

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL TRANSPORTE DE TRAZADORES PARA MEDICIÓN DE CAUDALES CON FLUJOS NO NEWTONIANOS EN RECUPERACIÓN MEJORADA DE PETRÓLEO.**

### **NUMERICAL SIMULATION OF TRACERS TRANSPORTATION FOR MEASURING FLOW RATES WITH NON-NEWTONIAN FLOWS IN ENHANCED OIL RECOVERY.**

**Horacio P. Burbridge<sup>a</sup>, Marcela Raviculé<sup>a</sup>, Thomas Duriez<sup>b</sup>, Juan M. Cabaleiro<sup>b</sup> y  
Guillermo Artana<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Gerencia de Productos, Procesos y Analítica, YPF Tecnología S.A., Avenida del Petróleo Argentino  
s/n entre 129 y 143. Berisso, Buenos Aires. C.P: 1923, Argentina,  
horacio.burbridge@ypftecnologia.com, <https://www.y-tec.com.ar>*

<sup>b</sup>*Laboratorio de Fluidodinámica (LFD), FIUBA CONICET., Departamento de Ingeniería Mecánica  
Av. Paseo Colón 850 - Subsuelo - C1063ACV - Buenos Aires - Argentina, [jmcabaleiro@gmail.com](mailto:jmcabaleiro@gmail.com),  
<http://laboratorios.fi.uba.ar/lfd/en/Activities/>*

**Palabras clave:** EOR, CFD, No Newtonianos, Ley de Carreau, Transporte de Trazadores.

**Resumen.** La utilización de la herramienta de perfil de tránsito de fluido (*flow log*) está muy extendida para estimar caudales en punzados en pozos inyectores de agua. La herramienta inyecta un trazador radioactivo y tiene dos sensores de radiación gamma que proveen curvas de radiación vs tiempo. Los niveles de radiación detectados están directamente relacionados a la concentración del trazador en el flujo principal de agua. La utilización de esta herramienta en pozos inyectores de polímero presenta algunos problemas que no permiten obtener buenas estimaciones de los caudales de inyección. Para entender el fenómeno fluidodinámico que ocurre en el proceso de difusión del trazador y sus consecuencias sobre las estimaciones de caudal por punzado, en este trabajo se realizaron varias simulaciones utilizando técnicas de CFD. También se muestran los resultados experimentales obtenidos en un banco de ensayos desarrollado a los fines de validar las simulaciones.

**Keywords:** EOR, CFD, Non-Newtonian, Carreau Law, Tracer transportation.

**Abstract.** The use of the fluid flow profile tool (*flow log*) is very widespread to estimate flow rates in water injection wells. The tool injects a radioactive tracer and has two gamma radiation sensors that provide radiation vs. time curves. The radiation levels detected are directly related to the concentration of the tracer in the main water flow. The use of this tool in polymer injection wells presents some problems that do not allow obtaining good estimates of the injection flow rates. To understand the fluid dynamics phenomenon that occurs in the process of diffusion of the tracer and its consequences on the estimates of flow rates, several simulations were performed using CFD techniques in this work. The experimental results obtained in a test bench developed with the purpose of validating the simulations are also shown.

## 1 INTRODUCCIÓN

Después de las recuperaciones primaria y secundaria, los reservorios contienen un porcentaje importante de crudo remanente y, para lograr su extracción, se requiere de la implementación de métodos de recuperación mejorada (EOR), entre ellos la inyección de reactivos, gas y solventes. Hoy en día, la inyección de soluciones poliméricas es uno de los métodos implementados a escala comercial y con el cual se puede llegar a recuperar hasta un 12 % del petróleo remanente, dependiendo de factores técnicos y económicos.

Muchos yacimientos maduros con inyección de agua en Argentina son precandidatos a una explotación con tecnologías de proceso EOR. En el marco de un proyecto piloto realizado en la cuenca del Golfo San Jorge (Argentina) por YPF SA, se realizó una prueba de inyectividad de polímero en pozo. Durante este ensayo se registraron perfiles de tránsito de fluidos (*flow-log*) para determinar la admisión de polímero por punzado. Esta herramienta es de uso masivo para monitorear la inyección de agua en proyectos de recuperación secundaria (ISO 2975/VII, 1977).

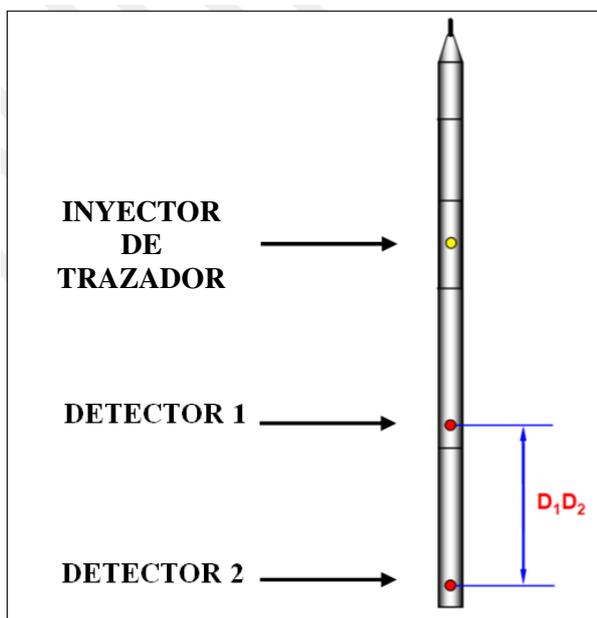


Figura 1: Herramienta de perfil de tránsito de fluido.

En la Figura 1 se muestra el esquema de la herramienta de perfil de tránsito de fluido como la que se usa en los pozos inyectoros de agua para estimar caudales en pozo. La medición de caudal se fundamenta en la obtención de la diferencia entre los tiempos de tránsito del trazador radioactivo cuando pasa por dos detectores de rayos gamma situados a cierta distancia conocida. Esta diferencia de tiempos de tránsito se obtiene usando una correlación cruzada (Zheng and Liu, 2006; Hill, Boehm and Akers, 1988).

Cuando la herramienta se utiliza en pozos con inyección de agua en reservorio el régimen de flujo es turbulento y la reología del fluido es newtoniana, lo cual favorece la difusión del trazador radioactivo en el caudal principal de agua en pozo (ver Figura 2). En estos casos las mediciones de caudal resultan confiables. Pero cuando la herramienta se utiliza con inyección de polímeros la reología del fluido es no-newtoniana y, debido al aumento de viscosidad, el régimen de flujo resulta laminar, lo cual dificulta el proceso de difusión del trazador en el flujo principal de polímero y los caudales obtenidos con esta metodología no resultan representativos del flujo real en pozo.

Así, se observa que las curvas de concentración de trazador obtenidas para flujo de polímeros son irregulares (ver Figura 3), dado que la viscosidad de la solución es mayor a la del agua.

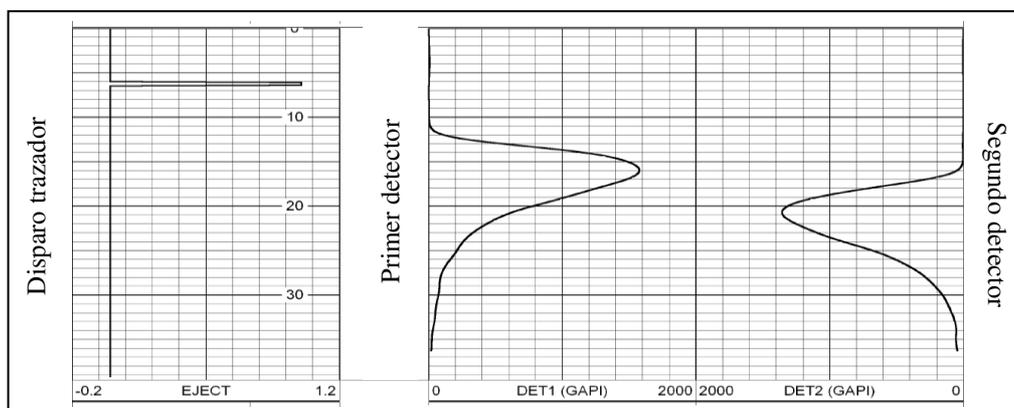


Figura 2: Curvas de concentración de trazador radioactivo para un flujo de agua obtenidas en campo.

