

Método secuencial para evaluación de innovaciones en procesos industriales asistido por computadora

Roberto Suárez Antola (a), (b) y Gabriel Artucio (a), (b)

- (a) Departamento de Informática
Universidad Católica del Uruguay
- (b) Dirección Nacional de Tecnología Nuclear
Ministerio de Industria, Energía y Minería

1 _ Introducción

El diseño, la construcción y la operación de una unidad piloto con el propósito de evaluar las posibilidades de un proceso industrial nuevo, o de una modificación significativa de un proceso conocido, puede resultar bastante onerosa para muchas empresas.-

Si la comprobación resulta en verdad exitosa, nada puede ser mejor que una verificación experimental mediante una unidad que materialice el proceso en cuestión.-

Pero si de la investigación experimental se desprende que la idea propuesta no resulta viable, se habrán empleado, generalmente en vano, un conjunto considerable de recursos.-

Por otra parte, una idea que parece interesante puede en definitiva resultar en una innovación exitosa, cristalizar en una nueva patente y producir beneficios significativos, para y a través de la empresa que se arriesgó a ponerla en práctica. ¿Qué hacer entonces, si no se está en condiciones de invertir a fondos perdidos una cantidad de recursos considerable, como generalmente es necesario invertir en la investigación y el desarrollo de un nuevo proceso?

Desde hace ya varios años se ha generalizado el uso de computadoras digitales, ha disminuído sensiblemente su costo en relación con las prestaciones que pueden obtenerse de ellas y se ha incrementado el número de personas preparadas o capaces de prepararse en forma relativamente rápida para aplicar técnicas de computación digital en actividades relacionadas con investigación y desarrollo.-

Como consecuencia de todo esto, las técnicas de modelado matemático y simulación digital de procesos industriales constituyen ahora una alternativa válida para evaluar las posibilidades de una nueva idea a un costo significativamente inferior al generalmente implicado en un enfoque experimental desde el inicio.-

En el presente trabajo se discuten algunos aspectos del uso de modelos matemáticos y herramientas de simulación digital con el propósito de evaluar la factibilidad técnica de una idea nueva referente a un proceso industrial.-

La discusión se efectúa a partir del análisis de un caso concreto: una modificación significativa propuesta con la intención de mejorar la eficiencia de un proceso de enriquecimiento de soluciones empleando una cámara de reacción - difusión.-

El énfasis se pone en los aspectos metodológicos del empleo de las herramientas informáticas en la toma de decisiones sobre la viabilidad de una innovación propuesta. Se tuvo especialmente en cuenta el ámbito formado por empresas u organizaciones de tamaño modesto a escala internacional, pero que no obstante deben y pueden competir en el terreno de las innovaciones industriales.-

Los aspectos específicos relacionados con la evaluación de la factibilidad económica de una innovación en un proceso industrial no serán considerados en lo que sigue.-

Si bien algunos de estos últimos aspectos no pueden ser separados de ciertos aspectos fundamentales de la viabilidad técnica de la innovación, el análisis económico debe efectuarse en el contexto de cada empresa u organización en particular.-

2 - Un problema concreto a vía de ejemplo: la cámara de enriquecimiento convectivo difusivo

La figura 1 representa una cámara cilíndrica en cuyos extremos se hallan dos barreras semipermeables y en cuyo interior se encuentra una solución con más de un soluto. A través del sistema se hace atravesar un flujo de volumen de solvente constante. Suponiendo que en el instante inicial la concentración de los diferentes solutos no varía de un punto a otro de la cámara, el arrastre convectivo producido por el flujo tiende a aumentar la concentración en las adyacencias de la barrera distal a expensas de una depleción de solutos en las adyacencias de la barrera proximal (aquí proximal se refiere a la barrera a través de la cual el flujo de solvente penetra en la cámara). El gradiente de concentración que se produce, provoca a su vez un contraflujo difusivo que se opone al flujo convectivo, cada vez con mayor intensidad hasta que, asintóticamente, se establece un estado estacionario para cada sustancia disuelta en el que el flujo convectivo y el contraflujo dispersivo se anulan entre sí. En principio, una sustancia con menor coeficiente de dispersión se concentra relativamente más que otra con mayor coeficiente de dispersión, en las proximidades de la barrera distal. En estado estacionario una extracción de una porción de solución adyacente a la barrera distal suministra una solución enriquecida respecto

de los solutos de menor coeficiente de dispersión.-

Este proceso, que puede denominarse enriquecimiento de soluciones en cámaras de convección - difusión por gradiente diferencial, es un proceso conocido con varias áreas de aplicación entre ellas, en Petroquímica (Sherwood, Pigford y Wilke, 1975).-

