

SIMULACIÓN MATEMÁTICA PARA EVALUAR LA EFICIENCIA EN UN REACTOR PARA RECICLADO DE PLOMO

MATHEMATICAL SIMULATION TO EVALUATE THE EFFICIENCY IN A REACTOR FOR RECYCLING OF LEAD

Pedro Vite-Martínez¹, Adan Ramírez-López^{1,2}, Antonio Hernández-Espejel¹ y Ángel de J. Morales-Ramírez¹

(1) Instituto Politécnico Nacional (SEPI-ESIQUE-IPN), U.P. Zacatenco, Lab. De Análisis Met., Edif. "Z" y Edif. "6" P.B., CP 07300 México

(2) Univ. Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Coordinación de Posgrado en Ciencias e Ingeniería, Dpto. de Materiales, Av. San Pablo #180, col. Reynosa, Del. Azcapotzalco, CP 2200 México, D.F. – México
(e-mail: adaramil@yahoo.com.mx)

Recibido: 05/03/2010 - Evaluado: 21/03/2010 - Aceptado: 20/04/2010

RESUMEN

En este trabajo, se desarrolla un estudio por simulación matemática para un baño agitado por un sistema de aspas planas simples, el cual es utilizado en el proceso de separación de plomo líquido. En este proceso, se realiza una inyección de trazador en diversos puntos axiales del baño. Se analiza la hidrodinámica del baño, las curvas de edades y tiempos de residencia resultantes en cada punto de inyección y de monitoreo, con el fin de obtener el mejor de los puntos de inyección sin tener que variar la geometría original del baño. Para mejorar la eficiencia del mezclado se analizan los perfiles de velocidades y concentración obtenidas para identificar zonas muertas y de poca recirculación. Los puntos de monitoreo para la inyección de trazador se consideran suficientes para obtener una dinámica apropiada de la homogenización del baño para fines de análisis.

ABSTRACT

In this work, it has been developed a study using mathematical simulation for a stirred batch using flat blades, process used to separate liquid lead. Here, a tracer is induced at different axial points. Hydrodynamics of the batch, ages and residence time distribution (RTD) curves are studied on injected and monitored points, in order to obtain the most appropriated injection points without changing the original geometrical configuration. Speed and concentration profiles are analyzed to improve the mixing performance and find dead zones and regions with reduced recirculation. Monitoring points for tracer injection are considered enough to obtain a proper dynamic for a bath homogenization to be analyzed.

Palabras claves: agitación, reciclaje de plomo, simulación computacional, eficiencia de mezclado
Keywords: stirring, lead recycling, computer simulation, mixing performance

INTRODUCCIÓN

En varios procesos metalúrgicos, la eliminación de impurezas se lleva a cabo con la adición de elementos o compuestos capaces de reaccionar selectivamente con el contaminante (inclusión no deseada) de la carga a purificar. El proceso a analizar en este trabajo, consiste en la refinación de plomo en la planta de Ciénega de Flores de ENERTEC (Romero et al., 2000). En este proceso se debe eliminar cobre y plata, mediante la adición de azufre y zinc, respectivamente, pero su proceso actual requiere de mucho tiempo por lo que se desea optimizar.

Uno de los grandes problemas que se enfrenta en el desarrollo de este proceso es el largo tiempo que se requiere para homogeneizar el baño. La adición de materiales en polvo para eliminar impurezas del baño se realiza en la superficie del material líquido y se utiliza únicamente agitación mecánica, la cual es insuficiente para obtener mezclas rápidas. Por lo anterior se ha propuesto una inyección de polvos en el interior del baño utilizando una lanza sumergida y junto con un gas de arrastre como se muestra en la Figura 1, lo cual se llevo a cabo a nivel laboratorio por Plascencia-Barrera et al. (2001). Con el uso de este dispositivo, se logro una disminución apreciable en los tiempos de mezclado a determinados flujos. Este es un antecedente que servirá de base para desarrollar un nuevo estudio en el cual la hidrodinámica del baño se estudie vía simulación matemática, y apoyada en métodos estadísticos y estrategias de seguimiento del comportamiento del fluido.

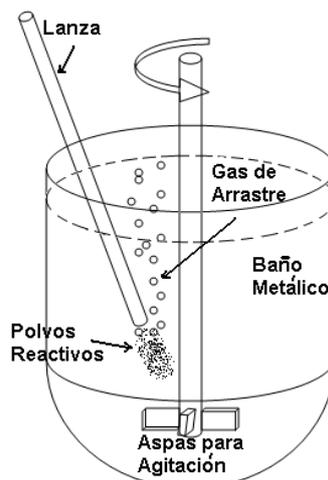


Fig. 1: Reactor para purificación de plomo con lanza sumergida y propelas de agitación.

La inyección de reactivos en el seno de baños líquidos tiene los siguientes objetivos: desgasificar el baño metálico, remover las inclusiones no metálicas y adicionar agentes modificadores o refinadores de grano de la estructura del metal solidificado (Kumar et al., 1999).

Uno de los problemas fundamentales en el diseño y operación de reactores es el mezclado de los componentes (Sawada y Ahaihi, 1987; Pinelli y Megelli, 2000; Szalai et al., 2002), para la obtención de mezclas homogéneas. Este problema es función de varios factores como los cambios que pueden presentarse en la temperatura o composición de los reactantes, que pueden variar de un punto a otro en el reactor, también depende del carácter endotérmico o exotérmico de la reacción, de la velocidad de adición o remoción de calor del sistema, y del patrón de flujo de fluido dentro del reactor.

