

## ANÁLISIS FLUIDO-DINÁMICO BIDIMENSIONAL DE LOS GASES QUE PASAN A TRAVÉS DE DOS VÁLVULAS DE CONTROL EN LA LÍNEA DE CABECERA DEL REGENERADOR DE UNA PLANTA DE DESINTEGRACIÓN CATALÍTICA

MIGUEL PAIVA<sup>1</sup>, ALFREDO RAMOS<sup>2</sup>, TIBISAY ZAMBRANO<sup>1</sup>, RODOLFO BERRÍOS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.  
e-mail: paivams@yahoo.com; coromotzambrano@gmail.com; rodolfoberrios@hotmail.com

<sup>2</sup> Petróleos de Venezuela. Intevep. Apdo. 76343. Caracas 1020 A. e-mail: ramosa@pdvsa.com

Recibido: enero de 2008

Recibido en forma final revisado: mayo de 2008

### RESUMEN

El presente trabajo contempla el análisis fluido-dinámico bidimensional de los gases que pasan a través de dos válvulas de control ubicadas en la línea de cabecera de la unidad de desintegración catalítica típica de una refinería de petróleo crudo. La línea presenta vibraciones de alta frecuencia, inducidas por el flujo turbulento. El fluido de trabajo es gas de combustión, compuesto en su mayoría por nitrógeno. El caudal es de aproximadamente  $5,54 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/día. El análisis se realizó resolviendo un sistema de ecuaciones no lineales, las cuales describen el comportamiento del flujo. Se utilizó el modelo de turbulencia RNG  $k-\epsilon$ , mediante simulación numérica por computadora. Se realizaron diferentes mallas, seleccionando finalmente una malla conformada por 15.957 nodos y 15.364 volúmenes de control. Para modelar y resolver el sistema de ecuaciones planteado se utilizó el programa comercial FLUENT 6.0 de dinámica de fluidos computacional (CFD). Se estudió la distribución de presión, la variación de presión en el tiempo, el perfil de velocidad, las líneas de corriente y la formación de vórtices en la sección de la tubería en estudio.

*Palabras clave:* Turbulencia, CFD, FLUENT, Línea de Cabecera, RNG  $k-\epsilon$ .

### BIDIMENSIONAL FLUID DYNAMIC ANALYSIS OF GASES THAT PASS THROUGH TWO CONTROL VALVES IN THE HEAD LINE OF THE REGENERATOR IN A FLUID CATALYTIC CRACKING PLANT

### ABSTRACT

In this work the bidimensional fluid dynamic analysis of gases that pass through two control valves located in the headline of a typical catalytic cracking plant in an oil refinery is simulated. The line presents high frequency vibrations induced by turbulent flow. The work fluid is combustion gas, composed in its majority by nitrogen (N<sub>2</sub>). The volume is approximately  $5.54 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/day. The analysis was performed solving a non-linear system of equations, which describes the flow behavior. The model of turbulence RNG  $k-\epsilon$  was used, by means of computer numerical simulation. Different meshes were evaluated; finally selecting a mesh made up by 15,957 nodes and 15,364 cells. In order to model and solve the system of equations, the commercial program FLUENT 6.0 of computational fluid dynamics (CFD) was used. The pressure distribution, pressure variation in time, velocity profile, streamlines and vortex shedding in the section of pipe in study were studied.

*Keywords:* Turbulence, CFD, FLUENT, Head Line, RNG  $k-\epsilon$ .

### INTRODUCCIÓN

En este trabajo de investigación se estudió el fenómeno que se origina en la línea de cabecera del regenerador de una planta de desintegración catalítica que procesa crudos medianos y pesados para producir gasolina y otros

derivados.

La línea de cabecera de la unidad de desintegración catalítica en estudio ha venido presentando problemas de vibraciones de alta frecuencia desde que inició sus operaciones, las cuales han ocasionado fracturas en zonas de alta

concentración de esfuerzo.

Debido a esta problemática, en el año 1999 se comenzó a realizar mediciones de vibraciones para caracterizar las amplitudes y las frecuencias de las vibraciones en varios puntos del tramo afectado por este efecto. Los resultados de estas mediciones arrojaron niveles altos de vibración en el tramo de tubería de 1,42 metros de diámetro, ubicado entre las válvulas reductoras de presión. Además, se concluyó que las altas vibraciones eran consecuencia del estrangulamiento del flujo y de la caída de presión en esas válvulas de control.