Ahora bien, la velocidad con que el campo de concentraciones de un soluto tiende a la distribución estacionaria correspondiente depende del coeficiente de dispersión del soluto. Si es posible crear una situación en la que un soluto que se concentra más contra la barrera distal se aproxima más rápido a su estado estacionario, en principio, efectuando una extracción en la zona adyacente a la barrera distal en un instante adecuadamente elegido de la fase transitoria del proceso se podría obtener una solución aún más enriquecida en este componente que la solución obtenida en una extracción en estado estacionario. Esto constituiría una modificación significativa del proceso original, modificación que podría denominarse proceso de enriquecimiento convectivo - difusivo por efecto combinado de gradientes diferenciales y variaciones en los tiempos de relajación al estado estacionario. (Fue propuesto, hace cinco años, por uno de los autores. Ver Suárez Antola, 1987).-

Con el fin de precisar la discusión, consideramos una solución con dos solutos cuyas concentraciones uniformes iniciales son c_{10} y c_{20} . Representemos por $c_1(t)$ y $c_2(t)$ las concentraciones medias de esos mismos solutos en un instante t y en una porción de la solución en forma de rodaja adyacente a la barra distal. Supongamos que $c_1(t)$ y $c_2(t)$ son, cualitativamente, como sugieren las figs. 2 y 3.-

Definamos ahora un coeficiente de enriquecimiento relativo de la sustancia 1 respecto de la sustancia 2.-

$$\alpha_{12}(t) = \frac{c_{20}}{c_{10}} \cdot \frac{c_1(t)}{c_2(t)}$$

Para el caso correspondiente a las figs. 2 y 3, $\alpha_{12}(t)$ se comporta cualitativamente como muestra la fig. 4. Parte de un valor igual a la unidad y tiende a un valor estacionario superior a la unidad, porque la sustancia 1 se concentra relativamente más que la sustancia 2 (la 1 posee menor coeficiente de dispersión que la 2). Esta propiedad es la utilizada en el proceso de enriquecimiento difusivo-convectivo clásico. Pero durante la aproximación al valor estacionario, $\alpha_{12}(t)$ presenta una fase transitoria por exceso, en un instante

t_m para el que $\alpha_{12}(t)$ toma su valor máximo $\alpha_{12,m}$.

La creación de situaciones en las que se presenta esta fase transitoria por exceso constituye, precisamente, la base de la modificación propuesta al proceso de enriquecimiento difusivo-convectivo.-

Surgen de inmediato algunas interrogantes importantes. ¿Se produce realmente en alguna circunstancia una fase transitoria por exceso, en el coeficiente de enriquecimiento? Si se produce la fase transitoria: ¿en qué condiciones se produce? ¿Cuánto vale el cociente $(\alpha_{12,m} - \alpha_{12,\infty})/\alpha_{12,\infty}$ que da una medida del incremento en la eficiencia del nuevo proceso de enriquecimiento respecto del proceso original? ¿Cuál es el instante t_m en el que $\alpha_{12}(t)$ alcanza su valor máximo? ¿Cuánto dura la fase transitoria por exceso que presenta α_{12} ? ¿Cómo combinar las condiciones del sistema de forma de obtener una fase transitoria de amplitud y de duración adecuadas para efectuar la correspondiente extracción con el máximo de eficacia en el enriquecimiento?

3 - El rol de los modelos matemáticos y la simulación digital de procesos físicos o fisicoquímicos en la evaluación de innovaciones industriales

El procedimiento tradicional para evaluar la factibilidad técnica de proyectos que involucran nuevos procesos físicos o fisicoquímicos, o bien conlleven modificaciones significativas de procesos ya establecidos - como es el caso concreto estudiado en este trabajo - puede resumirse en un esquema (ver esquema 1).