La técnica de Dinámica de Fluidos Computacional, conocida por su abreviatura en inglés *CFD* (Computational Fluid Dynamics), ha permitido recientemente profundizar en el conocimiento de fenómenos complejos de flujo de fluidos, dado que permite obtener datos y observaciones que son muy difíciles de determinar

experimentalmente por modelación física, como lo es la distribución de un trazador en un baño de metal líquido utilizando condiciones de frontera definidas (Bailey et al., 1999; Kumar et al., 1999; Ohguchi y Robertson, 1984). Características que son muy difíciles de reproducir o no son económicamente viables o justificables de obtener. Además el uso de simulación matemática disminuye el tiempo utilizado en el estudio de diversos fenómenos de flujo de fluidos.

Las gráficas de vectores obtenidas de la simulación matemática, muestran las zonas donde la agitación es escasa o abundante, y que deben coincidir con valores altos de viscosidad turbulenta efectiva, que representa la dificultad con que puede integrarse un fluido a otro. Cabe mencionar que en este trabajo al igual que en estudios previos (Vite, 2000), los agitadores por lo general consideran despreciable el efecto del eje de rotación del sistema mecánico. Debido a estar ubicado en el centro del reactor y no tener superficies que produzcan una agitación sobre el fluido (Youngs, 1982; Davey, 1980; Dessureault, 1993).

Los contornos de concentración de especies o fases en su caso se utilizan para determinar la eficiencia de la difusividad en combinación con la viscosidad turbulenta efectiva (Ohguchi y Robertson, 1984). En este caso, el efecto por transporte difusivo es menor debido al aumento del transporte convectivo provocado por agitación mecánica.

La variación de la posición de la inyección de un trazador, es útil para indicar la región, zona y volumen donde se tendrá una menor resistencia inicial de mezclado por parte de la fase continua y el tiempo que tardará una partícula en llegar a un punto determinado y el tiempo total para homogeneizar el baño. Mientras que las curvas de edades (Levenspiel, 1989; Levenspiel, 1999) indican la eficiencia en porcentaje de zonas con o sin agitación, que existirán en el dispositivo.

La técnica *CFD* es útil ya que solo consume tiempo de compilación para la realización de los cálculos, sin el gasto y riesgo que implican materiales para modelación física o plantas piloto. Su única desventaja consiste en que si no se validan los resultados con datos experimentales no se estará seguro de su efectividad o exactitud.

La técnica *CFD* consiste, a grandes rasgos, de la siguiente secuencia de pasos a seguir los cuales no son necesariamente consecutivos (Youngs, 1982; Davey, 1980; Dessureault, 1993):

1. Se debe subdividir el volumen o dominio físico (geometría original) en varios sub-volúmenes (con ellos crea el llamado dominio computacional). Este punto también es llamado mallado (*mesh*) de la geometría o discretización del elemento geométrico.
2. En algunos de dichos subvolúmenes, se establecen condiciones de frontera y condiciones iniciales de trabajo. Esto sirve para inicializar valores de cálculo en las ecuaciones que se resuelven utilizando un método numérico programable.
3. Se especifican las condiciones y propiedades del fluido o material a través de las demás celdas que no tienen condiciones frontera o iniciales.
4. Las ecuaciones diferenciales a resolver en celdas se acoplan. En función al tipo de modelo a utilizar, así como las ecuaciones de energía y los efectos de cada fase o especie.
5. Se emplea un método iterativo que resuelva estas ecuaciones en el dominio, de acuerdo a la complejidad del sistema y a la secuencia de simulación predefinida.
6. Se reportan resultados y se refuerzan con gráficas y posprocesamiento de datos. En caso de no reportarse resultados satisfactorios, se debe corregir alguno de los puntos anteriores y compilar de nuevo el caso.

GEOMETRÍA DEL REACTOR

Uno de los problemas iniciales en toda simulación matemática, es la del tipo de malla y condiciones iniciales de la geometría que se deben utilizar.

Inicialmente se pueden dividir a las geometrías en bidimensionales o tridimensionales. También se debe decidir si dicha geometría contiene uno o más centros de convergencia de círculos o sectores anulares, que al momento de realizar el mallado pueden ser importantes a considerar para la subdivisión de elementos y al mismo tiempo procesar los resultados obtenidos.

En cuanto al mallado, se pueden considerar 3 tipos diferentes: estructurado, no estructurado o híbrido. Se considera un mallado estructurado si la forma de las celdas o volúmenes, consisten de cuadrados o rectángulos (en 2D) y en cubos o prismas de 6 lados (en 3D); siendo este último el que ofrece mayor rapidez en los cálculos. Cuando la geometría varía en otro tipo de figuras, como son los romboides de ángulo muy cerrado o triángulos (2D), o pirámides o tetraedros (3D) se considera un mallado no estructurado. Esta diferencia es debido a una cuestión de ángulos planos o ángulos sólidos que tienen que ver con perpendicularidad entre estos mismos al momento de realizar cálculos en el algoritmo. El tercer tipo de mallado es el llamado híbrido, consistente en la combinación de mallado estructurado y no estructurado, lo cual permite tratar, por ejemplo, con geometrías anulares en 3D sin divergencia en diversas etapas de cálculo.

En este trabajo se consideró una geometría 3D, con el fin de que simule la paila de la manera más representativa posible. El armado de la geometría se realiza bajo la premisa de ser asimétrica, para facilitar algunas cuestiones de desarrollo de cálculo inicial.