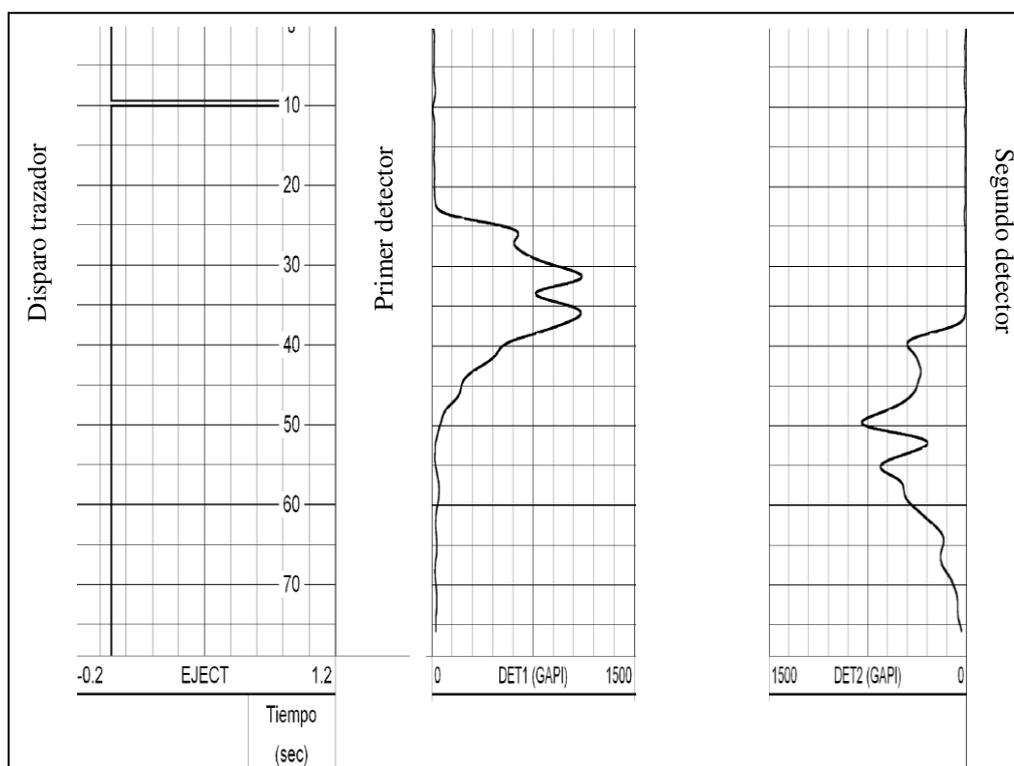


Figura 3: Curvas de concentración de trazador radioactivo para un flujo de polímero obtenidas en campo.

El presente trabajo tiene un antecedente, presentado en el ENIEF 2016 (H. P. Burbridge, M. Raviculé, J. E. Juri y A. M. Ruiz, 2016), en el cual se presentaron simulaciones bidimensionales del transporte de trazadores. En dicho trabajo se estudió el impacto de la viscosidad de la solución polimérica en la forma de las curvas obtenidas en simulaciones bidimensionales. A diferencia de aquel trabajo presentado por Y-TEC en el ENIEF 2016 este trabajo pone el foco en la medición de caudales. Las simulaciones aquí presentadas son tridimensionales y corresponden a los casos ensayados en banco, de manera de poder validar los modelos numéricos comparando con los resultados experimentales. Se pone atención especial a los ensayos realizados en banco, a partir de los cuales se obtienen datos útiles no sólo para la

validación de los modelos de simulación, sino como una fuente directa de información.

## 2 ECUACIÓN DE TRANSPORTE Y LEY DE CARREAU.

Para modelar el transporte y mezcla de fluidos puede utilizarse una ecuación de transporte para la fracción másica utilizando especies químicas (en este caso, dos especies: solución de polímero y agua con trazador).

La fracción másica local de cada especie  $Y_i$  se calcula aplicando una ecuación de convección-difusión para cada una de las especies. La expresión general de esta ecuación se describe en la documentación de teoría de ANSYS Fluent (2016) y es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (1)$$

donde  $R_i$  es la tasa de producción neta de la especie  $i$  por reacciones químicas y  $S_i$  es la tasa de creación por adición de la fase dispersa más cualquier fuente definida específicamente para el caso particular del que se trate. En la expresión (3)  $\rho$  es la densidad,  $\bar{v}$  es el vector velocidad  $t$  es tiempo y  $\bar{J}_i$  es vector de flujo difusivo de la especie  $i$ . Esta ecuación debe ser resuelta para  $N-1$  especies donde  $N$  es el número total de especies químicas presentes en el sistema (en este caso  $N=2$ ).

Con respecto al modelado de la viscosidad, para fluidos newtonianos incompresibles, el tensor de tensiones de corte  $\bar{\tau}$  es proporcional al tensor tasa de deformación  $\bar{D}$ :

$$\bar{\tau} = \mu \bar{D} \quad \bar{D} = \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

en donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica newtoniana.

Actualmente las herramientas de CFD, tanto las versiones comerciales como las open source, cuentan con una importante variedad de modelos y metodologías para simular flujos de fluidos no newtonianos. Para algunos de ellos, la tensión de corte se puede escribir en términos de una viscosidad no newtoniana  $\eta$ , de manera similar a la ley de Newton para fluidos newtonianos:

$$\bar{\tau} = \eta(\bar{D}) \bar{D} \quad (3)$$

En general, es una función de las tres invariantes del tensor de tasa de deformación. Sin embargo, en los modelos no newtonianos disponibles en ANSYS Fluent 17.1 se considera que es una función solamente de la tasa de corte  $\dot{\gamma}$  y está relacionada con el segundo invariante del tensor de tasa de deformación y se define como:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \bar{D} : \bar{D}} \quad (4)$$

Si el flujo no es isotérmico, la dependencia de la viscosidad con la temperatura puede ser incluida además de la dependencia de la viscosidad con la tasa de corte. En este caso, la viscosidad total consta de dos partes y se calcula como sigue:

$$\mu = \eta(\dot{\gamma}) H(T) \quad (5)$$

donde  $T$  es la temperatura y  $H(T)$  es la dependencia de la temperatura, conocida como la ley de Arrhenius.

$$H(T) = \exp \left[ \alpha \left( \frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_\alpha - T_0} \right) \right] \quad (6)$$

donde  $\alpha$  es la relación entre la energía de activación y la constante termodinámica y  $T_\alpha$  es una temperatura de referencia para la cual  $H(T) = 1$ .  $T_0$  se toma nula por defecto, y corresponde a la menor temperatura que es termodinámicamente aceptable. Luego  $T$  y  $T_0$  son temperaturas absolutas.

En cuanto a la dependencia respecto de la tasa de corte, ANSYS Fluent ofrece cuatro opciones para la modelización de flujos no newtonianos:

- Ley de potencia
- Modelo de Carreau para fluidos pseudoplásticos
- Cross model
- Modelo de Herschel-Bulkley para plásticos de Bingham

En particular, el modelo de Carreau intenta describir una amplia gama de fluidos mediante el establecimiento de una curva de ajuste para ensamblar la ley de viscosidad de Newton (fluido newtoniano) con la ley para fluidos pseudoplásticos no newtonianos.