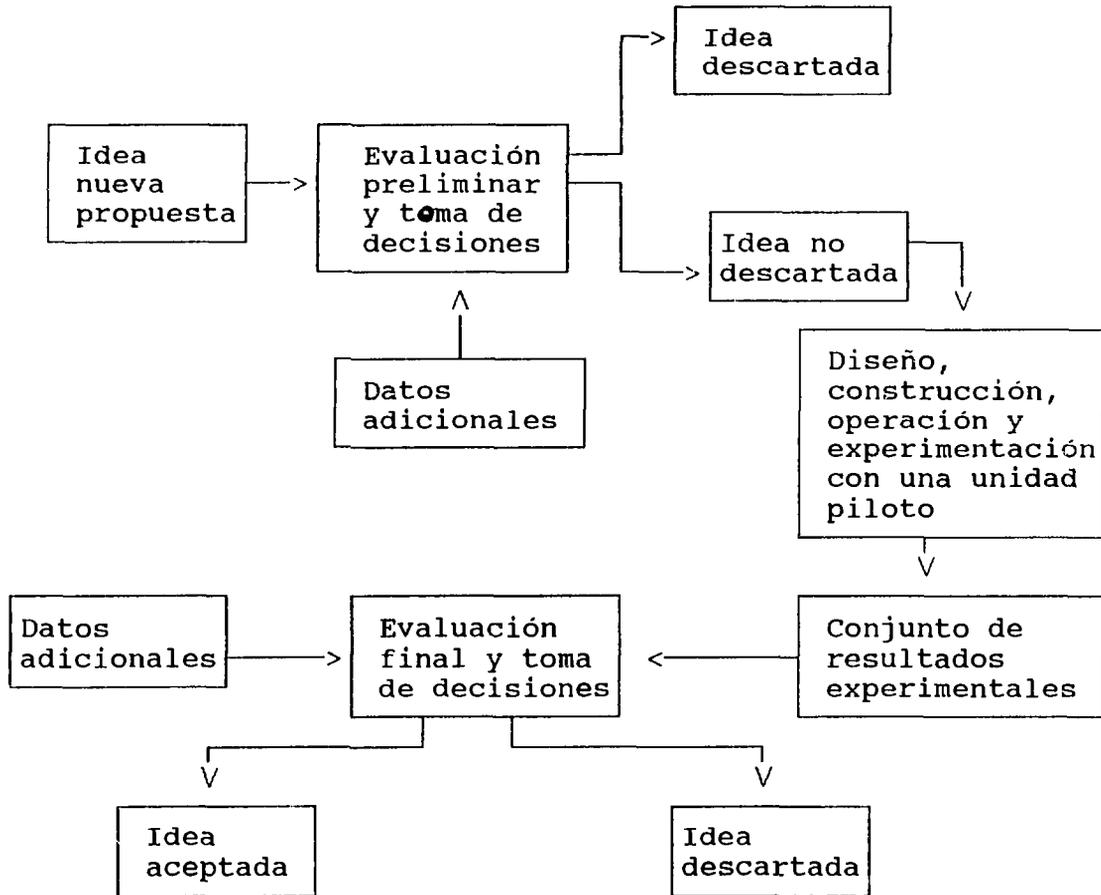
Frente a la propuesta de modificar el proceso de enriquecimiento convectivo - difusivo en el sentido de efectuar una extracción en un instante escogido de la fase transitoria del proceso, se podría haber seguido el procedimiento del esquema 1.

Aquí el punto clave es convencerse de la existencia, en ciertas condiciones al menos, de una fase transitoria por exceso en el coeficiente de enriquecimiento relativo, tal como se describió en la parte (2). Si se llega a la conclusión de que esto no es posible, o que si ocurre lo hace en condiciones de operación inverosímiles, la idea será descartada de plano.-

Si se acepta que el fenómeno realmente debe producirse en ciertas condiciones (de modo que en principio la idea no se descarta), se puede pasar a la etapa que involucra la investigación del proceso mediante una unidad piloto. Luego de cumplida esta etapa, muchas veces larga y costosa, se podrá encarar una valoración definitiva de la innovación propuesta. Si resulta que las condiciones en las que se produce una fase transitoria por exceso son fácilmente reproducibles a escala industrial y si la duración y la amplitud de dicha fase son lo

bastante grandes como para que la modificación propuesta resulte un éxito, el esfuerzo destinado a la unidad piloto habrá sido bien empleado. Pero si, por ejemplo, la amplitud de la fase transitoria resulta demasiado pequeña en las condiciones de operación accesibles para un proceso industrial, la modificación propuesta deberá ser descartada. La idea finalmente no habrá resultado viable pese a que en la evaluación previa a la etapa de la unidad piloto, no fue descartada.-