Para la división en sub-volúmenes de la geometría (mallado), se determinó usar la del tipo no estructurada, con elementos tetraédricos para lograr el mejor ajuste geométrico de los elementos. Un problema particular en este aspecto, es la unión del sistema de agitación (palas y el eje al que está unidas) y el cuerpo del baño que contiene al fluido. Lo anterior ocasionado por lo fino del mallado en las aspas debido a sus dimensiones, y que de continuar con el mismo tamaño de elementos para el complemento en la geometría, se obtendría un número muy alto de nodos, lo cual incrementaría el tiempo de cálculo. Se aprecia una densidad de elementos mayor en el sistema de agitación, con respecto a la del cuerpo del baño; las observaciones e interpretación de este hecho se realizan brevemente en la parte del análisis de resultados.

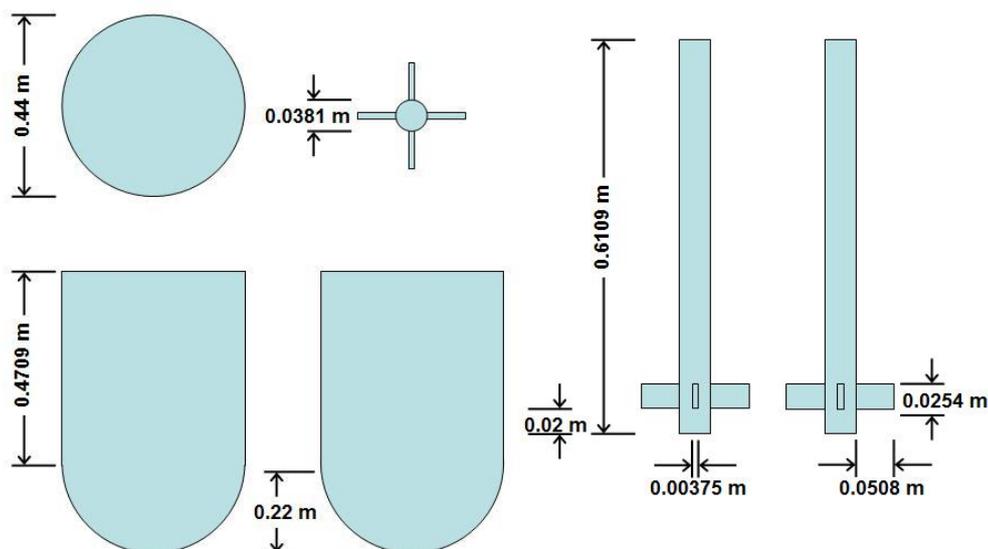


Fig. 2: Dimensiones geométricas del reactor y de la propela de agitación.

En el trabajo realizado por Romero et al. (2000), el baño de estudio utilizaba 0.98 ton. de plomo líquido, dato con el cual se determinaron las dimensiones de la geometría para la simulación matemática, tal como se muestra en la Figura 2.

El mallado obtenido para las geometrías de la paila y del sistema de agitación, se muestra en la Figura 3.

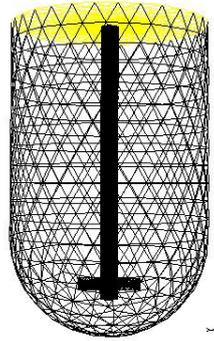


Fig. 3: Discretización del reactor utilizando elementos tetraédricos.

CONDICIONES DE FRONTERA

Las condiciones bajo las cuales la geometría se diseño son:

- El contorno del baño y su fondo semiesférico, se definieron como paredes sin movimiento (rígidas)
- La superficie del baño se consideró como simétrica, dado que las fuerzas que actúan en esa zona, no son afectadas de la misma manera que las de las paredes, donde si es importante el efecto de capa límite.
- Las palas y el eje de rotación (sistema de agitación), se consideraron paredes móviles girando a 200 rpm. respecto al eje vertical de rotación.
- La superficie del baño es plana y sin perturbaciones.

El modelo de turbulencia empleado, es el denominado **k-ε**. Y se incluyó la influencia de la fuerza de gravedad como parte de las condiciones de trabajo.

Respecto a la metodología de solución de las ecuaciones de continuidad que intervienen, el primer paso es la estabilización de las ecuaciones de masa y transporte de momento en dicho sistema rotatorio con régimen turbulento. El modelo **k-ε** debe modificarse en el caso de flujos en estado transitorio y consideración de fluido incompresible. De modo que la viscosidad del fluido debe expresarse como viscosidad efectiva ($\mu_{eff} = \mu_i + \mu_t$). Las ecuaciones que gobiernan la metodología, son las ecuaciones (1) y (2) que representan la continuidad y la transferencia de momento con efectos rotacionales.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu_{eff} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k} - 2\rho e_{ipk} \Omega_p u_k - \rho e_{irs} \Omega_r (e_{spk} \Omega_p r_k) \tag{2}$$

Donde (Ω) es la velocidad angular y (e) el vector unitario. El primer término en el lado derecho de la ecuación es la fuerza de Coriolis; el cuarto término es la fuerza centrífuga.

La fuerza de Coriolis afecta los esfuerzos de Reynolds debido a que dicha fuerza actúa en dirección azimutal en un problema aximétrico (como lo es este caso).

Para flujos turbulentos, los efectos del perfil de flujo del sistema de rotación no son exclusivos de las ecuaciones de momento, pues también se afecta el procesos de transporte. Los componentes del esfuerzo de Reynolds (τ_{ij}) son afectados por las interacciones entre la velocidad angular y los otros componentes de dicho esfuerzo de Reynolds, y (τ_{ij}) en estudio afecta al perfil de velocidad. Asimismo la ecuación para la energía cinética (k) y a la velocidad de disipación (ϵ) se ven también afectadas. De acuerdo a Launder y Spalding (1972), Launder y Spalding (1974) y Craft et al. (1996).

