

MEZCLADO EN ROTORES DE COMPRESORES AXIALES MULTIFLUJO

Darío F. Delmastro, Daniel O. Brasnarof

Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica
Av. Bustillo km 9,5 - 8400 San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio del mezclado en las cámaras de los rotores de compresores axiales multiflujo, problema básicamente convectivo. Debido a la complejidad del problema se utiliza un modelo simplificado, el cual considera al sistema como un canal bidimensional con flujo plano (slug flow), con condiciones de entrada periódica y bordes aislados. Dada la simplicidad del modelo es posible obtener una solución analítica para la función de transferencia entre la entrada y la salida. Los resultados obtenidos son utilizados para validar diferentes esquemas numéricos, encontrándose que para geometrías simples y problemas convectivos, el método de diferencias finitas resulta más preciso y rápido que el método de elementos finitos empleado.

ABSTRACT

This paper present a study of the axial multifold compressors rotor chambers mixing, which is basically a convective problem. Due to the problem complexity a simplified model is used, which considers the system as a channel (bidimensional) with slug flow, periodic inlet conditions and isolated edges. The model simplicity allows an analytical solution for the transference function among the inlet and the outlet. The results obtained are used to validate different numerical schemes. It was found that for simples geometries in convective problems, the finite difference method is more accurate and faster than the finite volume method.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo al caudal a impulsar, las diferentes clases de compresores tienen un rango de aplicación en donde por cuestiones de eficiencia predomina un diseño sobre los otros. Los de mayor eficiencia son los axiales, pudiéndose alcanzar eficiencias entre el 80 al 85 %, siguiéndoles los centrífugos con una eficiencia entre el 70 al 75 %, y por debajo de estos los de desplazamiento positivo (lobulares). Los compresores axiales se emplean para caudales altos, mientras que los lobulares para caudales muy bajos y los centrífugos en la región intermedia [1][2].

Las plantas de enriquecimiento de uranio por difusión gaseosa, requieren de una gran cantidad de compresores para mantener la diferencia de presión necesaria del proceso, consumiendo una gran cantidad de energía para tal fin [3]. Por dicho motivo un buen diseño de las mismas, emplea como elemento impulsor a los compresores axiales, pero estos debido a su rango de aplicación, sólo pueden ser utilizados en grandes plantas de producción [4].

El nuevo concepto de planta de difusión gaseosa SIGMA [5], se basa en el impluso de varias corrientes de diferente concentración por un mismo compresor (multiflujo), consiguiendo reducir el tamaño mínimo de la planta económicamente competitiva.

El empleo de compresores axiales con corrientes de diferente concentración tiene como limitante el mezclado entre las mismas [6]. Para determinar el mezclado se deben conocer las características geométricas, las condiciones fluido-dinámicas y las propiedades del gas [7].

Un compresor cuenta con filas de álabes móviles (rotores) y fijos (estatores) que delimitan las cámaras por donde pasa el fluido. Debido a ello, el problema se puede dividir en el estudio de la dispersión en las cámaras de los rotores y de los estatores. Las primeras tienen como condición de ingreso una concentración de entrada periódica en el tiempo, mientras que para las segundas puede considerarse como buena aproximación una entrada estacionaria [8].

Este trabajo se concentra en la resolución del mezclado en las cámaras de los rotores. Como primera aproximación se desarrolla un modelo simple el cual considera un canal con condiciones de entrada periódicas y bordes aislados. Este modelo permite analizar otros problemas como la dispersión de contaminantes en cursos de agua. Se busca generar los criterios para que la resolución numérica sea computacionalmente económica debido a la magnitud del cálculo necesario para la resolución íntegra de un compresor.

RESOLUCIÓN ANALÍTICA DE LA ECUACIÓN DE CONVECCIÓN-DIFUSIÓN

En la resolución de problemas por métodos numéricos es conveniente poseer alguna solución conocida con la cual poder estimar el error numérico del esquema empleado. Por ello, en este trabajo se obtiene en forma analítica, por el método de separación de variables, la función de transferencia para el problema de convección-difusión anisotrópica en un recinto rectangular con condición de borde armónica en la cara de entrada del flujo, en las caras laterales se considera nula la derivada de la concentración en la dirección normal a las mismas, y en la cara de salida de la derivada de la concentración en la dirección del flujo es nula.