De manera simplificada, la función del reactor de la planta de desintegración catalítica es producir una serie de reacciones químicas en presencia de un catalizador para obtener diferentes hidrocarburos. La corriente de hidrocarburos pasa a la torre de fraccionamiento, en donde se separan los diferentes productos. Luego, el catalizador usado se transporta al regenerador, donde es reactivado y el residuo de la reacción (coque) es quemado. Finalmente, los gases que genera la combustión del residual son expulsados por medio de una línea que conduce a la chimenea. Esta tubería es llamada «línea de cabecera», la cual transporta los gases de combustión y sirve como sistema de control de presión en el regenerador. El control de presión es realizado mediante dos válvulas deslizantes, que estrangulan el flujo en el tramo comprendido entre la entrada de la primera válvula y la salida de la segunda válvula, produciendo un descenso de la presión hasta un valor ligeramente superior a la presión atmosférica.

Debido a las caídas de presión y a la obstrucción del flujo que se producen en las válvulas deslizantes, se inducen vibraciones de alta frecuencia en las paredes de la tubería de ese tramo del sistema. En algunas ocasiones, estos efectos dinámicos pueden generar grietas y desajustes. En este sentido, surgió la necesidad de evaluar el origen de dichas vibraciones, realizando un estudio sobre el comportamiento del flujo de fluido en la tubería.

Las válvulas de control están colocadas en un tramo horizontal de tubería aguas abajo del regenerador y se encuentran separadas entre sí en aproximadamente once metros (11 m), tal como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Sistema de válvulas de control en la línea de cabecera.

Las investigaciones realizadas por Catalano *et al.* (2003) relacionadas con simulaciones del comportamiento transitorio del flujo turbulento alrededor de un cilindro, establecieron comparaciones entre los modelos matemáticos RANS y LES, permitiéndoles obtener cambios de presión en pequeños intervalos de tiempo y capturar la presencia de vórtices.

Un estudio importante, tomado como base para la elaboración de este trabajo, fue el realizado por Iaccarino *et al.* (2002, 2003). Ellos analizaron el comportamiento transitorio del flujo debido a la separación del flujo turbulento alrededor de un cubo, implementando la metodología RANS y el código FLUENT para resolver los modelos de turbulencia, específicamente el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  estándar.

Un modelo de turbulencia de dos-ecuaciones del tipo de  $k-\varepsilon$  fue derivado por Yakhot & Orszag (1986), para ello se basaron en métodos de renormalización de grupos (RNG). Posteriormente, se divulgó que con este modelo se obtienen predicciones substancialmente mejores que con el modelo  $k-\varepsilon$  estándar. Las evidentes mejoras obtenidas con el modelo de RNG  $k-$  fueron atribuidas al mejor tratamiento de los efectos de la turbulencia en la zona cercana a la pared (Speziale & Thangam, 1992).

El presente trabajo contempla el estudio fluido-dinámico del problema existente mediante el modelo matemático de turbulencia RNG  $k-$  para la simulación y como herramienta de cálculo se empleó el simulador comercial FLUENT, que permitió evaluar la presión, las líneas de corriente y los perfiles de velocidad que originan el problema de vibración en el sistema.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema consistió en estudiar el comportamiento del flujo que pasa a través de la línea de cabecera y los efectos que producen las válvulas deslizantes en el flujo, ya que ellas representan el elemento primario de control de presión en el proceso de regeneración del catalizador. Sin embargo, las restricciones del flujo que producen las válvulas provocan separaciones bruscas del gas, éstas a su vez generan vibraciones de alta frecuencia en la línea, lo que ha originado el desprendimiento de accesorios, la descalibración de la instrumentación, fugas por agrietamiento e inclusive fugas en las válvulas de la planta de desintegración catalítica.

Estos problemas dieron origen a que se realizara esta investigación para analizar el comportamiento del flujo a través de la línea de cabecera, en especial cuando atraviesa las válvulas, como se puede observar en la figura 2.



También incluye una fórmula analítica para números turbulentos de Prandtl. Además, el modelo  $k-\epsilon$  trabaja con números de Reynolds altos, mientras que la teoría RNG da una fórmula diferencial derivada analíticamente por la viscosidad efectiva, válida también para números de Reynolds bajos.

## METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

La estrategia de solución se estableció definiendo la ecuación de cierre, el fluido de trabajo, las condiciones de borde, la selección de la malla y la simulación.