Aquí en sistemas rotacionales el número de Richardson puede definirse como:

$$R_{it} = 2 \left(\frac{k}{\epsilon} \right)^2 e_{ipj} \Omega_p \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{3}$$

Entonces, la forma final de las ecuaciones para k - ϵ modificadas son las siguientes:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = P - \epsilon + \frac{\partial}{\partial k} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \tag{4}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P - C_{\epsilon 2} (1 + C_c) \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \tag{5}$$

Donde (v_t) es la viscosidad cinemática turbulenta (μ_t/ρ). La modificación de las constantes ($C_{\epsilon 2}$) y (C_c) se determina debido al número de Richardson utilizando las ecuaciones (6) y (7).

$$C_c = 0.2 R_{it} \tag{6}$$

$$C_{\epsilon 2} = 1.92(1 + C_c) \tag{7}$$

La viscosidad cinemática turbulenta es calculada de acuerdo a un conocimiento previo del modelo k - ϵ de acuerdo a la ecuación (8).

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{8}$$

Los valores numéricos de las constantes C_μ , $C_{\epsilon 1}$, σ_k y σ_ϵ son 0.09, 1.44, 1.0 y 1.3, respectivamente, en el modelo k - ϵ tradicional; y la ecuación de conservación para las trazas es la siguiente:

$$\frac{\partial C_{Tracer}}{\partial t} + v_i \frac{\partial C_{Tracer}}{\partial x_k} = \left[\left(\frac{\mu_l}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial C_{Tracer}}{\partial x_k} \right] \tag{9}$$

Los términos (Sc) y (Sc_t) en la ecuación anterior se refieren al Número de Schmidt laminar y turbulento, donde (Sc_t) es usualmente considerado con un valor de 0.7. El coeficiente de difusión molecular del cálculo de Número de Schmidt laminar es consecuencia de las propiedades físicas de la carga, presente en la Tabla 1.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

La diferencia principal de este trabajo con respecto a otros realizados, es que se utilizan datos de plomo líquido directamente en el proceso de cálculo del programa de simulación los cuales se muestran en la Tabla 1 (Barin, 1993), mientras que en trabajos de simulación previos se llevó a cabo con datos de agua como fluido de referencia, adimensionalizando las propiedades de los fluidos para obtener las mejores aproximaciones sobre el comportamiento de los fluidos.

Tabla 1: Propiedades del plomo utilizadas en la simulación

Propiedad	Valor
Viscosidad ($m \cdot Kg^{-1} \cdot s^{-1}$)	0.01939
Densidad ($Kg \cdot m^{-3}$)	10515.96
Peso Molecular ($Kg \cdot Kgmol^{-1}$)	207.2

La simulación se efectuó hasta obtener las condiciones de un régimen estacionario para la hidrodinámica del baño. Para esto, se fijó una secuencia en el programa de cálculo hasta la terminación de 250,000 iteraciones, que se consideraron más que suficientes de acuerdo a experiencias previas para obtener una buena aproximación del fenómeno en análisis.

Obtenido el régimen estacionario, se procedió al análisis de los perfiles de vectores de velocidad, en diversos planos axiales y radiales, así como en la superficie del mismo; esto de acuerdo a lo desarrollado en trabajos anteriores de simulación de la hidrodinámica de baños, para verificar la validez de la hidrodinámica del sistema (Plascencia-Barrera et al., 2001; Launder y Spalding, 1972; Launder y Spalding, 1974; Craft et al., 1996).

Con el régimen estacionario definido y verificando que es acorde al comportamiento general del baño agitado, se procede a observar los efectos de colocar e inyectar en diversas profundidades y distancias radiales un reactivo o trazador. Esta estrategia consiste en sustituir una porción de fluido del baño, por otra con las mismas propiedades físicas y químicas (a nivel industrial podría considerarse un isótopo del plomo). Esta estrategia es semejante a la de una pastilla de color que se libera en el fluido en movimiento y se va desintegrando conforme el fluido la arrastra, liberando el color en el fluido original utilizando la modelación física. La localización de los puntos de inyección se muestra en la Figura 4.

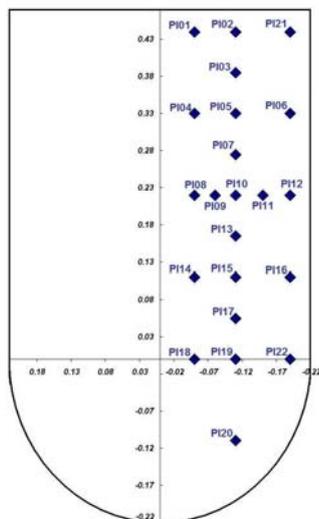


Fig. 4: Ubicación de los puntos de inyección de fluido.

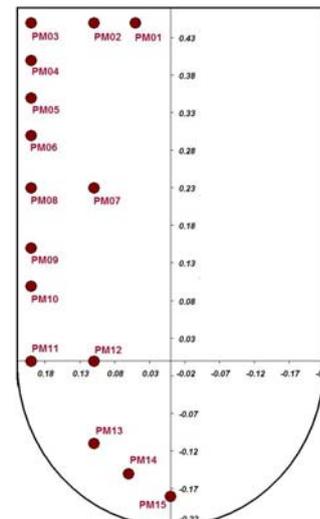


Fig. 5: Puntos de monitoreo.