Esta solución puede utilizarse para analizar situaciones con distintas condiciones periódicas, las cuales pueden representar en forma simplificada el comportamiento del rotor de un compresor axial multiflujo, en donde las condiciones de contorno de las caras laterales representan la existencia de los álabes, y en la cara de salida puede considerarse que el rotor debido a su giro se encuentra aislado del estator siguiente.

La ecuación diferencial del problema de convección-difusión anisotrópica de un escalar C (concentración) en un recinto rectangular con velocidad uniforme U es:

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = U \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

donde D_x y D_y son los coeficientes de difusión para cada una de las componentes, y las condiciones de contorno para el recinto que compone la cámara (ver figura 1) pueden escribirse de la siguiente forma:

$$C(0, y, t) = C_o e^{i(\omega t + \Omega y)} = C_o e^{i\omega t} (\cos(\Omega y) + i \operatorname{sen}(\Omega y)) \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial y}(x, 0, t) = \frac{\partial C}{\partial y}(x, L_y, t) = \frac{\partial C}{\partial x}(L_x, y, t) = 0 \quad (3)$$

donde C_0 es la amplitud de la oscilación, i es la unidad imaginaria, s representa la frecuencia temporal, Ω es la frecuencia espacial, L_x y L_y son las dimensiones del recinto.

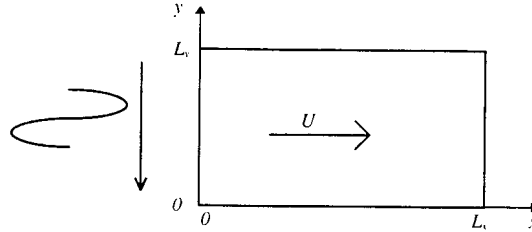


Figura 1: Recinto rectangular.

Adimensionalizando la expresión (1) surgen los siguientes parámetros:

$y^+ = y/L_y$	Posición tangencial adimensional,	$x^+ = x/L_x$	Posición axial adimensional,
$t^+ = s t$	Tiempo adimensional,	$C^+ = C/C_0$	Concentración adimensional,
$\Omega^+ = \Omega L_y$	Frecuencia espacial adimensional,	$Pe = U L_x / D_x$	Número de Peclet [9],
$S^+ = s D_x / U^2$	Frecuencia temporal adimensional,	$DL_{xy} = D_{yx} L_{xy}^2$	Parámetro de anisotropía,
$D_{yx} = D_y / D_x$	Cociente de difusividades,	$L_{xy} = L_x / L_y$	Solidez [10].

Reemplazando en la expresión (1) se obtiene:

$$\frac{1}{S^+ Pe^2} \frac{\partial^2 C^+}{\partial x^{*2}} + \frac{DL_{xy}}{S^+ Pe^2} \frac{\partial^2 C^+}{\partial y^{*2}} = \frac{1}{S^+ Pe} \frac{\partial C^+}{\partial x^*} + \frac{\partial C^+}{\partial t^*} \quad (4)$$

y las condiciones de contorno:

$$C^+(0, y^+, t^+) = e^{it^*} (\cos(\Omega^+ y^+) + i \operatorname{sen}(\Omega^+ y^+)) \quad (5)$$

$$\frac{\partial C^+}{\partial y^*}(x^+, 0, t^+) = \frac{\partial C^+}{\partial y^*}(x^+, 1, t^+) = \frac{\partial C^+}{\partial x^*}(1, y^+, t^+) = 0 \quad (6)$$

La expresión (4) se resuelve por separación de variables, obteniéndose a la salida ($x^+ = 1$) la función temporal $C^+(1, y^+, t^+)$, que dividiéndola por la condición de borde a la entrada, dada por la expresión (5), se obtiene la siguiente función de transferencia