Como herramienta para modelar el flujo se utilizó la simulación numérica a través del programa comercial de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) FLUENT 6.0.

### Programa FLUENT

El programa FLUENT tiene incorporado los modelos de turbulencia mencionados anteriormente. Este programa resuelve los sistemas de ecuaciones discretizadas con la técnica de volúmenes finitos, calculando los valores de las variables en el interior de las celdas computacionales.

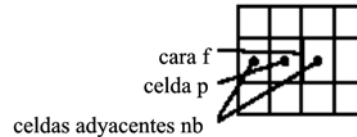
Las ecuaciones diferenciales se pueden aproximar con métodos de (CFD). Estos métodos ofrecen una manera práctica de alcanzar la generalidad de la formulación de las ecuaciones diferenciales. Entre la variedad de métodos de CFD desarrollados se tiene que el método de volúmenes finitos es uno de los más utilizados.

Para aplicar el método es necesario definir un espacio temporal de cálculo (dominio), el cual debe ser discretizado para resolver numéricamente las ecuaciones. La discretización del dominio espacial consiste en la división del espacio en un conjunto de pequeñas celdas que son consideradas pequeños volúmenes de control, todo este conjunto conforma la malla computacional.

La malla computacional es un aspecto fundamental de la simulación numérica de flujos. El número y tamaño de las celdas computacionales deben ser suficientes para poder calcular con bastante precisión las distintas zonas del fluido. En este sentido, se debe identificar las zonas del flujo donde los gradientes de las variables sean más pronunciados y disponer de una malla suficientemente fina en esas zonas.

Para discretizar las ecuaciones se deben aproximar las ecuaciones diferenciales por un sistema de ecuaciones algebraicas para las variables termo-fluido-dinámicas en el conjunto de celdas de la malla computacional y en un conjunto discreto de instantes de tiempo. Sistemáticamente,

cada ecuación de transporte es discretizada en forma algebraica para cada celda, requiriendo información o datos de campo; tales como propiedades del fluido, velocidad, entre otros; de centros y caras de las celdas (ver figura 3, para la celda «p»). El programa FLUENT utiliza un promedio de los valores de las celdas que comparten cada nodo.



**Figura 3.** Representación gráfica de una celda y sus adyacencias. Tomado del Manual del FLUENT (2002).

Aun cuando el programa FLUENT es una herramienta poderosa para efectuar simulaciones, él no cuenta con la opción para definir la malla y debe apoyarse en la subrutina GAMBIT, la cual forma parte del pre-procesamiento de los datos. Entonces, para realizar un modelo y la simulación se deben manejar ambos programas, FLUENT y GAMBIT.

### Pre-procesamiento en GAMBIT

La subrutina GAMBIT permite definir la geometría del dominio y discretizar el sistema en un número finito de volúmenes de control. Pero antes de crear o definir la malla es preciso dibujar la geometría del sistema que se pretende simular.

### Pre-procesamiento en FLUENT

Luego de seleccionada la malla, previamente definida en la subrutina GAMBIT, es importada al programa FLUENT, para luego seleccionar en él el modelo de turbulencia y establecer las condiciones de borde o contorno establecidas.

### Procedimiento de Solución

El procedimiento de solución contempló los siguientes pasos:

1. Se usó como ecuación de cierre el modelo de turbulencia RNG  $k-\epsilon$  y se usaron las condiciones transitorias y datos experimentales de campo.
2. Se seleccionó el flujo de trabajo en base al conocimiento del flujo que es transportado en la línea de cabecera, el cual es monofásico y está compuesto por gases de productos de combustión. Comúnmente la concentración de estos productos está conformada por nitrógeno ( $N_2$ ) en un 80% y el 20% restante se divide en dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono (CO) y oxígeno ( $O_2$ ). Como el nitrógeno representa el más alto

porcentaje de concentración, este gas fue utilizado como fluido de trabajo.

- Las condiciones de borde a la entrada de la geometría fueron tomadas de los datos operacionales de la refinería, los cuales se indican en las tablas 1 y 2.