La ventaja de la simulación matemática, es que el trazador es un fluido con las mismas propiedades, por lo que se puede considerar como un trazador perfecto; pero si es requerido se puede simular otro material que sea el que se utilice en la experimentación, para dar la perspectiva correspondiente al escalamiento o porcentaje de error entre simulación matemática y modelación física.

En el presente trabajo se eligieron un total de 22 puntos de inyección, tratando de cubrir las partes más significativas del baño. Los puntos se concentraron en su mayoría en la parte cilíndrica y de preferencia en cercanías de zonas de alta o de poca turbulencia (tanto el sistema de agitación y las paredes de la paila, respectivamente); solamente se probó con un punto, en la parte esférica del baño. Debido a que se consideró que el tiempo que tardaría en circular y ascender por cualquiera de las zonas incrementaría el tiempo de mezclado total.

Estos 22 puntos fueron situados en el mismo plano, debido a la simetría del reactor; con lo cual se asume un comportamiento igual para todos los planos radiales del reactor. Esto contribuye a simplificar el modelo ya que las condiciones de mezclado no varían con respecto al eje de rotación.

Durante el análisis se realiza un seguimiento de la difusividad del trazador en el baño a través del tiempo y se comparan las gráficas de concentración de los puntos de monitoreo para observar su evolución.

Puntos de monitoreo

En diversos tipos de experimentos se observa que al localizar en diferente posición a un instrumento de medición, hay una diferencia en la lectura de los resultados; o bien hay una variación del seguimiento de la propiedad medida. En los procesos de inyección de gases o sólidos en baños metálicos no se han realizado estudios sobre la variación de la posición con respecto a una propiedad; es decir derivada de una propiedad con respecto a su localización espacial dentro del dominio. Por lo que se seleccionaron varios puntos de monitoreo en diferentes secciones del dispositivo con el fin de promediar los resultados que arrojen y con ello, establecer un criterio para el comportamiento de la hidrodinámica del baño. Se consideró el uso de 15 puntos de monitoreo para contar con el mínimo de error posible acerca de lo que ocurre en la hidrodinámica del sistema. La mayoría se colocaron cerca de las paredes del recipiente, puesto que en esas zonas el tiempo de mezclado aumenta, debido a la resistencia de la fluidez debido a la rigidez del material. Estos puntos se muestran en la Figura 5.

Curvas de edad

Los puntos de monitoreo detectan el porcentaje de trazador presente que pasa a través de cada uno de estos conforme transcurre el tiempo. Cuando se realiza la sustitución del volumen determinado de fluido por el trazador comienza el monitoreo para observar la respuesta en los puntos de acuerdo a este estímulo. Esta información servirá para el trazado de las curvas de edades.

Las curvas de edad son de tipo sinusoidal amortiguadas. Estas curvas son típicas de los sistemas de varios tanques de mezclado continuo con recirculación conectados en serie; sin embargo, para el caso presentado se obtienen en sistemas de mezclado por lotes, monitoreadas en un punto específico y la respuesta esperada, son las curvas (E) o (F), que se obtienen de las lecturas de concentración de fluido que pasa por cada punto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lo más representativo de un régimen estacionario, es el perfil de vectores de velocidad; los vectores indican posibles zonas muertas o zonas con turbulencia excesiva, y estos efectos demoran el tiempo de mezclado en el sistema. En las Figuras (6-8) se muestran los perfiles de acuerdo a vistas generales (3D), en un plano y de la parte superior respectivamente de los vectores de velocidad en dicho régimen estacionario.

El comportamiento general del baño, es de un mezclado en que los vectores de velocidad siguen una misma dirección y sentido, sin embargo, debido a que la velocidad de rotación del fluido de agitación es relativamente baja, a consecuencia de lo corto de las aspas y la densidad del fluido, provocan una zona pequeña, pero visible desde la vista superior, de recirculación. Esta zona se mueve conforme transcurre el tiempo de agitación, y es propia de la hidrodinámica del baño a estas condiciones.