La Figura 4 muestra la Ley de Carreau en ejes a escala logarítmica.

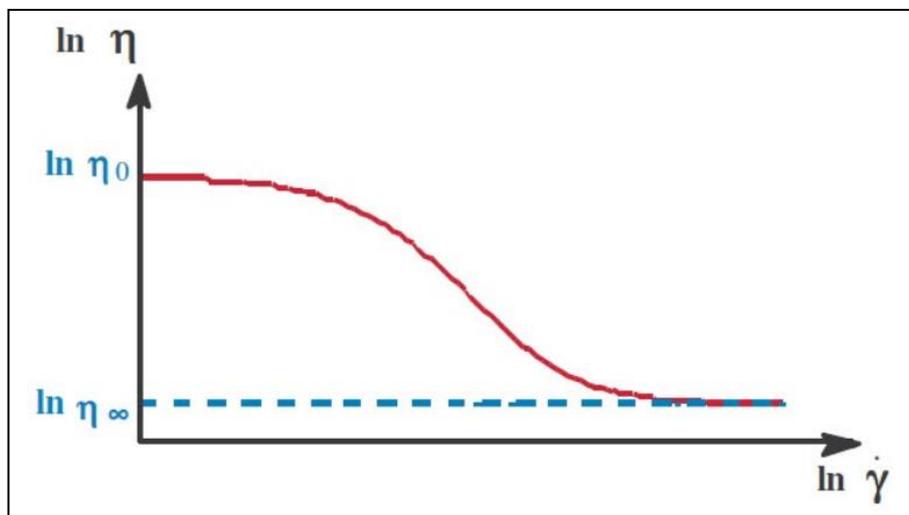


Figura 4: Ley de Carreau para fluidos pseudoplásticos.

En el modelo de Carreau, la viscosidad viene dada por:

$$\eta = H(T)(\eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty)[1 + \gamma^2 \lambda^2]^{(n-1)/2}) \quad (7)$$

En la expresión anterior,  $\lambda$  es la constante de tiempo,  $n$  es el índice de ley de potencia (como se describe para la ley de potencia de fluidos no newtonianos),  $\eta_0$  y  $\eta_\infty$  son, respectivamente, las viscosidades correspondientes a tasa de corte cero e infinito.

La aplicación de las ecuaciones mencionadas anteriormente permite analizar, en este proyecto, la difusión y mezcla de un trazador en la corriente principal de flujo en el conducto. Esto se hace mediante el modelado de la reología no newtoniana del flujo utilizando la Ley de Carreau para calcular viscosidad en función de la tasa de corte. Los modelos CFD en 3D que se desarrollaron para esto se describen en el siguiente apartado.

### 3 ENSAYOS EXPERIMENTALES.

Como se mencionó anteriormente, el CFD es una herramienta muy poderosa de simulación que permite describir tanto flujos internos como externos, y tiene la ventaja de poder adaptarse con relativa facilidad a las diferentes condiciones geométricas y de las variables y parámetros involucrados.

Sin embargo, la validez de las hipótesis adoptadas durante la generación de los modelos de CFD debe ser verificada por comparación de sus resultados contra resultados conocidos de ensayos experimentales o que se encuentren disponibles en la bibliografía.

Además, la observación experimental de los fenómenos fluidodinámicos ofrece certezas por observación directa de lo que en realidad ocurre en dichos fenómenos, por lo cual las técnicas experimentales muchas veces son indispensables por su valor directo y no sólo como método de validación de modelos computacionales. Por tal motivo se decidió desarrollar un banco de ensayos en el cual se pudieran comprobar experimentalmente el comportamiento de los fluidos y el desarrollo del proceso de difusión del trazador.

Para identificar los parámetros adimensionales relevantes que deben ser respetados en el modelo a escala para que el flujo reproduzca las condiciones que se dan en el caso real, se recurrió a las teorías de análisis dimensional y similitud y semejanza de modelos.

Se definió la sección de prueba que consiste en un tubo de longitud " $L$ " y diámetro " $\Phi$ ". El parámetro que primero debe seleccionarse, y que condiciona todos los cálculos posteriores, es, precisamente, el diámetro de la tubería.

Una vez que éste fue establecido surgen otros parámetros derivados a saber:

1. La longitud " $L_s$ " entre sensores gamma, el caudal " $Q$ ", la velocidad media " $U$ " y el tiempo " $\Delta t_s$ " que le tomaría a una partícula de fluido para recorrer la distancia " $L_s$ " a dicha velocidad. (tiempo que se espera que sea próximo a los tiempos definidos por el método de medición). Estos parámetros definen la sección de prueba y sus condiciones de flujo.

2. Con estos datos también puede calcularse el resto de la instalación necesaria, como ser los tanques, el resto de las tuberías y accesorios, así como las bombas necesarias para producir dichos caudales (las cuales además no deben degradar al polímero) y los sensores.

El banco de ensayos consta de una bomba a tornillo y demás accesorios para el control de flujo que no degraden mecánicamente al polímero, este sistema cuenta con dos ramas de tuberías de distintos diámetros (1" y 2"), y un sistema de detección con sensores sumergibles Cyclops 7 marca Turner cuyos detectores están capacitados para detectar por fluorescencia a trazadores colorimétricos como rodamina, PTSA y fluoresceína.

Como se muestra en la foto de la Figura 5, el caudal se deriva en dos líneas verticales de 1 y 2 pulgadas de diámetro que pueden abrirse o cerrarse independientemente a partir del uso de válvulas. En cada una de estas ramas hay tramos fabricados en acrílico que permiten la visualización del pasaje de colorante (rodamina Keyacid) inyectado a partir de un orificio aguas arriba. En dos de esas secciones, situadas a diferente altura, se dispusieron sensores ópticos (fluorometer Cyclops 7-R) que miden la intensidad de fluorescencia de rodamina iluminada por un láser. El *setup* está pensado con la idea de reproducir la técnica de medida de caudal en pozo (que mide concentración de trazadores radiactivos). El circuito hidráulico se cierra con un retorno hacia el tanque desde donde aspira la bomba.

Para la calibración, ajuste y operación del banco se contó con el soporte del Laboratorio de Fluidodinámica (LFD) de la FiUBA CONICET.

El personal del LFD procedió a realizar algunas modificaciones fundamentales para la correcta operación del banco, referidas fundamentalmente al sistema de inyección y al sistema de adquisición de datos. La Figura 6 presenta una vista de la interfaz del sistema de adquisición de datos. Mediante estas modificaciones se logró controlar adecuadamente la inyección.

El marco teórico de los fenómenos estudiados con este banco puede encontrarse en Taylor, 1954.



Figura 5. Banco de ensayos.

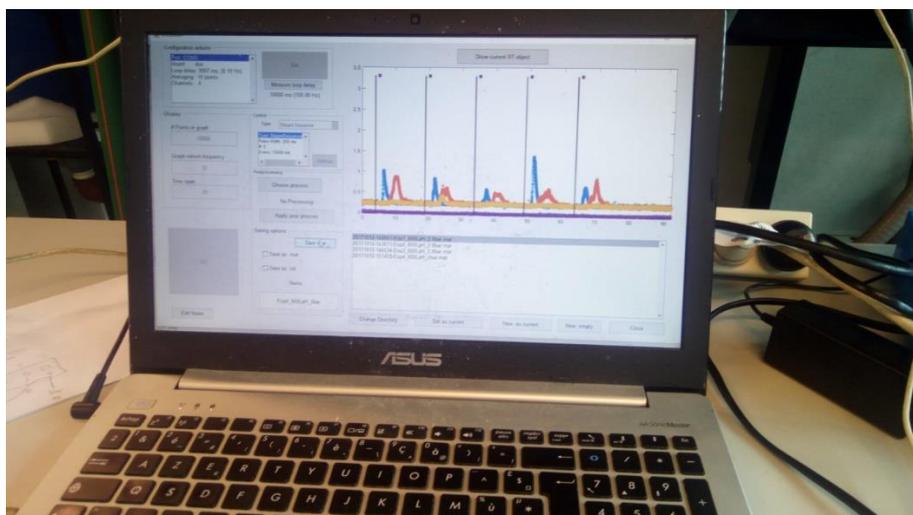


Figura 6. Adquisición de datos del banco de ensayos.