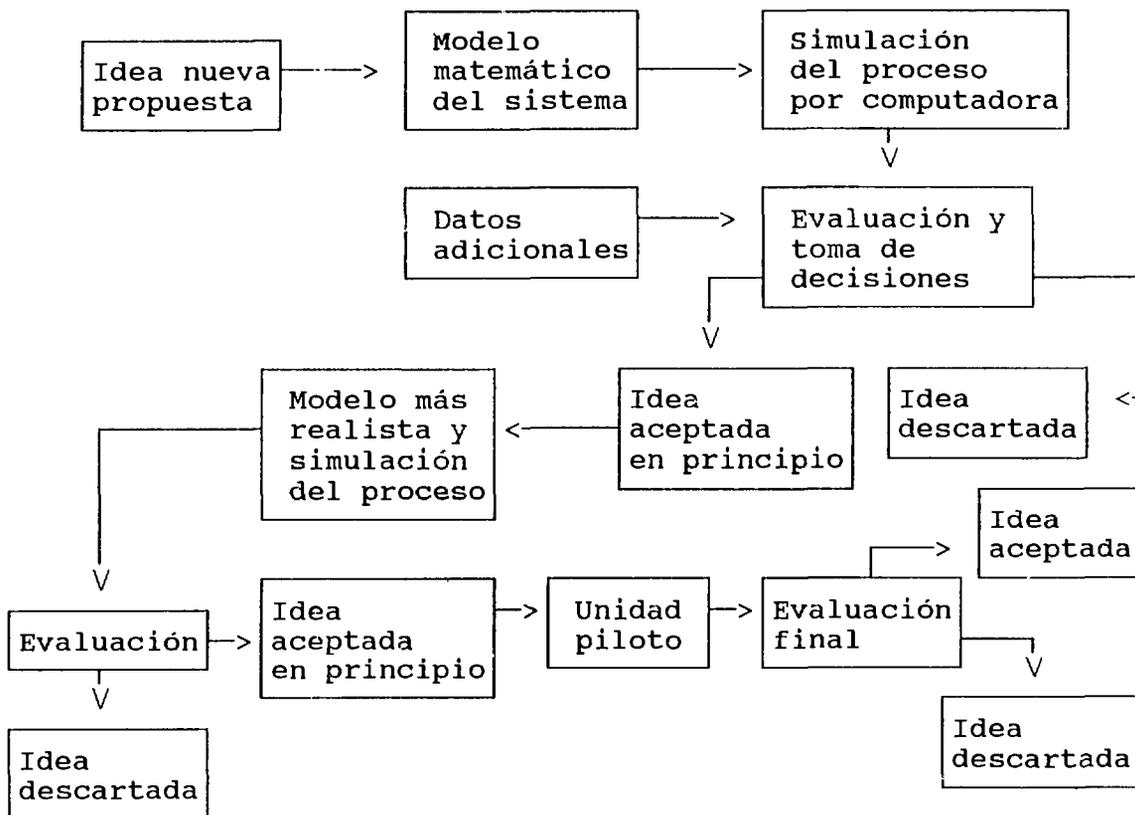
ESQUEMA1



La aplicación de técnicas informáticas de bajo costo relativo adquiere una especial importancia cuando la idea explorada resulta ser, en última instancia, no viable. En efecto, es posible sustituir el tipo de evaluación preliminar a la etapa de la unidad piloto que muestra el esquema 1, por una evaluación más profunda basada en el uso de técnicas de modelización matemática y simulación digital de procesos.-

En el esquema 2 siguiente se propone una alternativa que permite disminuir la verosimilitud de tomar la decisión de entrar en la etapa de la unidad piloto cuando la idea va a resultar en última instancia no viable.-

ESQUEMA 2



La modelización matemática y la simulación digital del proceso en cuestión se deberían realizar en dos etapas consecutivas.-

En la primer etapa el énfasis se pone en construir un modelo simplificado tal que si a partir de él se obtiene que la innovación propuesta no es viable, entonces un modelo más sofisticado y más realista conducirá seguramente a la misma conclusión. En caso de que la idea no deba ser descartada en esta primera etapa, se pasará a una segunda etapa de modelización y simulación digital, en la que el esfuerzo se centrará en estudiar

la influencia de los fenómenos despreciados en la primera etapa. Si de la segunda etapa de simulación se desprende la aparente viabilidad técnica del proceso propuesto, esto todavía debe confirmarse mediante una unidad piloto. Pero generalmente el diseño de los experimentos de prueba se facilita mucho gracias a la información obtenida en las etapas informáticas de la evaluación, su costo disminuye sensiblemente y la verosimilitud del éxito final aumenta disminuyendo el riesgo de la inversión correspondiente.-

En la parte (4) siguiente se estudiarán algunos aspectos de la construcción y el análisis de un modelo matemático simplificado del proceso de enriquecimiento por gradiente diferencial y variación en los tiempos de relajación, tal que pueda ser utilizado para un "descarte seguro" de la innovación propuesta (es decir, tal que presumiblemente cualquier otro modelo más detallado que se pueda construir conduzca también al descarte de la idea si este primer modelo conduce ya a esa conclusión).-

4 _ Construcción y análisis de un modelo matemático simplificado para el proceso de enriquecimiento

Considerando una cámara cilíndrica de sección transversal de área A y longitud L entre las membranas semipermeables que la limitan (fig1), suponemos que la ocupa una solución con p componentes ($p \geq 2$). En general el campo de velocidad asociado al flujo varía con la posición del punto considerado respecto del eje de la cámara. Si el flujo no es laminar, es necesario tener en cuenta el sistema de vórtices fluctuantes característico. A su vez, estas variaciones en el campo de velocidad se acoplan con el mecanismo de difusión molecular generando procesos de transporte por convección diferencial y difusión turbulenta que, para ser estudiados en detalle exigen una descripción tridimensional en el espacio. En las regiones adyacentes a la barrera distal, donde se concentran los solutos debido al arrastre convectivo, puede ser necesario tener en cuenta los efectos cruzados entre los procesos de transporte de los diferentes componentes de la solución. Entonces, una vez resuelto el problema de describir el campo de velocidad del fluido, es necesario describir la evolución temporal y la distribución espacial de p campos de concentración que se rigen por un conjunto de p ecuaciones a derivadas parciales acopladas.-

Pero para construir un modelo simplificado que eventualmente permita descartar en forma segura la idea propuesta, basta con limitarse a un modelo global unidimensional del proceso de convección difusión, suponiendo además que no hay acoplamiento difusivo entre solutos.-

Colocando el eje x sobre el eje de la cámara, con $x = 0$ en la barrera proximal y $x = L$ en la barrera distal, denominando v a la velocidad media del flujo (que se supone constante) y D_s al coeficiente global de dispersión, se obtiene que, si $c_s(t,x)$ representa la concentración global en el instante t y en el punto x , se verifica la conocida ecuación de transporte:

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial c_s}{\partial x} = D_s \frac{\partial^2 c_s}{\partial x^2}$$

(Suárez Antola, 1987) Puesto que las barreras se suponen semi-permeables, el flujo global

$$J_s(t,x) = c_s(t,x)v - D_s \frac{\partial c_s}{\partial x} \quad [2]$$

debe anularse permanentemente para $x = 0$ y para $x = L$. Las condiciones de borde $J_s(t,0) = J_s(t,L) = 0$ para todo t junto con la condición inicial $c_s(0,x) = c_{s0}$ (constante) para todo x comprendido entre 0 y L , junto con la ecuación de convección-difusión [1] determinan el campo $c_s(t,x)$ para cada uno de los solutos presentes en la cámara, a partir del instante inicial $t = 0$ en el que se supone se establece el flujo.-

Con el propósito de independizar el análisis de los valores particulares que pudieran adoptar los parámetros y con el fin de aumentar la eficiencia del proceso de simulación digital realizado a partir del modelo, es conveniente adimensionalizar variables y parámetros como se indica a continuación:
Definiendo

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad \tau = \frac{t}{t_c}, \quad t_c = \frac{L^2}{D_s},$$

$$P_s = \frac{t_d}{t_c} = \frac{v \cdot L}{D_s} \quad \text{y} \quad \sigma_s(\tau, \xi) = \frac{c_s(t,x)}{c_{s0}}$$

la ecuación [1] queda bajo la forma

$$\frac{\partial \sigma_s}{\partial \tau} + \frac{\partial \sigma_s}{\partial \xi} = \frac{1}{P_s} \frac{\partial^2 \sigma_s}{\partial \xi^2} \quad [3]$$

las condiciones inicial y de borde son ahora, respectivamente:

$$\sigma(0, \xi) = 1 \text{ para } \xi \in [0, 1],$$

$$P_s \sigma_s(\tau, 0) = \frac{\partial \sigma_s}{\partial \xi}(\tau, 0) ; P_s \sigma_s(\tau, 1) = \frac{\partial \sigma_s}{\partial \xi}(\tau, 1) \text{ para todo } \tau \geq 0 \quad [4]$$

La ecuación adimensionalizada depende así de un solo parámetro, el número de Peclet P_s que es el cociente entre un tiempo t_c característico del proceso de convección y un tiempo t_p característico del proceso de dispersión longitudinal en la cámara.-

La ecuación [3] con las condiciones inicial y de contorno [4] puede resolverse (por ejemplo, por separación de variables) obteniéndose una solución analítica

$$\sigma_s(\tau, \xi) = \sigma_{s,\infty}(\xi) + f_s(\tau, \xi) \quad [5]$$

donde

$$\sigma_{s,\infty}(\xi) = \frac{P_s e^{P_s \xi}}{e^{P_s} - 1} \quad [6]$$

y $f_s(\tau, \xi)$ es un término que tiende a cero cuando τ tiende a $+\infty$ viniendo dado por la fórmula:

$$f_s(\tau, \xi) = \sum_{n=1}^{+\infty} B_{s_n} e^{\frac{P_s \xi}{2}} \sin(n\pi\xi + \theta_{s_n}) e^{-\frac{\tau}{T_{s_n}}} \quad [7]$$

$$\text{donde } \text{tg } \theta_{s_n} = \frac{2 \cdot n}{P_s} \quad (n= 1, 2, 3, \dots) \quad [8a]$$

$$T_{s_n} = \frac{4 \cdot P_s}{P_s^2 + 4 \cdot \pi^2 \cdot n^2} \quad (n= 1, 2, 3, \dots) \quad [8b]$$

Aquí $\sigma_{s,\infty}(\xi)$ es el perfil adimensional estacionario de

$$Y_{B_{sn}} = 2 \cdot \int_0^1 (1 - \sigma_{s,n}(\xi)) \cdot \exp(-P_s \cdot \frac{\xi}{2}) \cdot \sin(n \cdot \pi \cdot \xi + \theta_{sn}) d\xi \quad [8c]$$

concentración (el que se emplea en el proceso de enriquecimiento difusivo-convectivo por gradiente diferencial), mientras que $f_s(\tau, \xi)$ es una combinación de funciones exponenciales de τ que se relajan a cero con tiempos de relajación dados por la fórmula [8b] (Suárez Antola, 1987).

Teniendo en cuenta la definición del coeficiente de enriquecimiento relativo α_{12} así como la definición de las variables τ , ξ y σ_s , resulta que

$$\alpha_{12} = \frac{\sigma_1(\tau, \xi)}{\sigma_2(\tau, \xi)}$$

A partir de la solución analítica de la ecuación de campo para σ_s es posible demostrar que si $P_1 > P_2 \geq 2\pi$ y si ξ está lo bastante próximo a 1, el coeficiente de enriquecimiento relativo $\alpha_{12}(\tau, \xi)$ presenta efectivamente una fase transitoria por exceso (Suárez, Bernasconi y Bertolotti, 1992). El problema que se tiene ahora es determinar cuándo ocurre, cuánto dura y cuál es su amplitud para sustancias con números de Peclet mayores que 2π .