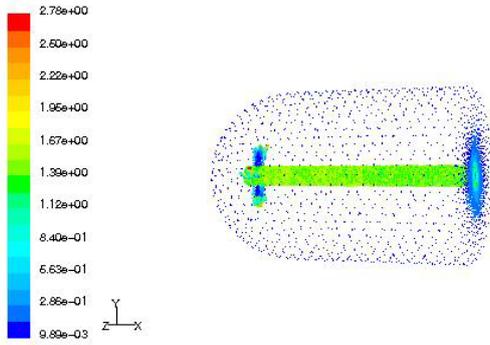


Fig. 6: Perfiles de velocidad al inicio de la simulación

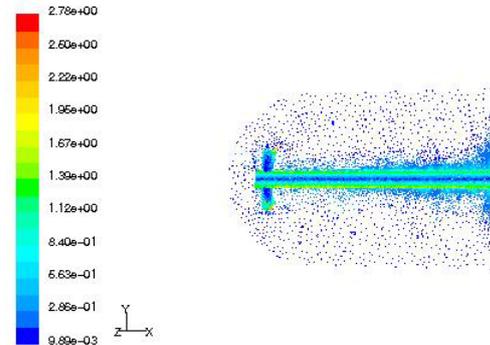


Fig. 7: Perfiles de velocidad vista frontal

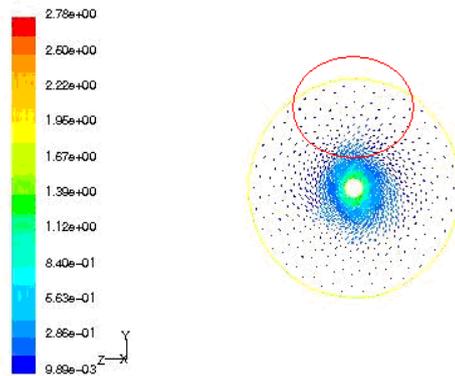


Fig. 8: perfiles de velocidad vista superior

Las zonas de turbulencia excesiva o de mayor velocidad de los vectores se localizan lógicamente en las cercanías del sistema de agitación; este hecho da pie a que los tiempos de mezclado se incrementen si se coloca la inyección cerca de estas zonas debido a que la turbulencia excesiva retiene momentáneamente el fluido para posteriormente reintegrarlo al sistema.

Con respecto al tiempo de mezclado, se consideró que al obtener una variación en valor absoluto menor a 2.5% en todos los puntos de monitoreo, se llega a la homogenización del baño. Los tiempos para los puntos de inyección se muestran en la Tabla 2. Mientras que en la Figura 9 se observa la ubicación de los puntos y sus tiempos de homogenización.

Tabla 2: Tiempos de homogenización para los puntos de inyección definidos.

Punto	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Tiempo (s)	149.0	149.5	150.0	149.5	148.0	145.5	140.5	147.5	137.5	127.0	100.5
Punto	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Tiempo (s)	120.0	122.5	139.5	66.5	143.5	142.0	46.5	142.5	142.0	153.0	152.5

Observando estos tiempos, cuando la inyección se localiza cercana a la superficie, paredes o sistema de agitación, muestra tiempos de mezclado altos como se había previsto; sin embargo, existe una zona con trayectoria parabólica suave en la Figura 10, que incluye a los puntos P18, P15, P11 en que los tiempos disminuyen, siendo el punto (P18) donde se obtiene el menor de los tiempos de mezclado. El cual esta localizado por encima de las aspadas. Mientras que el mayor tiempo de homogenización, es cuando se inyecta, muy cerca de la superficie y lejos del sistema de agitación.

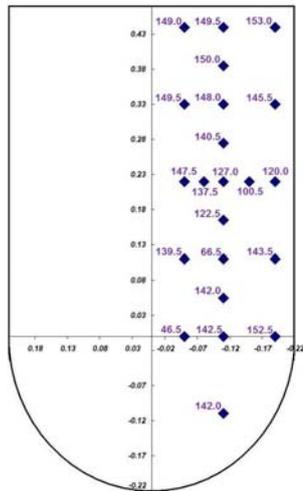


Fig. 9: tiempos de homogenización para los puntos de inyección.

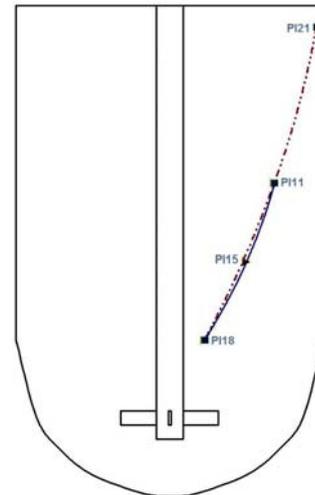


Fig. 10: Tendencia entre los puntos de monitoreo y su tiempo de homogenización

Se menciona primeramente al tiempo de mezclado en los puntos de inyección, dado que de acuerdo a este se toma una primera aproximación en el análisis de sus curvas de edades. En este caso, se usarán las inyecciones de tiempos 46.5s (P18), 100.5s (P11) y 153.0s (P21) que corresponden a los tiempos menor, medio y máximo respectivamente.

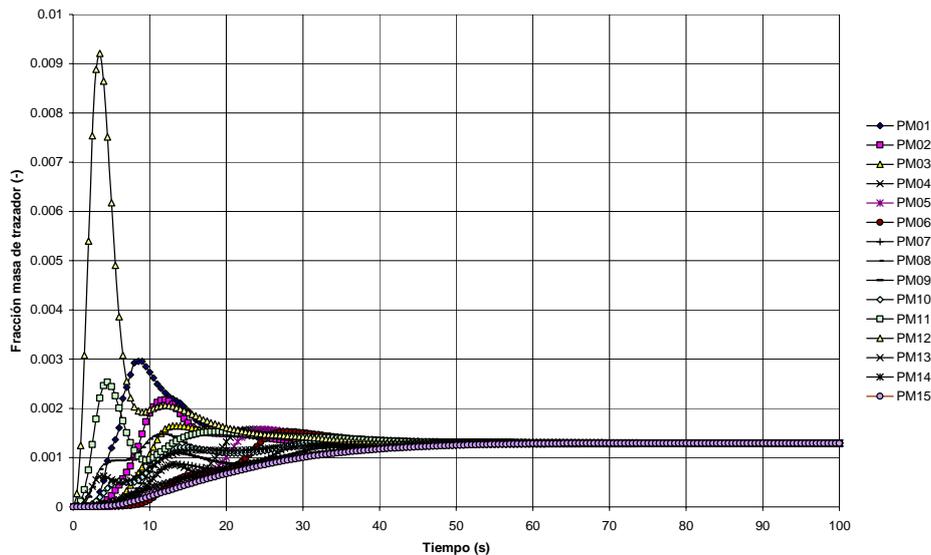


Fig. 11: Curvas de edad para el punto de monitoreo (P18).