Se realizaron estudios con agua de red y con una solución de agua de red con polímero (FLOPAAM 3631 S) con una concentración de 800 ppm con una semana de maduración. El personal del laboratorio de EOR de Y-TEC realizó estudios reométricos de esta solución el mismo día del ensayo. La curva de viscosidad así obtenida (ver Figura 7) es similar a la que se obtiene en campo (Agua de Myburg) entre 1000 y 1250 ppm.

En el caso de polímero, dado que la viscosidad a bajas tasas de corte es del orden de 30 veces la viscosidad del agua, se puede obstruir completamente una de las ramas (la de 2 pulgadas en este caso) y obtener de igual modo números de Reynolds bajos (flujo laminar), que son los que se buscan reproducir. En el caso de agua, los bajos Reynolds en la línea de 1" pueden obtenerse abriendo parcialmente la línea de 2", ya que si se intenta operar la bomba con caudales tan bajos aparecen oscilaciones de caudal indeseables.

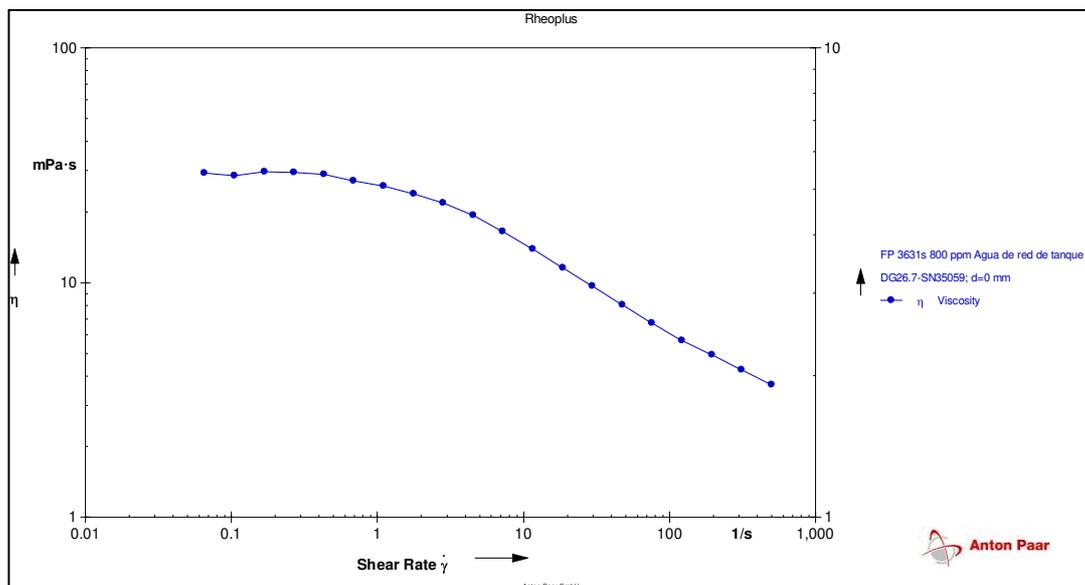


Figura 7. Curva reológica de la solución de polímero utilizada obtenida en el laboratorio de EOR de Y-TEC.

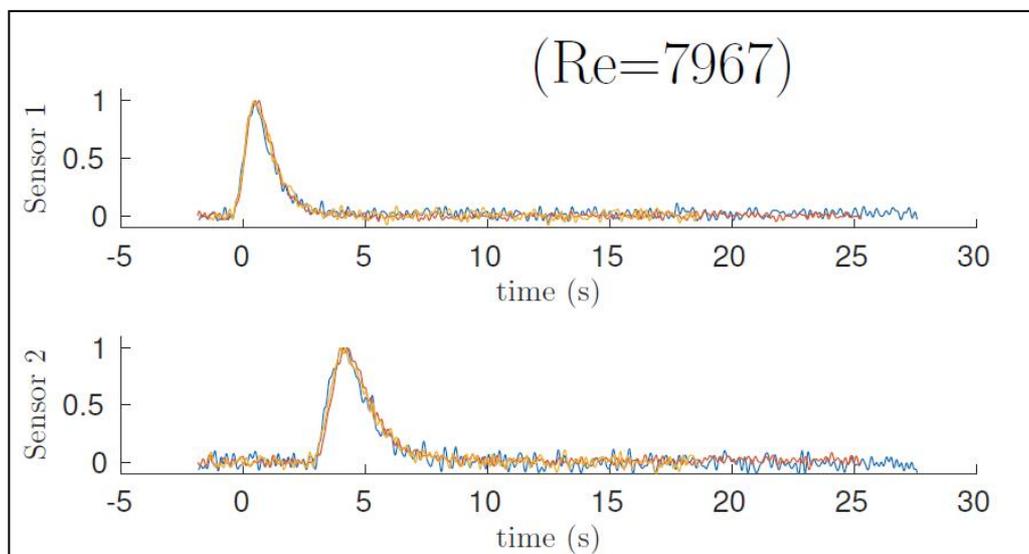


Figura 8. Señal con flujo turbulento (agua,  $Re=7967$ ). Cada color representa un disparo diferente.

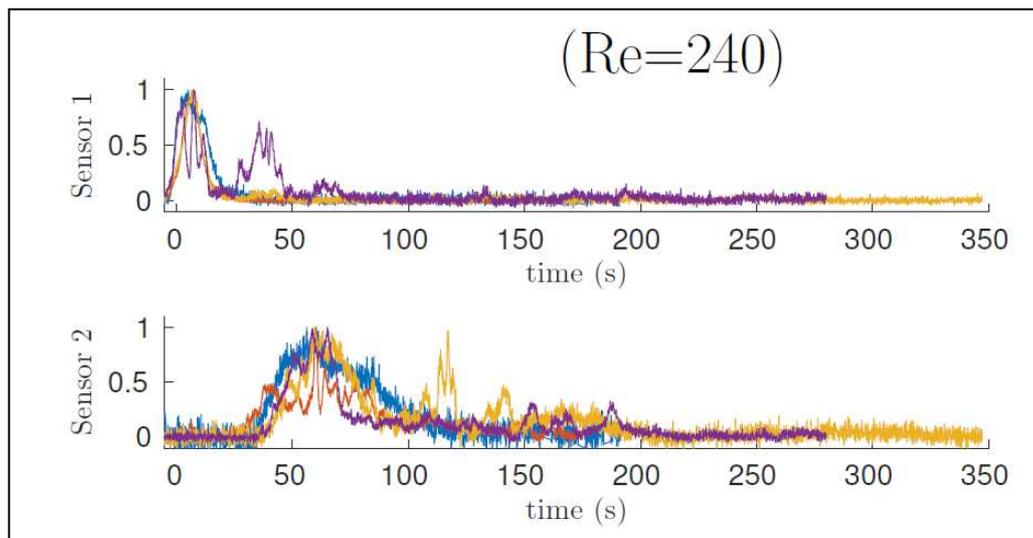


Figura 9. Señales con flujo laminar (agua,  $Re=240$ ). Cada color representa un disparo diferente.

La señal de los sensores de rodamina depende del régimen (laminar o turbulento) en el conducto. Para el caso turbulento, típicamente se observan señales como las mostradas en la Figura 8. Para el caso laminar, típicamente se observan señales como las mostradas en la Figura 9. Los diferentes colores en estas imágenes corresponden a diferentes disparos del trazador.

