0,0004	74	0,00018	106	0,00017
12	0,00016	44	0,00035	76	0,00017	108	0,00016
14	0,00016	46	0,00032	78	0,00017	110	0,00016
16	0,00017	48	0,00028	80	0,00017	112	0,00016
18	0,00017	50	0,00027	82	0,00017	114	0,00006
20	0,00017	52	0,00025	84	0,00017	116	0,00005
22	0,00017	54	0,00023	86	0,00017	118	0,00002
24	0,00017	56	0,00023	88	0,00017		
26	0,00018	58	0,00022	90	0,00016		
28	0,00139	60	0,0002	92	0,00016		

Primero se normalizan los valores de corriente y se hacen las operaciones necesarias para obtener las 2 curvas, teniéndose como variables independientes el número de Péclet y el tiempo de residencia promedio. Estas operaciones son mostradas en la tabla II.



**Tabla II.- Operaciones necesarias para  
obtener las dos curvas.**

Tiempo (s)	Corriente (mA)	Corriente normalizada (mA)	Corriente normalizada por tiempo (mAs)	Suma	Péclet	Tiempo prom
				0,01378	20	
				Curva exp	Curva modelo	13,8
0	0,00017	0	0	0	#¡DIV/0!	
2	0,00017	0	0	0	2,664E-12	
4	0,00017	0	0	0	2,8307E-05	
6	0,00017	0	0	0	0,00351832	
8	0,00017	0	0	0	0,02616712	
10	0,00018	0,00001	0,0001	0,00072569	0,0636433	
12	0,00139	0,00122	0,01464	0,08853411	0,08889853	
14	0,00142	0,00125	0,0175	0,09071118	0,0906686	
16	0,00121	0,00104	0,01664	0,0754717	0,07608713	
18	0,00099	0,00082	0,01476	0,05950653	0,05612137	
20	0,00079	0,00062	0,0124	0,04499274	0,03784626	
22	0,00061	0,00044	0,00968	0,03193033	0,02392384	
24	0,00049	0,00032	0,00768	0,02322206	0,0144125	
26	0,0004	0,00023	0,00598	0,01669086	0,00836947	
28	0,00035	0,00018	0,00504	0,01306241	0,00472307	
30	0,00032	0,00015	0,0045	0,01088534	0,00260546	
32	0,00028	0,00011	0,00352	0,00798258	0,00141122	
34	0,00027	0,0001	0,0034	0,00725689	0,00075302	
36	0,00025	0,00008	0,00288	0,00580552	0,00039688	
38	0,00023	0,00006	0,00228	0,00435414	0,00020702	
40	0,00023	0,00006	0,0024	0,00435414	0,00010705	
42	0,00022	0,00005	0,0021	0,00362845	5,4951E-05	
44	0,0002	0,00003	0,00132	0,00217707	2,8029E-05	
46	0,0002	0,00003	0,00138	0,00217707	1,4218E-05	
48	0,00019	0,00002	0,00096	0,00145138	7,1788E-06	
50	0,0002	0,00003	0,0015	0,00217707	3,6095E-06	
52	0,00018	0,00001	0,00052	0,00072569	1,8083E-06	
54	0,00018	0,00001	0,00054	0,00072569	9,0307E-07	
56	0,00018	0,00001	0,00056	0,00072569	4,4971E-07	
58	0,00018	0,00001	0,00058	0,00072569	2,2339E-07	
60	0,00017	0	0	0	1,1072E-07	
62	0,00017	0	0	0	5,4765E-08	
64	0,00017	0	0	0	2,704E-08	
66	0,00017	0	0	0	1,3329E-08	
68	0,00017	0	0	0	6,561E-09	