Respecto a las curvas de edad, tomando como ejemplo al punto con el menor tiempo de homogeneización (P18, con 46.5 s), las curvas de seguimiento de fracción masa de trazador, se muestran en la Figura 11. Mientras que en las Figuras 12 y 13 se muestran los comportamientos de seguimiento de los puntos de monitoreo con los valores medio de tiempo de mezclado y el de mayor tiempo de mezclado, para fines de comparación entre gráficas.

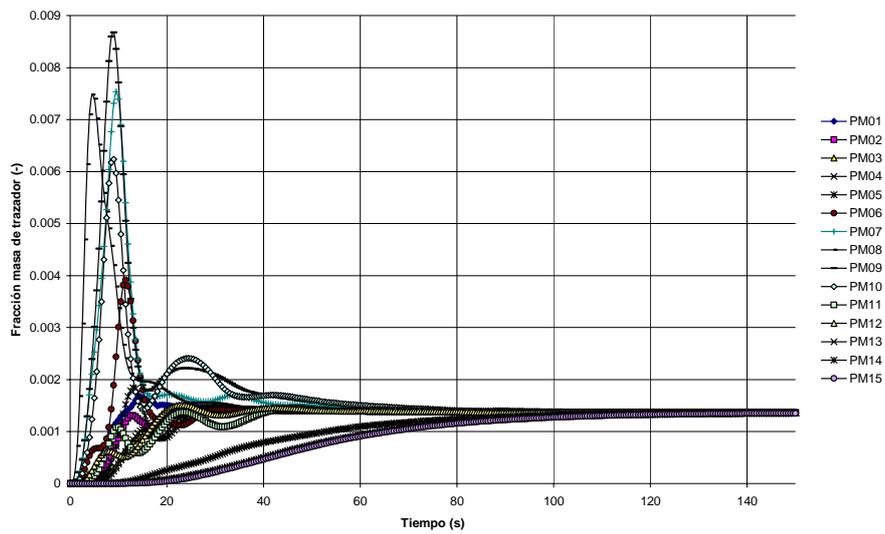


Fig. 12: Curvas de edad para el punto de monitoreo (P11).

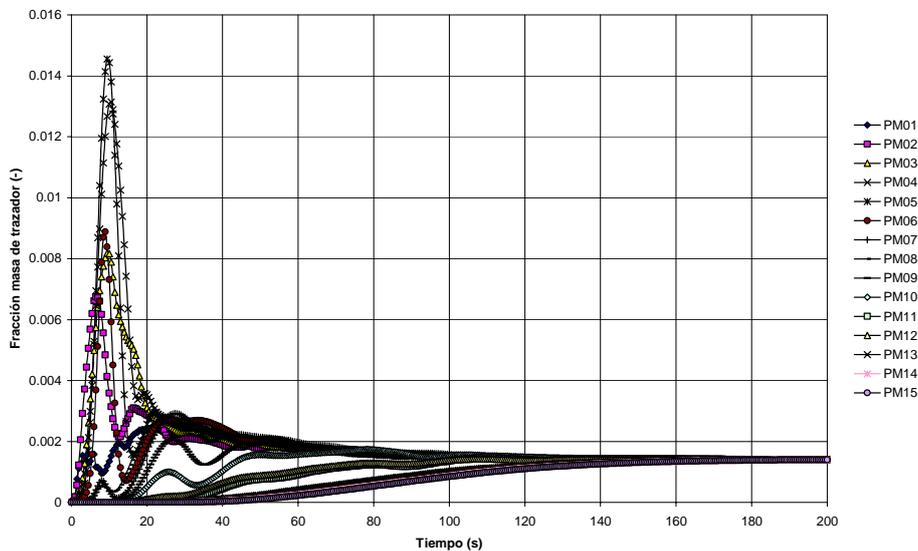


Fig. 13: Curvas de edad para el punto de monitoreo (P21)

Las gráficas coinciden bastante bien con la información de los datos de cálculo teórico, aun cuando no siempre es así; en ocasiones, y dependiendo de la escala de un gráfico, se considera que se ha llegado a un punto o criterio de corte de una propiedad a evaluar sin ser verdad necesariamente. Para ello son necesarios métodos estadísticos a los cuales se les de seguimiento, al quedar dentro o fuera de un rango determinado, se obtiene un criterio de cambio o de término de dicho seguimiento.

Finalmente se calculan los promedios de los 15 puntos de monitoreo para cada paso de tiempo. Tomando nuevamente los ejemplos de los puntos de inyección P11 (tiempo de mezclado promedio medio), P18 (tiempo de mezclado promedio menor) y P21 (tiempo de mezclado promedio mayor); y se grafica una serie de datos por cada punto de inyección, y al ubicarlos en una misma gráfica, se obtiene las curvas mostradas en la Figura 14.