#### 4 SIMULACIONES CFD.

Se realizaron simulaciones de la dispersión de un trazador en un fluido newtoniano (agua) en condiciones de régimen turbulento utilizando un modelo de CFD en tres dimensiones. Luego, se efectuaron simulaciones de la dispersión del trazador en una solución de polímero. Como ya se indicó, estas soluciones tienen una reología no newtoniana, y exhiben mayor viscosidad que el agua, por lo cual, las condiciones de flujo corresponden a las de régimen laminar.

Para el caso laminar, la curva de viscosidad en función de la tasa de corte corresponde a la del polímero Flopaam 3631s para una concentración de polímero de 800 ppm como la mostrada en la Figura 7. Es decir, la misma curva de viscosidad que la utilizada en los ensayos experimentales. La geometría representada también se corresponde con la de las experiencias en banco. Para el modelo reológico se empleó la ley de Carreau y se adoptaron parámetros como el  $n$ ,  $\mu^\infty$  y  $\mu^0$  que son conocidos ya que dependen de la concentración del polímero. Es decir, dada la curva experimental de la Figura 7, se buscaron los valores de los coeficientes de Carreau que mejor ajustan a dicha curva.

Para estas simulaciones se empleó el software de CFD ANSYS Fluent, y se emplearon modelos tridimensionales (3D). Como resultado de estas se obtuvieron gráficos de concentración de trazador en función del tiempo. Estos datos fueron integrados en planillas de cálculo para luego proceder a efectuar su representación gráfica en curvas de concentración en función del tiempo.

Se construyó una geometría 3D representando un conducto como el del banco de ensayos. La distancia entre la aguja de inyección, de diámetro 0.868 mm, y la superficie donde se coloca el primer monitor es de 584 mm. El segundo monitor se encuentra a 1050 mm abajo del primero. El diámetro del modelo se corresponde con el diámetro de la tubería de 28.5 mm. No se tuvieron en cuenta las pequeñas disminuciones de sección que se tienen en la tubería del ensayo en donde se encuentran los sensores. Para estas simulaciones se utilizó una malla mixta, con una zona

compuesta por celdas poliédricas y una zona estructurada compuesta por celdas hexaédricas a lo largo del tubo por debajo de la zona de inyección, como puede observarse en las siguientes imágenes.

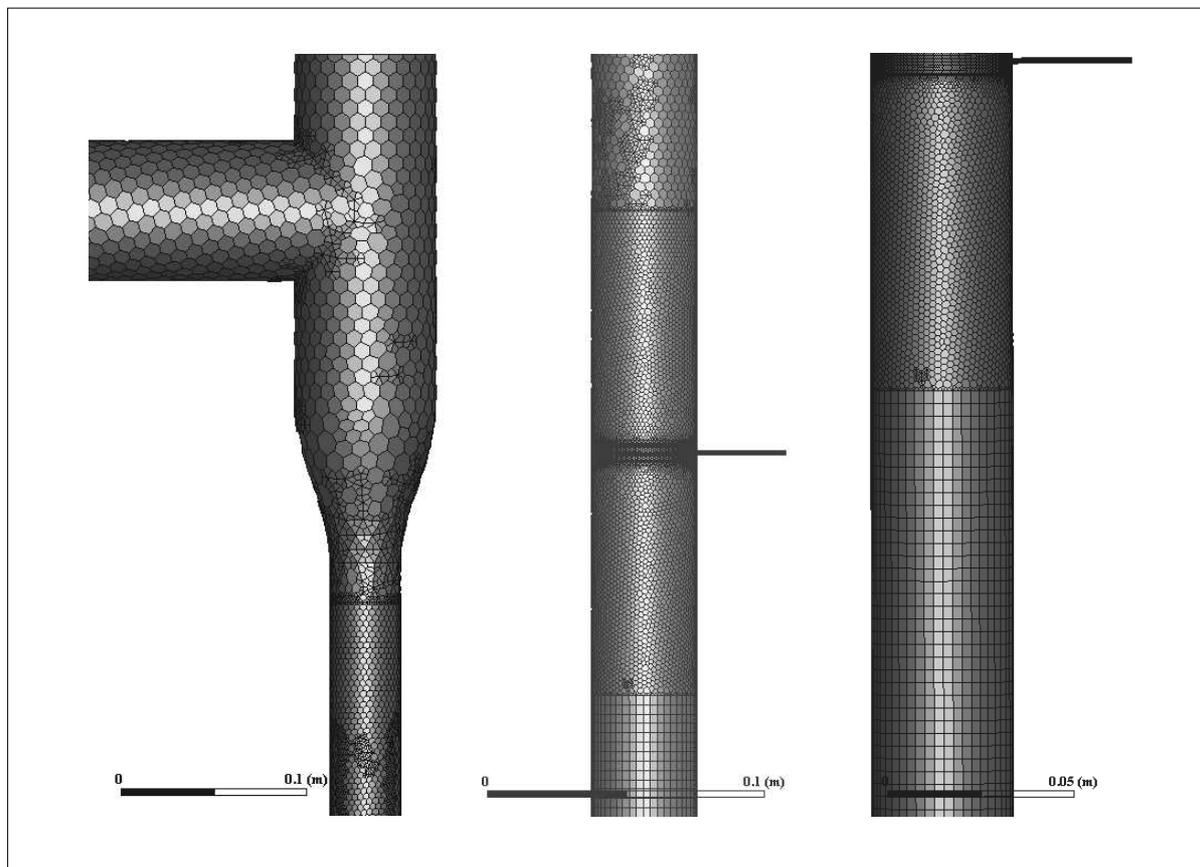


Figura 10 – Diferentes vistas de la malla. Codo y reducción superior, zona de inyección, malla estructurada por debajo de la zona de inyección.

En la Figura 10 pueden observarse diferentes imágenes de la malla. La malla utilizada en para el caso de inyección de agua y para el caso de inyección de polímero es la misma. Pero el mallado fue determinado teniendo en cuenta el caso turbulento, que corresponde a un Reynolds bajo (pero claramente turbulento)  $Re=13231$ . Teniendo en cuenta el modelo de turbulencia utilizado para el caso de flujo de agua, se realizó la malla buscando bajos valores de  $Y^+$ , no superiores a 10.

Una vez finalizada la malla, esta se utiliza tanto para el caso turbulento como para el caso laminar. Se definen las condiciones de contorno, los fluidos intervinientes y las técnicas numéricas apropiadas y se realizan las simulaciones, que permiten visualizar el proceso de dispersión del trazador en el flujo principal. También pueden observarse los vectores velocidad, líneas de corriente y concentración de trazador.

Debe notarse que los registros obtenidos con las simulaciones no son inmediatamente comparables con los registros de obtenidos en los ensayos. La simulación registra concentración de agua (con trazador) en el flujo principal de agua o solución de polímero, es decir, registra concentración de un fluido que se inyecta en pequeñas cantidades en otro fluido que viene en la corriente principal. Contrariamente, las señales obtenidas en los ensayos son voltajes provistos por los sensores. Si bien existe una correlación entre el voltaje y la concentración del trazador, la comparación de las curvas no puede hacerse en forma inmediata. Por esto, si se desea tener una metodología de caracterización de las curvas que sea aplicable a las curvas de

ensayo tanto como a las simulaciones, es necesario transformar las curvas normalizándolas y adimensionalizándolas.