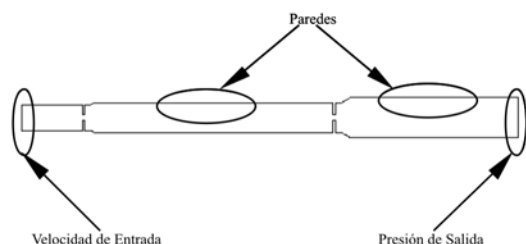
**Tabla 1.** Data de campo. Tomado de la fuente operacional de la planta de desintegración catalítica.

| VARIABLES                         | VALOR   |
|-----------------------------------|---|
| Caudal                            | $5,54 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$<br>$63,68 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Presión del equipo                | 206,84 kPa  |
| Presión aguas abajo válvula B     | 6,89 kPa  |
| Presión de diseño de la línea     | 379,21 kPa  |
| Diferencial de presión válvula A  | 91,7 kPa  |
| Diferencial de presión válvula B  | 79,28 kPa   |
| Temperatura operación de la línea | 289,17 °C   |

**Tabla 2.** Valores de velocidad y número de Mach calculados.

| VARIABLES               | VALOR     |
|-------------------------|-----------|
| Velocidad en la entrada | 57,09 m/s |
| Número de Mach          | 0.035     |

- Al calcular el número de Mach se obtuvo un valor menor a 0,3; esto significa que los cambios de densidad no son significativos en el tramo en estudio. Por lo tanto, se pudo considerar el flujo como incompresible de acuerdo a lo expuesto por Potter *et al.* (2002).
- Luego, se establecieron las condiciones de salida, tomando como presión a la salida un valor de 1,0 psi y temperatura constante, mientras que la presión de entrada no fue considerada para efectos de los cálculos.
- Seguidamente, se diseñó la geometría de la malla bidimensional, la cual se muestra en la figura 4, en conjunto con las condiciones de borde.

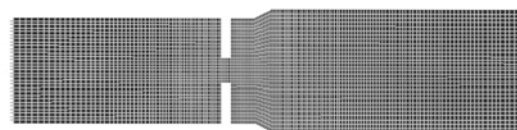


**Figura 4.** Condiciones de borde en la geometría del modelo utilizado en FLUENT.

- Antes de seleccionar la malla definitiva para la simulación final fue preciso realizar varias mallas con distintas densidades y formas. Por ello, se elaboraron diferentes mallas gruesas y finas. En la corrida inicial se empleó una malla no muy fina con celdas uniformes en todo el dominio, pero este tipo de mallado mostró resultados físicos no satisfactorios, puesto que no reflejó las fluctuaciones de presión.
- Posteriormente, se utilizó una malla fina, estructurada y uniforme, pero los resultados correspondientes a esta malla tampoco fueron los esperados.
- Ante los resultados obtenidos, se decidió afinar más la malla, haciendo énfasis en la zona de estrangulamiento y extendiendo el dominio de forma axial aguas abajo de la segunda válvula de control, con la finalidad de permitir que se observara el desarrollo del flujo en esa zona.
- Se seleccionó una malla conformada con 15.364 elementos y 15.957 nodos, por haberse obtenido la mejor convergencia con ella. En las figuras 5 y 6 se puede observar que la malla fue afinada hacia la zona de estrangulamiento (válvulas de control A y B), en donde se buscó obtener mayor y mejor información del flujo.



**Figura 5.** Vista general de la malla computacional.



**Figura 6.** Malla computacional aguas abajo de la segunda válvula (acercamiento).

11. En las simulaciones se usó la metodología de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas según Reynolds (RANS). Este módulo del FLUENT permite obtener soluciones más aproximadas, ya que las simulaciones en estado estable omiten un importante componente del promedio del campo de flujo, que es el desprendimiento periódico de vórtices.
12. Para las simulaciones también se empleó inicialmente una solución en estado estable, en la que se obtuvo un amplio número de pasos de tiempo, lo cual indicaba que no existían variaciones a través del tiempo en el campo fluido-dinámico. Luego, la simulación en estado estable se obtuvo y se usó como condición inicial para analizar la condición transitoria, lo que permitió obtener una simulación más precisa respecto al tiempo (con pequeños pasos de tiempo). Para lograr la convergencia de las ecuaciones se usó como paso de tiempo  $2 \times 10^{-6}$  segundos y 20 pasos por períodos de tiempo. Estos números se calcularon tomando en cuenta las frecuencias de las vibraciones registradas en la línea de cabecera, las cuales tienen valores entre 700 a 2300 Hz.

## RESULTADOS

Al resolver el sistema de ecuaciones se obtuvieron variables importantes, dentro de las cuales se encuentran la distribución de presión, variación de presión en el tiempo, distribución de velocidad y dirección del flujo.