Una vez en posesión de esta información se puede realizar una primera evaluación de la innovación propuesta.-

5 _ Simulación digital del proceso convectivo-difusivo.

La simulación digital del proceso puede efectuarse de dos formas. Cuando se conoce la solución analítica, como en este caso, se la puede utilizar como base para la simulación (Suárez, Bernasconi y Bertolotti, 1992). Al comienzo del proceso, este método presenta serias dificultades relacionadas con la convergencia de la serie de funciones [7], cuyo efecto sobre la evolución posterior es difícil de precisar. Como consecuencia es conveniente efectuar una simulación ab-initio, discretizando directamente la ecuación de campo, la condición inicial y las condiciones de borde. Para ello se tiene paquetes de software disponibles en el mercado (Atkinson, 1989, Apéndice). No obstante el modelo matemático para la simulación es en este caso lo

bastante simple como para poder programarlo ad-hoc. Para calcular la función reticular correspondiente al campo $\sigma_s(\tau, \xi)$ se puede utilizar un esquema en diferencias explícito, teniendo cuidado con el efecto de las condiciones de borde dicretizadas que en este caso son el tipo de Robin, sobre la estabilidad del proceso de cálculo (Artucio y Suárez 1992) Esta última dificultad puede ser eludida sustituyendo la ecuación de campo para la concentración adimensionada $\sigma_s(\tau, \xi)$ por una ecuación de campo para el flujo adimensionado

$$\sigma_s(\tau, \xi) = \frac{1}{P_s} \cdot \frac{\partial \sigma_s}{\partial \xi}(\sigma, \xi)$$

Esta ecuación resulta formalmente idéntica a la ecuación para $\sigma_s(\tau, \xi)$ pero está sometida a condiciones de borde de Dirichlet (pues los flujos se anulan en las barreras distal y proximal) con lo que no presenta los inconvenientes asociados a la condición de borde de Robin en un esquema explícito a diferencias. De todos modos, para los objetivos que se persiguen en este trabajo es suficiente trabajar sobre la base de la ecuación para la concentración adimensionada.-

El esquema explícito a diferencias fue implementado en lenguaje C y ejecutado en un PC compatible 386 bajo sistema operativo DOS.

La rutina C que se muestra a continuación calcula la función reticular y genera un archivo ASCII con las coordenadas de los puntos solución.-

Se utilizan diferencias hacia adelante para aproximar la derivada primera y las condiciones de borde, y diferencia central para aproximar la derivada segunda.-

El archivo ASCII generado se utilizó como entrada para el SURFER de modo de obtener los resultados gráficos que se muestra en la figura 5.

El método explícito presenta tres grandes ventajas frente a los métodos implícitos: es sumamente rápido, no consume memoria y es sumamente fácil de implementar y depurar como puede verse en la porción de código que se muestra.-

```

#include<stdio.h>
#include<math.h>

float U[2][50];

main ()
{
    int i,j,cant;
    float k,h,r,p,p1,p2,p3;

    FILE *fopen(), *fp;

    printf ("ingrese número Peclet\n");
    scanf("%f",&p);

    fp = fopen("c:\\pde\\datos\\diffus3.dat","w")
    if (fp == NULL)
        {
            printf ("error en open de arch. de salida\n");
            exit(0);
        }

    k = 0.0002;
    h = 0.02;
    r = k / (h * h);
    p1 = r*(1/p + h/2);
    p2 = 1 - 2*r/p;
    p3 = r*(1/p - h/2);

    for (j=1;j<=50;j++)
        U[1][j] = 0.5;

    for (cant=1;cant<=25;cant++) /*cant. de ptos en el tiempo a
        grabar */
    {
        for (j=1;j<=50;j++)

            fprintf(fp,"%lf %lf %lf\n", (cant-1)*h,
                (j-1)*h,U[1][j]);

        for (i=1;i<=100;i++) /* se saltean 100 ptos en t para
            obtener grilla cuadrada ya que
            h = 100.k */

            {
                for (j=2;j<=49;j++)

                    {
                        U[2][j] = (p1 * U[1][j-1]) + (p2 * U[1][j]) + (p3 *
U[1][j+1]);
                    }
                U[2][1] = U[2][2] * (1 - h * p);
            }
    }

```

```

U[2][50] = U[2][49] * (1 + h * p);
for (j=1;j<=50;j++)
    U[1][j] = U[2][j];
}
}
fclose (fp);
}

```

6 _ Discusión y Conclusiones.