Asumiendo que  $x=x(t)$  es el registro obtenido con el sensor o mediante las simulaciones, se propone la siguiente transformación de las curvas:

$$\bar{x}(t) = x(t) \frac{d_{1-2} A}{Q \int_0^{\infty} x(t) dt} \quad (8)$$

En esta expresión  $d_{1-2}$  es la distancia entre detectores  $A$  es el área transversal de flujo y  $Q$  es el caudal total conocido. Una segunda transformación consiste simplemente en dividir el valor de la señal por el de su propio máximo, es decir:

$$\bar{\bar{x}}(t) = \frac{x(t)}{x_{max}} \quad (9)$$

### Simulación del caso turbulento (Agua):

Para el caso de flujo de agua, dados los caudales que típicamente se utilizan en pozos inyectores de secundaria, el flujo resulta turbulento. Por lo tanto, aquí se simuló un caso en el cual se adopta un flujo principal de agua en un régimen turbulento para lo cual se adoptó al modelo de turbulencia SST para tener en cuenta sus efectos (ANSYS Fluent 17.1 – Theory Guide). En el banco de ensayo se obtuvieron datos para flujo de agua tanto en regímenes laminares como turbulentos, por ello, de entre todos los casos de agua ensayados hubo que seleccionar un caso que fuera turbulento.

#### Caso turbulento seleccionado para la simulación (flujo de agua):

- Rama de dos pulgadas cerrada (*No bypass*)
- $Q_{tracking}=838 \text{ lph}$  (Es el caudal obtenido en el ensayo a partir de la medición de velocidad mediante PIV)
- $\Delta t_{sensores}$  (es el tiempo entre curvas, medido en el ensayo con el método de correlación cruzada, para un tren de cinco disparos de trazador):
  - Global crosscorrelation:  $2.94s$
  - Indiv. crosscorrelations:  $2.85s, 2.87s, 2.89s, 3.05s, 2.95s$
  - Average crosscorrelation:  $2.93s$
  - Median crosscorrelation:  $2.89s$
- $Q_{sensores}=834 \text{ lph}$  (Es el caudal obtenido en el ensayo usando el  $\Delta t$  correspondiente a la mediana de la correlación cruzada del tren de señales)
- $Re_{tracking}=13231$  (Reynolds en base al  $Q_{tracking}$ )
- $V_{inj}: 2.153 \text{ m/s}$ ,  $t_{inj} 250ms$ , (Es la señal cuadrada de inyección en la válvula de disparo).
- $P_{iny}: 1.5 \text{ bar}$ . (Presión en el dispositivo de inyección).

En este caso se simuló un flujo principal de agua (especie 1) y agua con trazador (especie 2, que ingresa por la aguja con una señal de inyección).

El disparo de trazador corresponde a una señal cuadrada. Sin embargo, la válvula se conecta con la aguja mediante una manguera plástica de aproximadamente 40 cm de longitud. La manguera plástica se dilata y contrae en respuesta a los pulsos de presión y esto hace que exista cierta “inercia” en el caudal inyectado, de manera que la señal que llega efectivamente al orificio de inyección no es cuadrada. Esto fue observado en los videos de inyección, que muestran que existe una rápida inyección inicial y luego una disminución progresiva del caudal de trazador en el orificio de inyección.

Para emular la forma de inyección que efectivamente se observa en los videos se utilizó una señal basada en una ley exponencial de crecimiento de la velocidad de inyección y una ley,

también exponencial, de decrecimiento de esta, ambas aplicadas de tal forma que el volumen inyectado sea el mismo que el que corresponde a la señal cuadrada.

La Figura 11 muestra una imagen de la inyección de trazador obtenida en el plano medio del conducto, que corresponde al instante  $t=0.25$  s, apenas luego del disparo, y la que corresponde al instante  $t=4.95$  s, cuando el trazador se encuentra pasando por el segundo monitor.

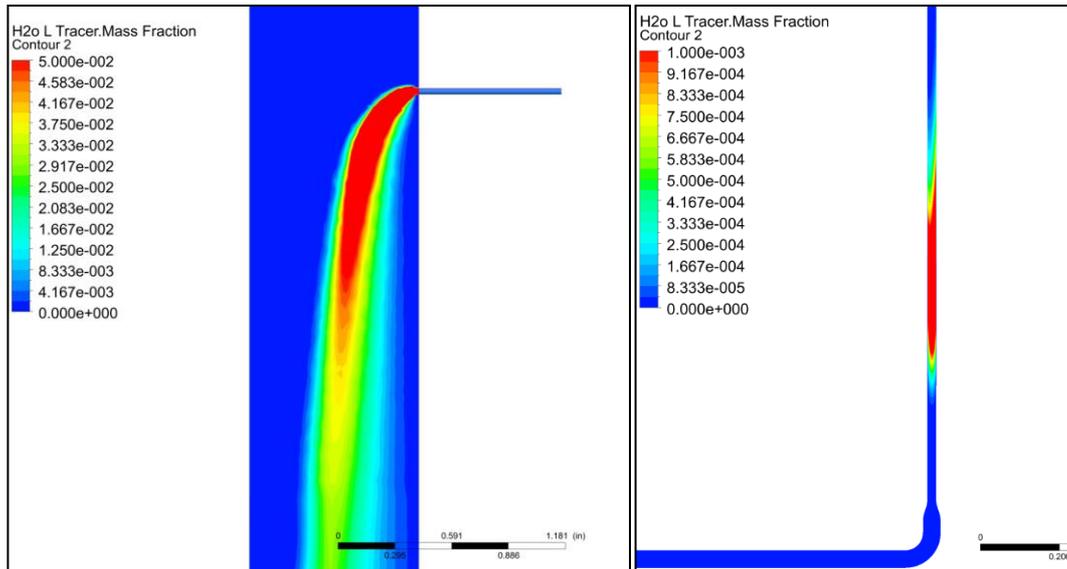


Figura 11 – Vista en el plano medio de la concentración de trazador en agua durante el disparo ( $t=0,25$  s) y ( $t=4,95$  s)

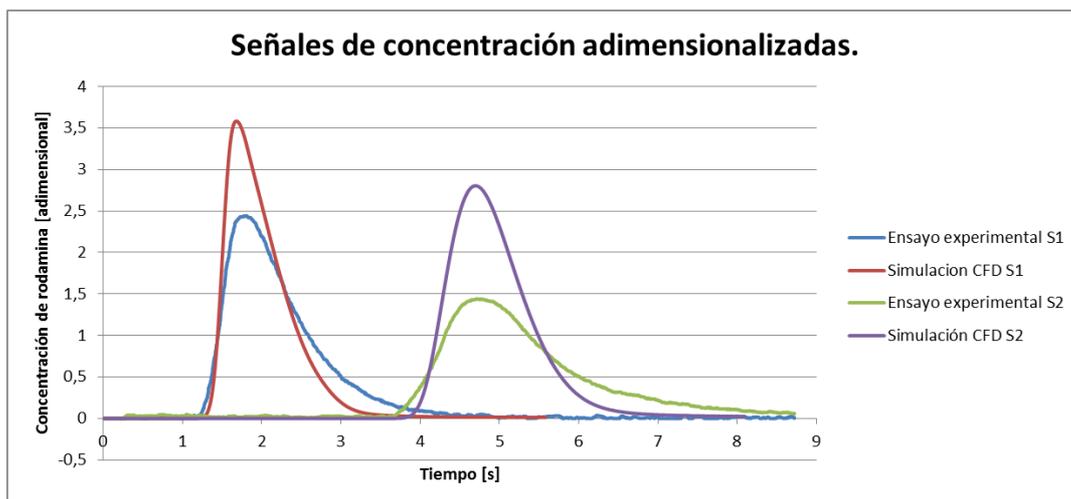


Figura 12 – Curvas de concentración de trazador. Ensayo y Simulación. Sensores S1 y S2. Criterio de normalización con el área bajo la curva.