$$F_s(y^+) = \frac{\left[\frac{\gamma_0^+ [1 - (\sigma_{0,1}^+ / \sigma_{0,2}^+)] / 2}{[\exp(-\sigma_{0,1}^+) - (\sigma_{0,1}^+ / \sigma_{0,2}^+) \exp(-\sigma_{0,2}^+)]} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\gamma_n^+ [1 - (\sigma_{n,1}^+ / \sigma_{n,2}^+)] \cos(n\pi y^+)}{[\exp(-\sigma_{n,1}^+) - (\sigma_{n,1}^+ / \sigma_{n,2}^+) \exp(-\sigma_{n,2}^+)]} \right]}{(\cos(\Omega^+ y^+) + i \operatorname{sen}(\Omega^+ y^+))} \quad (7)$$

donde

$$\gamma_n^+ = \frac{[(n\pi + \Omega^+) \operatorname{sen}(n\pi - \Omega^+) + (n\pi - \Omega^+) \operatorname{sen}(n\pi + \Omega^+)] + i[(n\pi + \Omega^+) \cos(n\pi - \Omega^+) - (n\pi - \Omega^+) \cos(n\pi + \Omega^+) - 2\Omega^+]}{n^2 \pi^2 - (\Omega^+)^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{n,1}^+ = \frac{Pe}{2} \left(1 + \sqrt{1 + 4(DL_{xy}(n\pi/Pe)^2 + i S^+)} \right) \quad (9)$$

$$\sigma_{n,2} = \frac{Pe}{2} \left(1 - \sqrt{1 + 4 \left(DL_{yx} \left(r\pi / Pe \right)^2 + i S^* \right)} \right) \quad (10)$$

Soluciones analíticas

A modo de ejemplo se muestran en las figuras 2 y 3 el módulo y la fase a la salida para los parámetros adimensionales $Pe = 10$, $DL_{xy} = 1$, $S^* = 0.10$ y para tres condiciones de borde diferentes donde la frecuencia espacial adimensionalizada (Ω^*) es de $\pi/2$, π y 2π .

Para el módulo se observa (ver figura 2) una asimetría entre los bordes, en el de ingreso de la onda ($y^+ = 1$) tiene un menor valor que para el otro ($y^+ = 0$). Ante un aumento del valor de la frecuencia espacial adimensionalizada disminuye el módulo y se genera un valle en la zona central debido al mayor gradiente tangencial que tiene la entrada.

En cuanto a la fase se observa (ver figura 3) que en las cercanías del borde de ataque, la fase presenta un atraso debido a que por la condición de borde sólo intercambia con regiones donde la onda llega con posterioridad, produciéndose el efecto contrario en el borde de salida ($y^+ = 0$), ambas pendientes son negativas. Esto genera diferentes "tiempos de vuelo" de la concentración, que induce la asimetría del módulo entre ambas caras laterales. Al aumentar la frecuencia espacial, aumenta por un lado la diferencia de las fases entre los dos bordes. Un efecto más marcado es el de la disminución de las pendientes (pendientes más negativas) en la zona cercana a los mismos. Debido a esto último, en la zona central se observa que al ir aumentando la frecuencia espacial se van incrementando los fenómenos de interferencia entre las condiciones de borde, llegando a producirse un cambio de signo en la pendiente en la zona central.

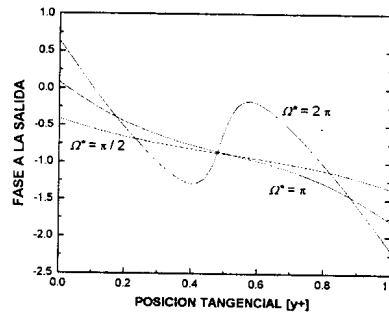
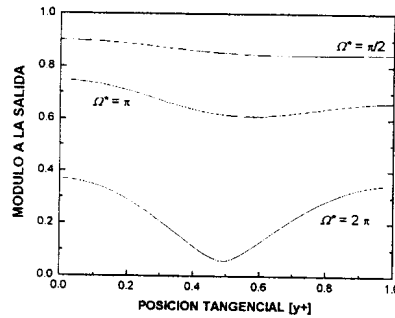


Figura 2: Módulo de la función transferencial

Figura 3: Fase de la función transferencial

Del análisis realizado para estos casos se observan los siguientes comportamientos ante la variación de un sólo parámetro:

- Pe : Ante un aumento del valor del mismo, para la fase se disminuye la diferencia entre ambas caras a la vez que se aplanan en la zona central, presentando un módulo más homogéneo a lo largo de la coordenada tangencial, pero con un valor menor para $\Omega^* = \pi/2$ y uno mayor para $\Omega^* = 2\pi$.
- DL_{xy} : Ante una disminución del valor del mismo, para la fase se disminuye la diferencia entre ambas caras a la vez que se aplanan la zona central, el módulo presenta un aumento

con la diferencia que para $\Omega^* = \pi/2$ aparece un valle central, en cambio para $\Omega^* = 2\pi$ hay una mayor homogeneidad a lo largo de la coordenada tangencial

- S^* : Ante un aumento del valor del mismo la fase sólo presenta un retraso constante para todo el rango de la coordenada tangencial, mientras que el módulo disminuye acentuando la diferencia entre ambas caras para el caso de $\Omega^* = \pi/2$, y aplanando la relación pico a valle para $\Omega^* = 2\pi$.

Casos utilizados para la comparación numérica (benchmark)

Para analizar las ventajas y desventajas de los diferentes esquemas de resolución numérica (tiempo de cálculo y precisión del resultado) se eligieron los siguientes casos (ver Tabla I).

Tabla I: Parámetros adimensionales de los casos utilizados como benchmark

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Pe	1	1	100
DL _{xy}	1	1	1,5
Ω^*	$\pi/2$	2π	2π
S^*	$\pi/2$	$\pi/2$	0,05

RESOLUCIÓN NUMÉRICA

Para la resolución numérica del problema se emplearon dos métodos diferentes, uno utilizando un esquema en diferencias finitas y otro empleando elementos finitos.

Diferencias Finitas

Este esquema de resolución numérica se basa en la aproximación de la derivadas parciales de primer y segundo orden por diferencias que surgen al desarrollar por series de Taylor la función en un punto [11]. El esquema numérico empleado para la resolución de la ecuación de convección-difusión no estacionaria fue de diferencias centradas para la dependencia espacial tanto para los términos de segundo orden (términos difusivos) como para el término de primer orden (término convectivo), y para la dependencia temporal un esquema explícito de primer orden.

Empleando una discretización del espacio mediante nodos equiespaciados en la dirección axial (Δx^+) y en la dirección tangencial (Δy^+) se genera una grilla, donde la posición para la coordenada axial x^+ se identifica con "i" y a la posición para la coordenada tangencial "y" con "j". De esta manera los términos de la expresión (4) pueden escribirse como:

$$\frac{\partial^2 C^*}{\partial x^{+2}} = \frac{(C^*(i+1, j, t^+) - 2C^*(i, j, t^+) + C^*(i-1, j, t^+))}{\Delta x^{+2}} - \frac{\Delta x^{+2}}{12} \frac{\partial^4 C^*}{\partial x^{+4}} + O(\Delta x^{+4}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 C^*}{\partial y^{*2}} = \frac{(C^*(i, j+1, t^*) - 2C^*(i, j, t^*) + C^*(i, j-1, t^*))}{\Delta y^{*2}} - \frac{\Delta y^{*2}}{12} \frac{\partial^4 C^*}{\partial y^{*4}} + O(\Delta y^{*4}) \quad (12)$$

$$\frac{\partial C^*}{\partial x^*} = \frac{(C^*(i+1, j, t^*) - C^*(i-1, j, t^*))}{2\Delta x^*} - \frac{\Delta x^{*2}}{6} \frac{\partial^3 C^*}{\partial x^{*3}} + O(\Delta x^{*4}) \quad (13)$$

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \frac{(C^*(i, j, t^* + 1) - C^*(i, j, t^*))}{\Delta t^*} - \frac{\Delta t^*}{2} \frac{\partial^2 C^*}{\partial t^{*2}} + O(\Delta t^{*2}) \quad (14)$$

donde dada la cantidad de segmentos deseados en cada dirección N_x y N_y se obtienen:

$$\Delta x^* = \frac{1}{N_x} \quad y \quad \Delta y^* = \frac{1}{N_y} \quad (15)$$

y Δt^* es el paso temporal adimensionalizado.