El modelo matemático simplificado y la simulación digital efectuada sobre la base de este modelo permite volver sobre las preguntas planteadas al final de la parte (2) de este trabajo.-

Cuando $P_1 > P_2 \geq 2\pi$ se produce siempre una fase transitoria por exceso en el coeficiente de enriquecimiento. Puesto que

$$P_s = \frac{v \cdot L}{D_s}$$

en principio siempre se puede verificar esa desigualdad aumentando el producto vL lo suficiente, no importa cuáles sean los valores (distintos entre sí) de los coeficientes de dispersión globales D_1 y D_2 de las sustancias consideradas.-

El cociente

$$\frac{\alpha_{12,m} - \alpha_{12,\infty}}{\alpha_{12,\infty}}$$

es tanto mayor cuanto mayor es el cociente P_1/P_2 y cuanto más próximo a 2π se encuentra P_2 . No obstante, para una relación

$$\frac{P_1}{P_2} = 5$$

el incremento de eficiencia del nuevo proceso alcanza apenas a un 1% (Suárez, Bertolotti y Bernasconi, opcit.; Artucio y Suárez, opcit).

Como consecuencia parecería que, en principio, la idea debe descartarse porque la mejora obtenida en el proceso de enriquecimiento es muy pequeña comparada con el proceso clásico. Las demás interrogantes (sobre el instante en el que se produce el máximo en el coeficiente de enriquecimiento, sobre la duración de la fase transitoria por exceso y otros) que por sí mismos pueden presentar un considerable interés desde un punto de vista científico, no lo tienen ya desde el punto de vista industrial, en vista de los resultados obtenidos durante la simulación digital del proceso.-

Como consecuencia de todo esto se decidió descartar la idea, evitando así entrar en la fase de construcción, operación y experimentación con una unidad piloto.-

Si la idea se hubiera juzgado en primera instancia como viable, habría que haber entrado en una segunda fase de modelización más realista y de simulación digital más detallada y exhaustiva, previa a tomar la decisión de entrar o no en la fase de la planta piloto.-

Si bien la segunda fase de simulación digital presenta exigencias bastante mayores desde el punto de vista computacional, una formulación cuidadosa del problema permite tratarlo en profundidad y sin grandes dificultades mediante una máquina del tipo de la IBM PC 486 adecuadamente complementada para el cálculo numérico y la representación gráfica de los resultados obtenidos. Esta es una facilidad que ahora está disponible en muchas empresas - debiendo a lo sumo ser complementada a un costo muy bajo.-

Puesto que la tendencia que se observa en el mercado es ofrecer máquinas capaces de mayores prestaciones a un costo cada vez menor, y puesto que la construcción y operación de una unidad piloto generalmente mantiene su cosco o bien éste disminuye mucho menos que el de un computador, la conveniencia de encarar la evaluación de una innovación en un proceso industrial de la forma propuesta en este trabajo, va a ser cada vez mayor durante los próximos años.-

Es necesario señalar ahora una limitación importante de este método secuencial de evaluación, relacionada precisamente con el empleo de la simulación digital en las primeras etapas de su aplicación en el estudio de posibles innovaciones.-

Sólo es aplicable cuando las leyes que rigen el proceso en cuestión están lo suficientemente bien conocidas y se pueden formular en un nivel cuantitativo preciso que permita la construcción de modelos matemáticos del sistema así como modelos matemáticos para la simulación capaces de reproducir fielmente el proceso material considerado. Esto, generalmente, es posible cuando se trata de procesos físicos o fisicoquímicos, pero puede no ser posible en algunos casos que involucran, por ejemplo,

procesos biotecnológicos. En estos últimos casos no cabe esperar obtener resultados confiables de la simulación, tanto cuando se trata de descartar como cuando se trata de confirmar una nueva idea y el riesgo de experimentar con una unidad piloto debe, generalmente, ser asumido de entrada.-

Bibliografía

- Artucio Gabriel y Roberto Suárez Antola (1992) "Simulación de un proceso de enriquecimiento de soluciones mediante una cámara de convección - difusión. Segunda parte"
- Atkinson, K. (1989) " Numerical Analysis" (2da. ed, Wiley, N.Y.)
- Sherwood, Th, Pigford, R. y Ch. Wilke (1975) "Mass Transfer" (Mc. Grau - Hill, N.Y.)
- Suárez Antola R. Bertolotti A. Artucio G. (1992) "Simulación de un proceso de enriquecimiento de soluciones mediante una cámara de convección - difusión. Primera Parte"
- Suárez Antola R. (1987) Reporte Interno EA7, CNEA, Montevideo, Uruguay.