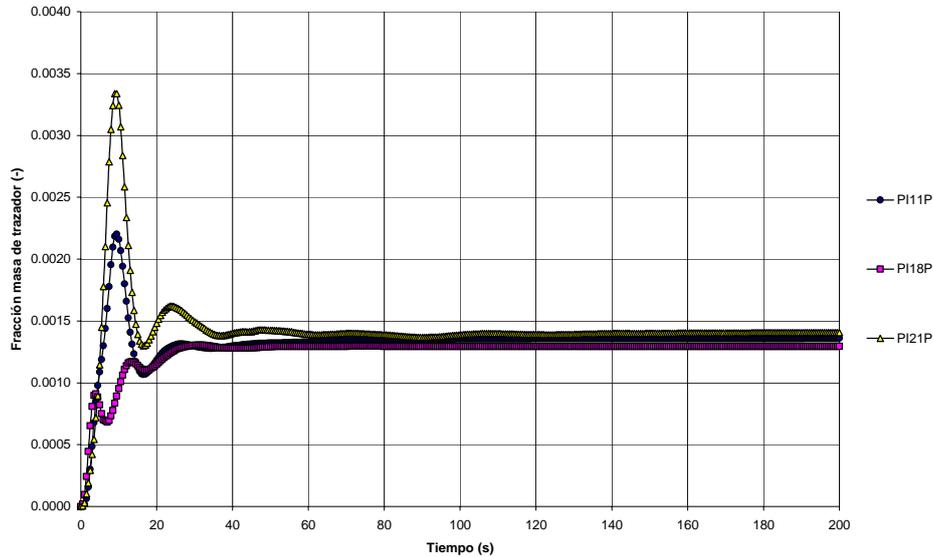


Fig. 14: Curvas promediadas de los 15 puntos de monitoreo para los puntos de inyección (P11), (P18) y (P21).

CONCLUSIONES

Los puntos de monitoreo para la inyección de trazador se consideran suficientes para obtener una dinámica apropiada de la homogenización del baño para fines de análisis.

La homogenización del baño es más rápida en el centro del reactor debido a la alta velocidad de rotación en estos.

El tiempo de homogenización puede ser empleado como criterio efectivo para mejorar la eficiencia de mezclado en los reactores.

AGRADECIMIENTOS.

Los presentes autores manifiestan su agradecimiento a las instituciones: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, Instituto Politécnico Nacional (IPN-COFAA) y a la Universidad Autónoma Metropolitana.

REFERENCIAS

Bailey, C.; Kumar, S.; Patel, M.; Piper, A.W.; Forsdick, R; Hance, S. (1999); "Comparison between CFD and measured data for the mixing of lead bullion. Second international conference on CFD in the minerals and process industries". CSIRO. Melbourne, Australia. pp. 351-374. December.

Barin, I. (1989); "Thermochemical Data of Pure Substances". Ed. VCH Verlagsgesellschaft. Germany.

- Craft, T.J.; Launder, B.E.; Suga, K. (1996); *"Development and application of a cubic eddy viscosity model of turbulence"*, Int. J. Heat & Fluid Flow: 17, 108-115.
- Dessureault Y. (1993); *"Thermodynamic Modelling of Pb Smelting in a Blast Furnace"*. Ph. D. Thesis. Ecole Polytechnique, Montreal.
- Davey T.R.A. (1980); *"The Physical Chemistry of Lead Refining Lead-Zinc-Tin"* 80. ed. J.M. Cigan, T.S. Mackay and T.J. O'Keefe. (Warrendale, PA: TMS) pp. 477-507. U.S.A.
- Kumar, S.; Bailey, C.; Patel, M.; Piper, A.W.; Forsdick, R.; Hance, S. (1999); *"Modelling the mixing of lead bullion during the refining process. Fluid flow phenomena in Metals processing"*. TMS publication: pp 187-194.
- Launder, B.E.; Spalding, D.B. (1972); *"Lectures in Mathematical Models of Turbulence"*. Academic Press. London.
- Launder, B.E.; Spalding D.B. (1974); *"The Numerical Computation of Turbulent Flows"*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 269-289.
- Levenspiel, O. (1989); *"The Chemical Reactor Omnibook"*. OSU Book Stores. January. Sections 61-78.
- Levenspiel, O. (1999); *"Chemical Reactor Engineering"*. 3rd. Edition. Wiley.
- Ohguchi, O.; Robertson, D.G.C. (1984); *"Kinetic Model for Refining by Submerged Power Injection"*. Iron and Steelmaking: 11, 262-273.
- Pinelli, D.; Megelli, F. (2000); *"Analysis of the dynamic behavior of the liquid and gas phases in reactors stirred with multiple hydrofoil impellers"*. Ind. Eng. Chem. Res.: (39), 3202-3211.
- Plascencia-Barrera, G. ; Romero-Serrano, A.; Morales, R.D.; Hallen-Lopez, M.; Chavez-Alcala, F. (2001); *"Sulfur Injection to Remove Copper from Recycled Lead"*. Canadian Metallurgical Quarterly: 40(33), 309-316.
- Romero, A.; Morales, R.; Chávez, F.; López, S; Palafox, J. (2000); *"IPN-ENERTEC Project. Elimination of copper, nickel and silver from the liquid lead"*. Department of Metallurgical and Materials Engineering, ESIQIE-IPN.
- Sawada, I.; Ahaihi, T. (1987); *"Hidrodynamics of Gas Stirred Melts"*. Tetsu-to-Hagane: 73, 669-674.
- Szalai, E.S.; Muzzio, F.J.; Bittorf, K.J. (2002); *"Validation of the ORCA CFD software for here stirred tank configurations: rushton turbine impellers, pitched bladed impeller, and the ekato interming impeller"*. January, Ph.D. Dissertation, Rutgers, The State University of New Jersey, New Brunswick, New Jersey.
- Vite, P. (2000); *"A new mathematical model to study the hydrodynamics and mixing time in liquid bath with a "L" shape rotary lance"* MSc. Thesis. ESIQIE-IPN. Febrero.
- Youngs, D.L. (1982); *Time dependent multi-material flow with large fluid distortion*. In K. W. Morton and M. J. Baines, editors, Numerical Methods for Fluid Dynamics, pages 273-285. Academic Press.