Las Figuras 12 y 13 muestran las curvas de concentración de trazador obtenidas con la simulación, comparadas con las correspondientes curvas obtenidas en el ensayo. Como se indicó anteriormente estas curvas son transformadas de acuerdo a las expresiones (8) y (9) para poder realizar una comparación de sus formas. La Figura 12 corresponde a la transformación

(8) utilizando el área bajo la curva, y la Figura 13 corresponde a la transformación (9) utilizando el máximo de la curva.

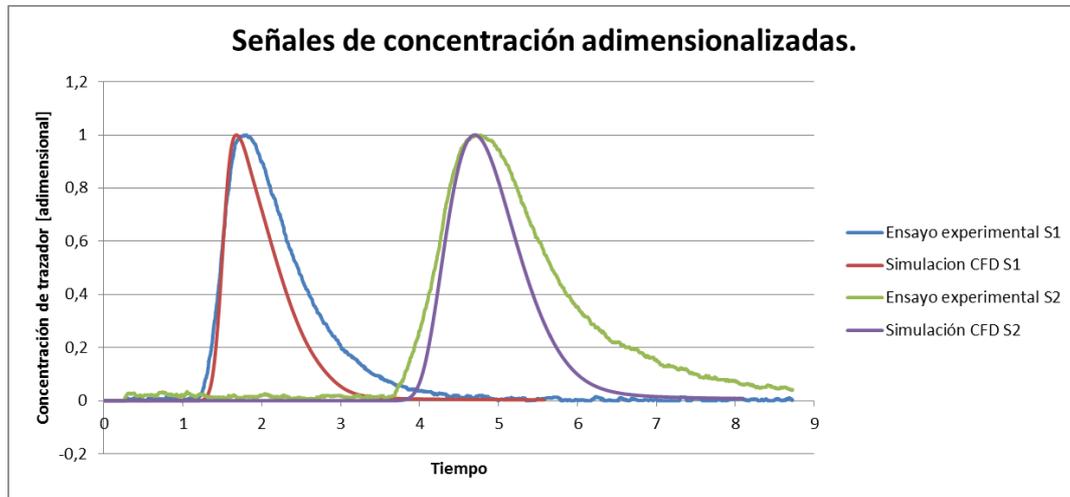


Figura 13 – Curvas de concentración de trazador. Ensayo y Simulación. Sensores S1 y S2. Criterio de normalización con el máximo de la curva.

### Simulación del caso laminar (solución polimérica):

Para el caso de flujo de solución polimérica, la misma se comporta como un fluido no-newtoniano de tipo pseudoplástico (“*shear-thinning*”), y la viscosidad es decenas de veces superior a la del agua, lo cual determina que el flujo resulte laminar. Una de las características más importantes de los flujos turbulentos es que favorecen los procesos de mezcla por la presencia de un fenómeno de difusión turbulenta. Dicha difusión turbulenta no existe en los flujos laminares y, por lo tanto, en el flujo de polímero la concentración del trazador en la vena de fluido tiene una distribución menos homogénea que en los casos de los flujos turbulentos.

Entre todos los casos de polímero ensayados hubo que seleccionar un caso para la simulación, adoptando el siguiente:

#### Caso Laminar (Solución polimérica):

- Rama de dos pulgadas cerrada (*No bypass*)
- $Q_{tracking}=1034 \text{ lph}$
- $\Delta t_{sensores}$ :
  - Global crosscorrelation: 2.42s
  - Indiv. crosscorrelations: 2.49s 2.40s 2.20s 1.87s 1.90s
  - Avg crosscorrelation: 2.18s
  - Median crosscorrelation: 2.20s
- $Q_{sensores}=1095 \text{ lph}$
- $Re_{tracking}=163$  (Asumiendo la viscosidad a bajas tasas de corte  $\mu_0$ )
- $V_{inj}: 3.449 \text{ m/s}$ ,  $t_{inj} 750\text{ms}$
- $P_{inj}: 3 \text{ bar}$

En este caso se simuló un flujo principal de solución polimérica (especie 1) y agua con trazador (especie 2, que ingresa por la aguja con una señal de inyección).

Se utilizó una señal basada en una ley exponencial de crecimiento de la velocidad de inyección y una ley, también exponencial, de decrecimiento de la misma. Ambas señales fueron aplicadas de tal forma que el volumen inyectado sea el mismo que el que corresponde a la señal

cuadrada.

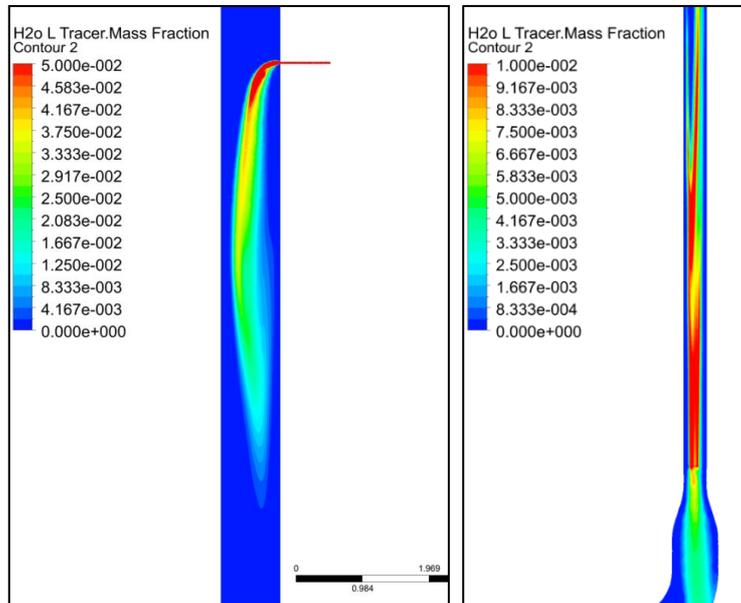


Figura 14 – Concentración de trazador en solución de polímero en el plano medio ( $t=0,25 s$ ) y ( $t=4,20 s$ )

La Figura 14 muestra una imagen de la inyección de trazador obtenida en el plano medio del conducto, que corresponde al instante  $t=0.25 s$ , apenas luego del disparo, y otra que corresponde al instante  $t=4.20 s$ , cuando el trazador se encuentra pasando por el segundo monitor.

Las Figuras 15 y 16 muestran las curvas de concentración de trazador obtenidas con la simulación, comparadas con las correspondientes curvas obtenidas en el ensayo. Como se indicó anteriormente estas curvas son transformadas de acuerdo con las expresiones (8) y (9) para poder realizar una comparación de sus formas. La Figura 15 corresponde a la transformación (8) utilizando el área bajo la curva, y la Figura 16 corresponde a la transformación (9) utilizando el máximo de la curva.

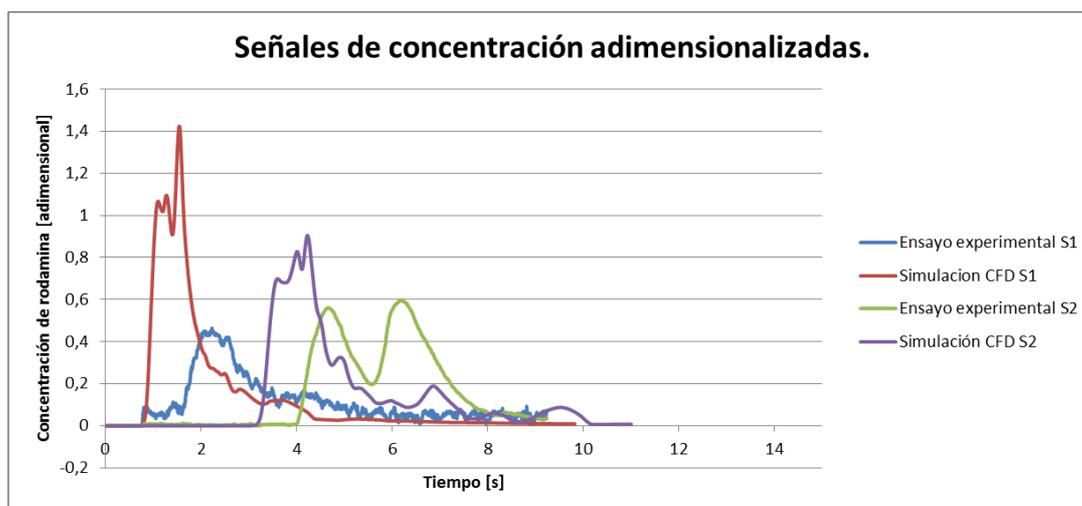


Figura 15 – Curvas de concentración de trazador. Ensayo y Simulación. Sensores S1 y S2. Criterio de normalización con el área bajo la curva.