El término de segundo orden temporal de la expresión (14) luego de reemplazos y reagrupamientos, introduce por un lado una difusividad numérica axial negativa. Para eliminar este efecto debe sumarse al primer miembro de la expresión (14) el término:

$$\frac{\Delta t^*}{2(S^* Pe)^2} \frac{\partial^2 C^*}{\partial x^{*2}} \quad (16)$$

Por otra parte el término temporal mencionado junto con las derivadas de orden superior descriptas en las expresiones (11), (12) y (13) pueden reagruparse, obteniéndose que si:

$$N_y = Pe \sqrt{\frac{S^*}{6DL_{xy} \Delta t^*}} \quad (17)$$

se elimina el término de derivada parcial de cuarto orden con respecto a y^* , y tomando:

$$N_x = Pe \sqrt{\frac{S^* - 0.5\Delta t^*}{6\Delta t^*}} \quad (18)$$

se disminuyen los efectos de las restantes derivadas de tercer y cuarto orden espacial que están afectadas por un factor Δt^* .

La estabilidad del esquema numérico impone una restricción en el paso de avance temporal dada por:

$$\Delta t^* < 2S^* \quad (19)$$

Para poder describir el problema sólo faltan incorporar las condiciones de contorno. Considerando que los nodos llegan a los límites del recinto, a la entrada se tiene:

$$C^*(0, y^*, t^*) = \cos(\Omega^* y^* + t^*), \quad (20)$$

a la salida

$$\frac{\partial^2 C^*}{\partial x^{*2}} = \frac{2(C^*(i-1, j, t^*) - C^*(i, j, t^*))}{\Delta x^{*2}} \quad (21)$$

y en las caras laterales $y^* = 0$; $y^* = 1$

$$\frac{\partial^2 C^*}{\partial y^{*2}} = \frac{2(C^*(i, j+1, t^*) - C^*(i, j, t^*))}{\Delta y^{*2}} ; \frac{\partial^2 C^*}{\partial y^{*2}} = \frac{2(C^*(i, j-1, t^*) - C^*(i, j, t^*))}{\Delta y^{*2}} \quad (22)$$

Según las expresiones (17) y (18) dado un Δt^* se tiene determinada la discretización del espacio. Para poder elegir un Δt^* apropiado se propone tomar el mínimo Δt^* entre los tres siguientes dados por:

a) condición por el límite de estabilidad:

$$\Delta t^* = 2 f S^* \quad (23)$$

donde f es un factor menor que 1.

b) condición para una buena descripción de la oscilación espacial:

$$\Delta t^* = \left(\frac{2\pi Pe}{\Omega^* N_{DE}} \right)^2 \frac{S^*}{6DL_{xy}} \quad (24)$$

donde N_{DE} es el número de nodos mínimos que se desea para describir un ciclo espacial, habiéndose utilizado en este trabajo un valor de 20.

c) condición por una buena descripción de la oscilación temporal:

$$\Delta t^* = \frac{2\pi}{N_{DT}} \quad (25)$$

donde N_{DT} es el número de pasos mínimos que se desea para describir un ciclo temporal, habiéndose empleado en este trabajo un valor de 20.

Además se debe verificar que la cantidad de nodos en cada dirección sea mayor que un cierto valor (11 en estos casos) para que los términos de orden superior sean despreciables, lo cual si en alguna de ellas no llega a este valor se debe recalcular el Δt^* mediante las expresiones (17) y (18) para que lo satisfaga, y recalcular la cantidad de nodos para la otra dirección.

Elementos finitos

Este método conocido como Elementos Finitos por Volúmenes de Control se basa en una discretización en elementos finitos triangulares de tres nodos. Un volumen de control es definido alrededor de cada nodo de la malla, estando éste limitado por las líneas que unen los centroides de los elementos con los puntos medios de sus lados.

El sistema discreto de ecuaciones surge de balances entre la fuente interna y los flujos que cruzan las superficies de cada volumen de control. Para calcular estas últimas es necesario utilizar funciones de forma, habiéndose empleado en este trabajo las propuestas en [12].

RESULTADOS

Entre los casos analizados debido a sus parámetros adimensionales pueden diferenciarse que, los casos 1 y 2 son difusivos, siendo el segundo más difusivo que el primero por su condición de contorno ($\Omega^* = 2\pi$), mientras que el caso 3 es convectivo.