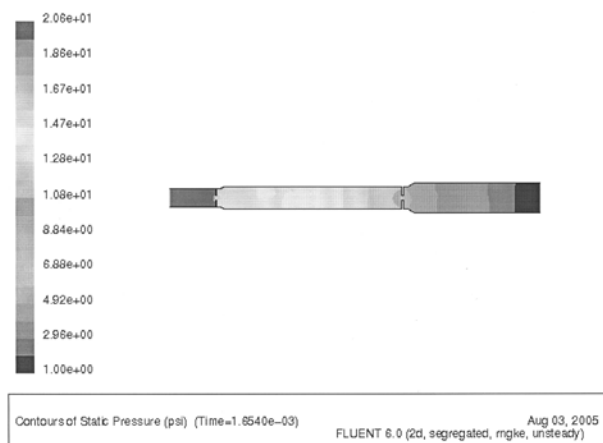
### Distribución de presión

La distribución de presión en la tubería, antes de cada válvula fue estable. Luego, cuando el flujo pasaba a través de cada válvula de control, la presión descendía un 50%, coincidiendo con los datos suministrados por la refinería.

En la figura 7 se observa que el mayor valor de presión se encuentra aguas arriba de la válvula A. Luego, se observa una disminución de presión, según la escala de valores del lado izquierdo del gráfico. Finalmente, al sobrepasar la válvula B, el flujo presenta un valor de presión ligeramente superior a la presión atmosférica.

### Variaciones de presión en el tiempo

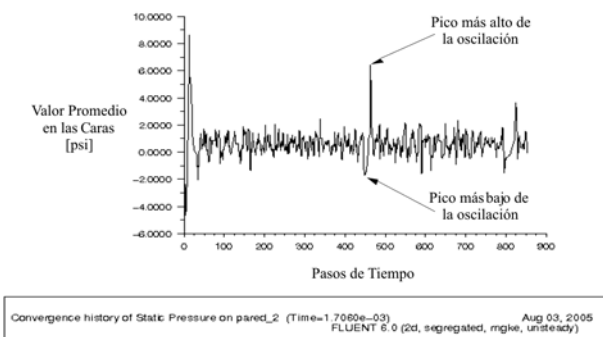
Para poder mostrar con facilidad los cambios en cada uno de los pasos de tiempo, el programa FLUENT construyó una gráfica de las variaciones de la presión versus el tiempo, en donde se pudo observar que variaban entre 0 a 900 pasos de tiempo. Los máximos picos de presión se observaron uno a los 450 pasos de tiempo, con un valor pico a pico de 55,5 kPa, (8 psi), y otro de menor escala a los 825 pasos con



**Figura 7.** Distribución de presión a los  $1.654 \times 10^{-3}$  segundos.

un valor de 41,4 kPa (psi) pico a pico. Se entiende como valor pico a pico la señal mostrada en la gráfica del punto más bajo al punto más alto de una oscilación. Finalmente se obtuvo que el promedio de las oscilaciones estuviera en el orden de 20,7 kPa (3 psi).

En la figura 8 se aprecian los ligeros cambios en la distribución de presión en el volumen de control, demostrando que existen condiciones transitorias en el sistema. Es por ello que la presión manométrica no es un factor considerable en esta simulación en dos dimensiones. Además, la gráfica de la figura 8 muestra las oscilaciones promedio de presión en la tubería de 1,42 m de diámetro, entre las válvulas de control de la línea de cabecera del regenerador, la cual es la sección de la tubería que presenta las altas vibraciones inducidas por el flujo.

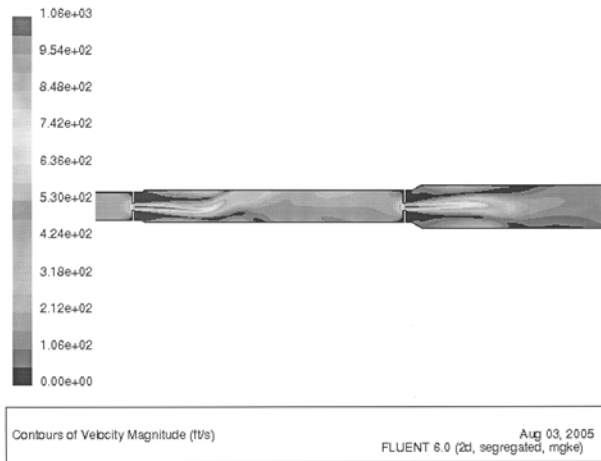


**Figura 8.** Gráfico de presión vs. tiempo.

### Perfil de Velocidad

En las figuras 9 y 10 se observan los contornos de velocidad, en donde el flujo formado aguas abajo de la válvula A de control está completamente desarrollado en el tramo de 1,42 m de diámetro. Luego, en esa misma área se nota como el flujo va disipando su estela.