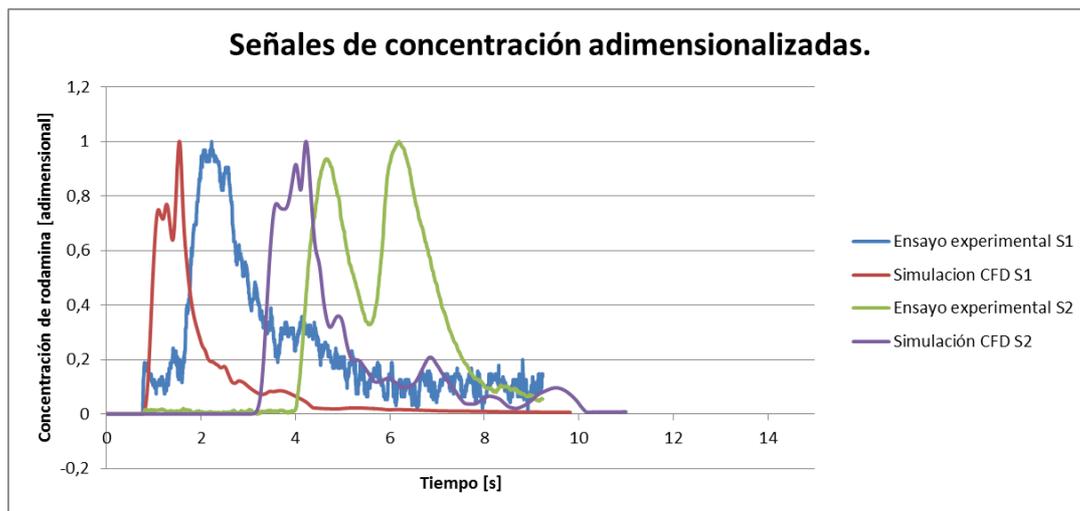


Figura 17 – Curvas de concentración de trazador. Ensayo y Simulación. Sensores S1 y S2. Criterio de normalización con el máximo de la curva.

## 5 CONCLUSIONES Y PRÓXIMOS PASOS

En términos generales, queda claro que, mediante las simulaciones, se pueden entender las características de las curvas de concentración de trazador. Dado que aquellas representan un ambiente controlado de ensayo (numérico), todas las características derivadas de la física del proceso de difusión del trazador pueden ser capturadas y puestas en evidencia.

Las curvas experimentales en la Figura 8 realizadas para diferentes disparos con flujo turbulento, muestran que las formas de las curvas se repiten en los diferentes ensayos con un mismo caudal en el conducto principal. Sin embargo, para flujo laminar en la Figura 9 se observa que las curvas no se repiten para los diferentes disparos.

El análisis comparativo de las simulaciones 3D con los ensayos muestra un buen acuerdo entre las curvas de concentración de la simulación y las curvas de concentración del ensayo para el caso de agua (Figuras 12 y 13). Las diferencias que se observan en dichas curvas pueden ajustarse modificando algunos parámetros de difusión turbulenta como el Número de Schmidt turbulento, pero estas imágenes ya muestran suficiente nivel de acuerdo. El cálculo de los caudales en base a estas curvas usando el método de la correlación cruzada da valores muy próximos para la simulación y el ensayo, con una diferencia inferior al 3%.

Como puede verse en las Figuras 15 y 16, lo mismo no ocurre para el caso laminar con solución de polímero. Esto se debe a que no se puede asegurar que la señal de inyección utilizada en la simulación sea exactamente igual a la señal real del ensayo. Como en los casos laminares la forma de inyección es determinante de las curvas y del caudal medido con las mismas, es esperable que haya diferencias entre las curvas obtenidas con la simulación y las curvas obtenidas en el ensayo. Como se mencionó antes, esto también ocurre cuando comparamos las curvas de diferentes disparos en el ensayo experimental (Figura 9).

El fenómeno de *fingering* se observa claramente en las imágenes de la concentración del trazador en el flujo de polímero (Figura 14). La aparición de este fenómeno se debe a las propiedades del régimen de flujo laminar (ausencia de turbulencia para homogeneizar la mezcla) y al “deslizamiento” entre fluidos provocado por la diferencia de viscosidad entre el polímero y la solución acuosa que transporta el trazador.

Si bien es poco probable obtener curvas muy similares entre simulación y ensayo para el caso de polímero, si se puede observar ciertas características que se replican bien en la

simulación, como la aparición de diferentes picos y la forma irregular de las curvas. En este sentido las simulaciones 3D refuerzan las siguientes conclusiones ya establecidas mediante los ensayos:

1- La curva correspondiente al agua presenta una forma de campana bien determinada con un único pico, mientras que las curvas para las diferentes concentraciones de polímero presentan formas irregulares.

2- A mayor viscosidad menor es la altura de los picos que aparecen en las curvas.

3- Por el contrario, a mayor viscosidad mayor es el tiempo que toda la masa de trazador tarda en ser evacuada, por lo que resulta una curva que presenta valores significativos de concentración de trazador durante un lapso mayor.

4- Los ensayos y simulaciones realizadas muestran que el sistema de medición de caudales por trazadores brinda resultados correctos para flujos turbulentos, obteniéndose una medida aceptable del caudal.

5- En flujo laminar, que es el que se obtiene para los caudales estudiados en pozos inyectoros de polímero, la medida presenta una gran dispersión, las señales son más ruidosas, y el resultado depende fuertemente de la distancia de penetración del trazador durante el disparo. La distancia de penetración del trazador depende de la presión de inyección, pero también del caudal principal, que es justamente lo que se intenta medir. Esto indica que los métodos tradicionales de lectura de registros no ofrecen resultados repetibles si la inyección se no se realiza en forma controlada, lo cual no puede asegurarse en la operación en campo, dadas las incertidumbres inherentes al proceso. (no conocer exactamente la velocidad de inyección y, fundamentalmente, no conocer exactamente cómo se posiciona la herramienta en el pozo, entre otras).

## REFERENCIAS

ANSYS Fluent 17.1 - Theory Guide.

ANSYS Fluent 17.1 - User's Guide.

Burbridge, H. P., Raviculé, M., Juri, J. E. y Ruiz, A. M., Simulación numérica del transporte de trazadores en flujos de soluciones poliméricas no newtonianas en implementaciones de EOR. ENIEF 2016.

Hill, A.D, Boehm, K.E. & Akers, T.J., Tracer-Placement Techniques for Improved Radioactive-Tracer Logging. *Journal of Petroleum Technology*. SPE 17317. Vol. 40-Issue13: 1484 - 1492. 1988.

Measurement of water flow in closed conduits - Tracer methods - Part VII: Transit time method using radioactive tracers. *ISO 2975/VII*; 1977.

Taylor, G.I., Diffusion and mass transport in tubes. *Proceedings of the Physical Society*. Section B, 67(12):857, 1954.

Zheng H. and Liu X. B., Injection Profiling in Polymer Injectors in Daqing Oilfield. *103703-MS SPE Conference Paper*. 2006.