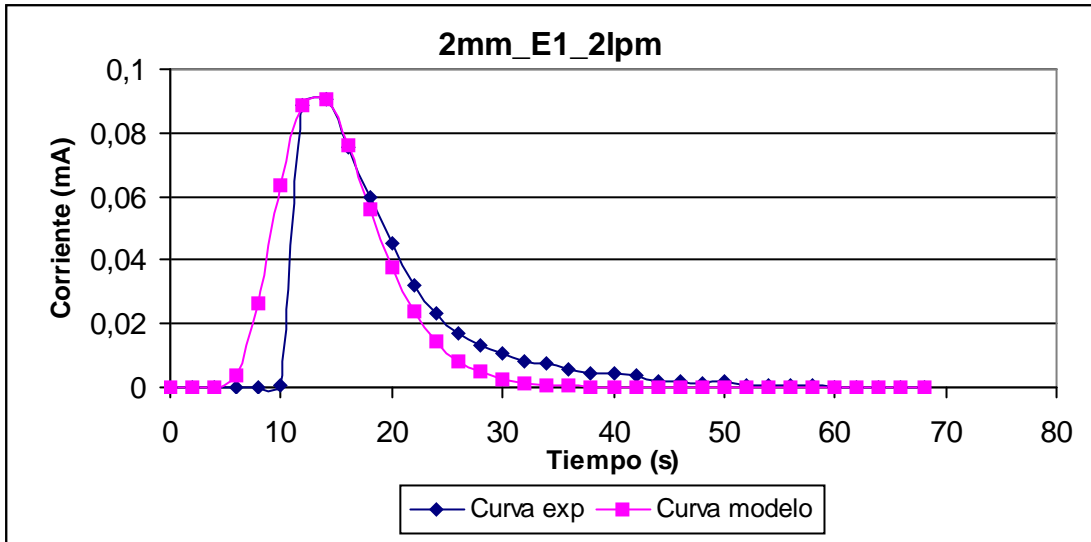
En donde

Curva exp.  $i$  = corriente normalizada  $i / (2 \cdot \text{SUMA}(\text{corriente normalizada}))$ , y

Curva modelo = La ecuación del modelo (ecuación 1).

Finalmente se grafica las columnas tiempo contra Curva exp. y curva modelo.

De esta manera se obtiene la gráfica mostrada en la figura 1 de este anexo.



**Figura 1.-** Distribución del tiempo de residencia para el gap de 2 mm en la entrada 1 a 2 lpm.

La gráfica mostrada en la figura 1 es representativa de todas las pruebas, es decir, en todos los casos se hacían variar tanto el número de Péclet como el tiempo de residencia promedio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A. M. Bernardes et al. Metal finishing. **98**, No. 1. 2000 (52-58).
2. Ain A. Sonin y R. F. Probst. Elsevier. **5**. 1968 (293-329).
3. Allen J. Bard y Larry R. Faulkner. Electrochemical methods. USA, 1980.
4. American water works association. Electrodialysis and electrodialysis reversal. USA, 1995.
5. American water works association. Tratamiento del agua por procesos de membrana. España, 1995.
6. Angélica R. Arteaga Z. Tesis. Instituto Tecnológico de Tepic. 1999.
7. Bengoa et al. Journal of applied electrochemistry. **27**. 1993 (1313-1322).
8. Boniardi et al. Journal of applied electrochemistry. **27**. 1997 (125-133).
9. C. S. Brooks. Metal recovery from industrial waste. USA, 1991.
10. Carl Hamann et al. Electrochemistry. Alemania, 1998.
11. D. N. Moir. Chemical engineering. 1982. (47-57).
12. D. Pletcher y F. Walsh. Industrial electrochemistry. Gran Bretaña, 1990.
13. D. Stankovic. Journal of applied electrochemistry. **24**. 1994 (525-530).
14. Didier Raucq. Elsevier science publishers. **91**. 1993 (163-175).
15. Douglas N. Moir. Chemical engineering. 1982.
16. E. Hertz y G. Kreysa. Principles of electrochemical engineering. Alemania, 1986.
17. Elsevier. Effective industrial membrane processes. Benefits and opportunities. Inglaterra, 1991.
18. Elsevier. Environment oriented electrochemistry. Países bajos, 1994.
19. F. Goodridge y K. Scott. Electrochemical process engineering. USA, 1995.
20. Falcon Bridge. La electrodeposición del níquel. Canadá, sin fecha.
21. Fleischmann et al. Journal of applied electrochemistry. **9**. 1979 (437-444).
22. Fleischmann y R. E. W. Jansson. Journal of applied electrochemistry. 1979 (427-435).
23. Fumio Hine. Electrode processes and electrochemical engineering. USA, 1985.
24. Gavach et al. Journal of physique. **3**, Vol. 4. 1994 (c1 233 – c1 243).