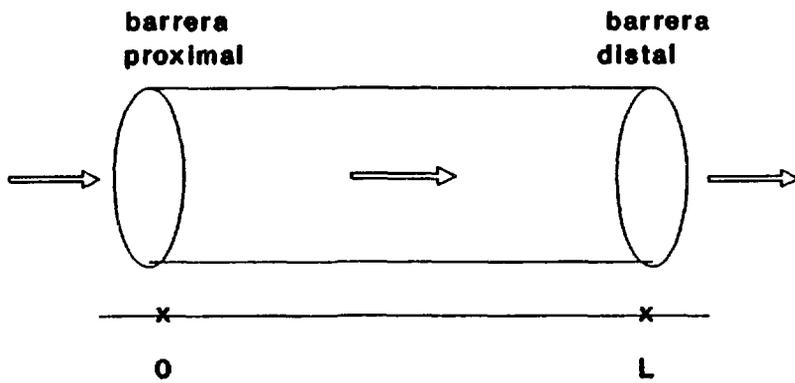


Fig. 1 _ Cámara de Convección-Difusión

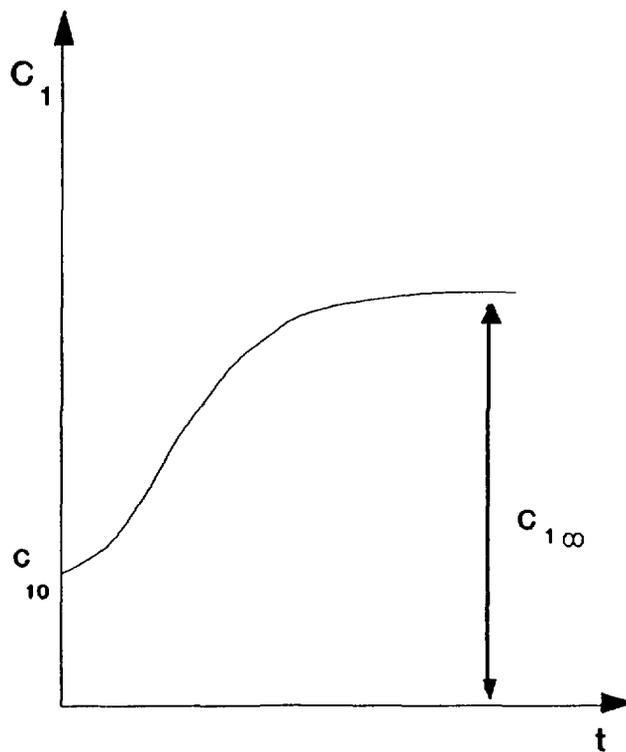


Fig. 2 _ Concentración media del soluto 1

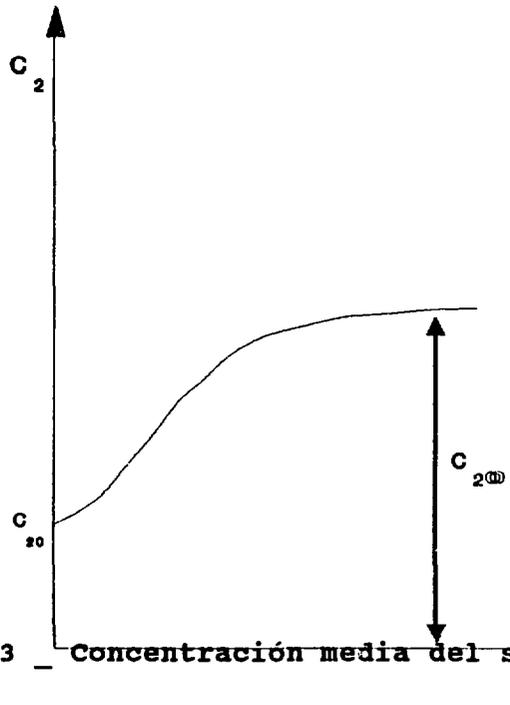


Fig. 3 - Concentración media del soluto 2

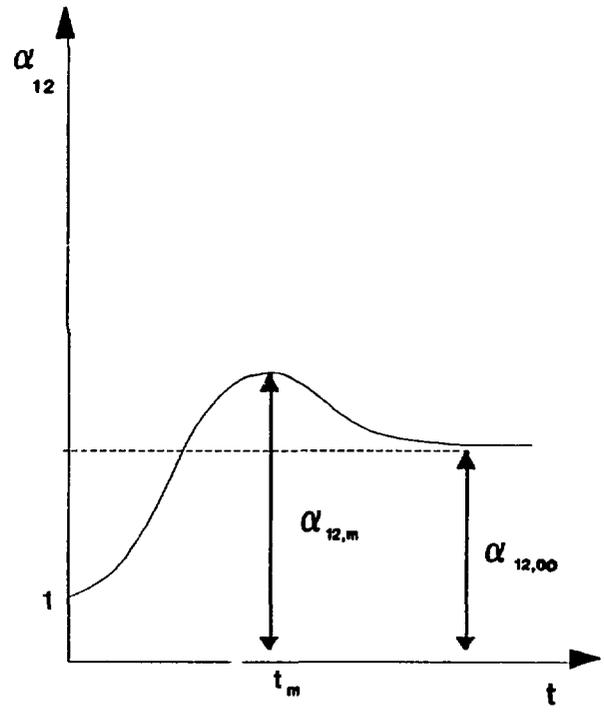


Fig. 4 - Coeficiente de enriquecimiento relativo