Para el esquema en diferencias finitas el paso temporal y la malla necesaria surgen: en el primer caso por una buena discretización espacial del recinto (11x11), en el segundo caso por una buena representación espacial de la condición de entrada, mientras que en el tercer caso está dada por condición limitante de estabilidad. En este último caso se evaluaron dos condiciones una con un factor $f = 0.6$ (caso 3 A) y otra con un factor $f = 0.1$ (caso 3 B).

Para el esquema en elementos finitos se tomó una malla de 21x21 nodos, refinándose a 33x33 para el caso 3 debido a los resultados obtenidos.

En la tabla II se detallan las mallas y los pasos temporales empleados para cada caso para ambos métodos, junto con el tiempo de cálculo requerido. Los resultados se muestran en las figuras 4 a 9, en donde se observan el módulo y la fase obtenidos analíticamente comparados con los resultados numéricos.

Tabla II: Descripción de la malla empleada, el paso temporal adimensionalizado y el tiempo de cálculo requerido para los diferentes casos y esquemas numéricos analizados.

Caso	Diferencia finitas			Elementos finitos		
	Malla [x-y]	Δt^+	Tiempo de cálculo [s]	Malla [x-y]	Δt^+	Tiempo de cálculo [s]
1	11 x 11	$2,618 \cdot 10^{-3}$	49,04	21 x 21	$1,571 \cdot 10^{-2}$	918,25
2	21 x 21	$6,545 \cdot 10^{-4}$	384,31	21 x 21	$1,571 \cdot 10^{-2}$	868,65
3 A	25 x 32	$5,91 \cdot 10^{-2}$	6,92	21 x 21	$5,0 \cdot 10^{-3}$	661,53
3 B	88 x 76	$9,918 \cdot 10^{-3}$	288,79	33 x 33	$5,0 \cdot 10^{-3}$	1781,62

De las figuras se observa que el esquema en diferencias finitas presenta una mejor precisión que el esquema en elementos finitos. Este último esquema presenta un buen comportamiento para los casos en donde son dominantes los efectos difusivos (Pe moderado), no así para el caso en donde es importante el término convectivo (Pe alto).

De los resultados numéricos para el esquema en diferencias finitas surge como valor adecuado para el paso temporal adimensionalizado de la condición de estabilidad la elección de 0,1 para el factor f .

Para el esquema de elementos finitos en el caso 3 se observó que variaciones en el tamaño de la malla resultaron más significativos que el refinamiento temporal.