25. Geoffrey Prentice. Electrochemical engineering principles. USA, 1991.
26. H. Wendt y G. Kreysa. Electrochemical engineering. Alemania, 1999.
27. Harry M. Freeman. Manual de prevención de la contaminación industrial. México, 1998.
28. Henze, et al. Wastewater treatment. Alemania, 1997.
29. I.N. Justinijanovic y M. Fleischmann. Journal of applied electrochemistry. 1980 (143-149).
30. J. Brown et al. Journal of applied electrochemistry. **23**. 1993 (38-43).
31. J. Judd et al. Chapman y Hall. 1993 (1117-1124)
32. J. R. Ochoa G. Electrosíntesis y electrodiálisis. España, 1996.
33. J. Weber. Phisicochemical proceses. USA, 1972.
34. Jorissen y K. H. Simmrock. Journal of applied electrochemistry. **21**. 1991 (869-876).
35. K. B. Bischoff y O. Levenspiel. Chemical engineering science. **17**. 1962 (245-255).
36. K. B. Bischoff y O. Levenspiel. Chemical engineering science. **17**. 1962 (257-264).
37. K. Rajeshwar y J. Ibáñez. Environmental electrochemistry. USA, 1997.
38. Korita. Ions, electrodes and membranes. Inglaterra, 1991.
39. Kuroda et al. Elsevier Science Publishers. Noruega, **46**. 1983 (225-232).
40. Lydia B. Artigas M. Tesis. Instituto Tecnológico de Celaya. 1997.
41. M. I. Ismael. Electrochemical reactors. Paises bajos, 1989.
42. M. S. Isaacson y Ain A. Sonin. Industrial engineering chemistry. USA, **15** No. 2. 1976. (313-321).
43. Metcalf & Eddy. Ingeniería de aguas residuales. México, 1996.
44. N. D. Pis'menskaya et al. Technological process equipment and automation. **11** No. 4. 1989.
45. N. Masuko et al. Electrochemical technology. Japón, 1996.
46. Nalco. Manual del agua. México, 1989.
47. O. Levenspiel. Chemical reaction engineering. USA, 1972.

48. Oropeza, T. Mercedes et al. Principios y aplicaciones de los procesos electroquímicos. Universidad autónoma metropolitana. México, 2000.
49. P. Legentilhomme et al. Journal of applied electrochemistry. **19**. 1989. (263-270).
50. P. N. Cheremisinoff. Water treatment and waste recovery. USA, 1993.
51. P. Sistat et al. Journal of applied electrochemistry. **27**. 1997 (65-70).
52. Pankaj M. Shan y John F. Scamehorn. Industrial engineering science. **26**. 1987 (269-277).
53. Patente U. S. 516207.
54. Patente U. S. 509853.
55. Patente U. S. 4298442.
56. Patente U. S. 4871431.
57. Patente U. S. 5376250 .
58. R. Audinos et al. Journal of membrane science. **76**. 1993 (147-156),
59. R. Audinos. Chemical engineering. **38** No. 3. 1982 (431-438).
60. R. Audinos. Journal of applied electrochemistry. **27**. 1986 (143-154).
61. R. B. Bird, et al. Fenómenos de transporte. España, 1975.
62. R. E. W. Jansson y J. Overstall. Journal of applied electrochemistry. **10**. 1980 (173-178).
63. R. F. Probststein et al. Elsevier. **11**. 1972 (165-187).
64. R. F. Probststein. Scholar lecture. 1972 (286-313).
65. R. H. Perry et al. Manual del ingeniero químico. México, 1992.
66. Reza García. Flujo de Fluidos. México, 1990.
67. Richard Alkine y Der-Tau Chin. American institute of chemical engineers. USA, 1983.
68. Roger N. Reeve. Environmental analysis. Gran Bretaña, 1994.
69. S. Kruglikov et al. Electrodialysis in chromium plating and in chromate treatment.
70. S. Stucki. Process technologies for water treatment. USA, 1988.
71. Saravanamuthu Vigneswaran y Roger Ban Aim. USA, 1989. Water, wastewater and sludge filtration. USA, 1989.
72. Schwager et al. Electrochimica Acta. **25**. 1980 (1655-1665).
73. Solomons et al. Heavy metals. Alemania, 1995.

74. T. A. Davis. Applied electrodialysis. USA, 1999.
75. T. Hamano conferencia 1993.
76. T. R. Ralph et al. Electrochimica Acta. **41** No. 4. 1995 (591-603).
77. Tam V. tram et al. Environmental II. Recovery of nickel salts by electrodialysis reversal process. USA, 1986.
78. The electrochemical society. Environment aspects of electrochemistry and photoelectrochemistry. USA, 1993.
79. The electrochemical society. Electrochemical technology applied to environment problems. USA, 1995.
80. Thomas A. Davis. A first course in ion permeable membranes. Inglaterra, 1997.
81. Thomas A. Davis. Water quality management library, Vol. 3. USA, 1992.
82. Thomas T. Shen. Industrial pollution prevention. USA, 1999.
83. W. S. Wu y G. P. Rangaiah. Journal of applied electrochemistry. **23**. 1993 (113-119).
84. Y. Tanaka et al. Journal of membrane science. **92**. 1994 (217-228).