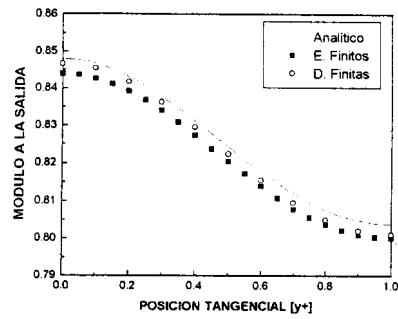


Figura 4: Comparación del módulo para el Caso 1

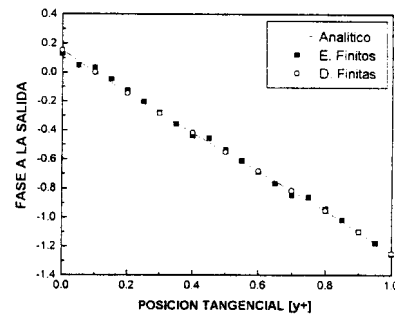


Figura 5: Comparación de la fase para el Caso 1

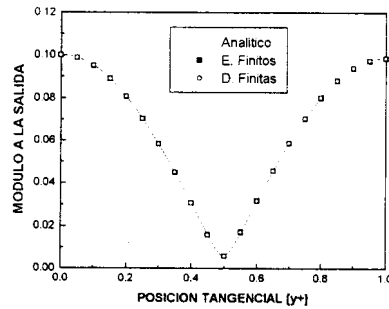


Figura 6: Comparación del módulo para el Caso 2

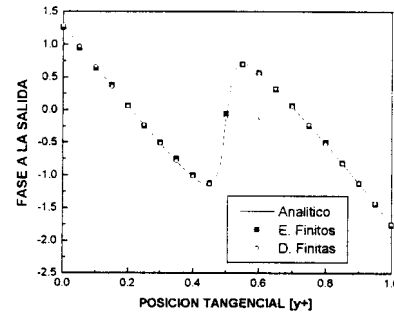


Figura 7: Comparación de la fase para el Caso 2

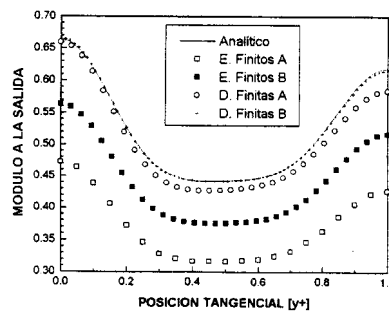


Figura 8: Comparación del módulo para el Caso 3

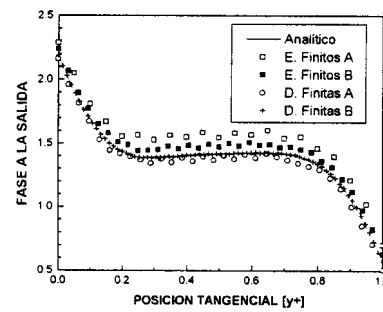


Figura 9: Comparación de la fase para el Caso 3

CONCLUSIONES

La función de transferencia del modelo simple utilizado, permite observar algunas características importantes de este tipo de sistemas. La principal de ellas es la asimetría presente a la salida tanto en el módulo como en la fase. En algunos casos la condición de entrada periódica y las condiciones laterales producen cerca de los bordes mayores amplitudes y defasajes apreciables. Los resultados numéricos muestran que el esquema en diferencias finitas es más preciso y rápido que el método de elementos finitos empleado, principalmente para problemas con condiciones convectivas.

Los métodos numéricos que intentan resolver este tipo de problemas complejos, los cuales son esencialmente convectivos, deberían verificar este tipo de soluciones simples que representan algunos de los principales fenómenos intervinientes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Cooperativa de Electricidad Bariloche por el apoyo parcial al presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] **Balje, O. E.**, *Turbomachines A guide to Design, Selection, and Theory*, John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [2] **Shepherd, D. G.**, *Principles of turbomachinery*, Macmillan Pub. Co., New York, 1956.
- [3] **Villani, S.**, *Topics in Applied Physics. Vol. 35 Uranium Enrichment*, Springer Verlag, Berlin, 1979.
- [4] **Brasnarof, D. O., Florido, P. C., Bergallo, J. E.**, *Diseño y evaluación económica de una planta de enriquecimiento de uranio por difusión gaseosa económicamente competitiva*, Informe Técnico CNEA-F-3/95.
- [5] **Florido, P. C., Brasnarof, D. O., Bergallo, J. E., Delmastro, D. F.**, *SIGMA. New concept of an advanced non-proliferating, small and modular gaseous diffusion enrichment technology*, AATN International Conference on Nuclear Power Competitiveness in the next two decades, Buenos Aires 1996.
- [6] **Carrica, P. M., Florido, P. C., Baliño, J., Converti, J.**, *Estudio del comportamiento de compresores axiales multifujo en cascadas de enriquecimiento de uranio por difusión gaseosa*, Comunicación Privada CNEA-CAB, 1994.
- [7] **Brasnarof, D. O.**, *Código de cálculo cuasi-tridimensional de compresores axiales (DISCAX) Manual del usuario y memoria de cálculo*, Informe Técnico CNEA-CAB 60/23/97.
- [8] **Brasnarof, D. O., Delmastro, D. F.**, *Dispersión angular del compresor axial multifujo*, Informe Técnico CNEA-CAB 60/02/97.
- [9] **Incropera, F. P., DeWitt, D. P.**, *Fundamentals of heat and mass transfer*, Thrid Edition, John Wiley&Sons, Singapore, 1992.
- [10] **Lakshminarayana, B.**, *Fluid dynamics and heat transfer of turbomachinery*, John Wiley&Sons, New York, 1996.
- [11] **Marshall, G.**, *Solución numérica de ecuaciones diferenciales (tomo2 Ecuaciones en derivadas parciales)*, Editorial Reverté, Buenos Aires, 1986.
- [12] **Larreteguy, A.**, *A new finite-volume method for convection-diffusion problems in arbitrary triangulations*, Latin American Applied Research, 24,2, 1994.