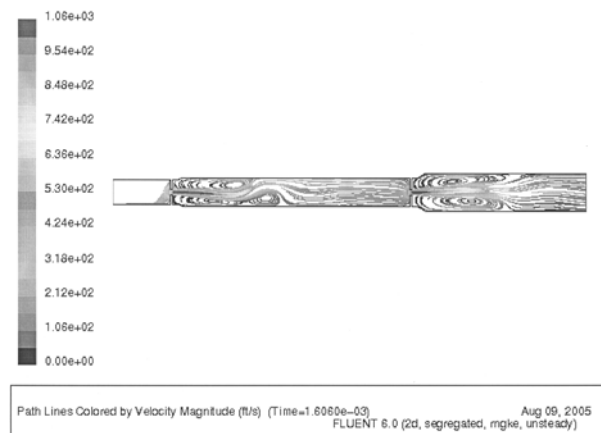


**Figura 9.** Perfil de velocidad.

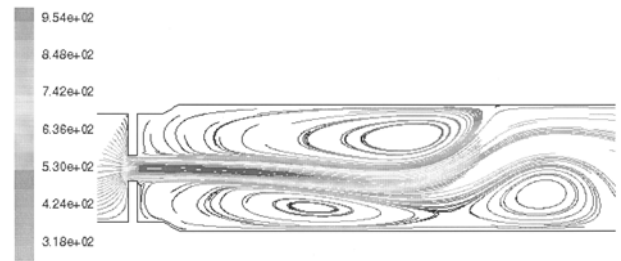


**Figura 10.** Perfil de velocidad aguas abajo de la válvula A (acercamiento).

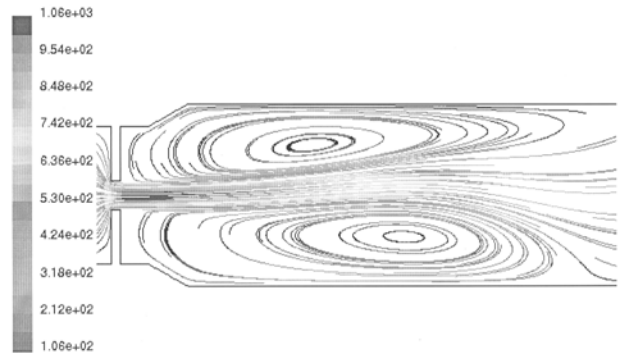
En los gráficos anteriormente presentados se aprecia que el flujo alcanza la mayor velocidad a la salida de la zona de estrangulamiento de ambas válvulas de control, para luego irse disipando y estabilizándose a una distancia no muy lejana de la salida de cada válvula.



**Figura 11.** Líneas de corriente y trayectoria aguas abajo de la válvula A.



**Figura 12.** Líneas de corriente aguas abajo de la válvula A (acercamiento).



**Figura 13.** Líneas de corriente aguas abajo de la válvula B (acercamiento).

## Líneas de Corriente

Las líneas de corriente se muestran en las figuras 11, 12 y 13, en ellas se observa la formación de vórtices tanto en la parte superior como en la parte inferior de la salida del flujo, aguas abajo de cada válvula de control. Los vórtices no son simétricos y la mayor concentración de ellos ocurre a la salida de las válvulas A y B.

## CONCLUSIONES

- Debido a que el campo de flujo aguas abajo de la válvula A no hace interferencia con la válvula B, se puede asegurar que al separar las válvulas de control no se dispararían las vibraciones en la tubería.
- La separación existente entre las válvulas reductoras de presión no representa un obstáculo para que el flujo se estabilice luego de pasar a través de la válvula A.
- La simulación determinó que la mayor concentración de vórtices se ubica después de la válvula A, lo cual coincide con los datos de altas vibraciones obtenidos en las mediciones de campo.
- Se deben desarrollar simulaciones estructurales con los datos de presión-tiempo obtenidos para estimar zonas críticas y tiempo estimado de fallas en la tubería.

## NOMENCLATURA

|             |            |
|-------------|------------|
| $g$         | Gravedad   |
| $p$         | Presión    |
| $V$         | Velocidad  |
| $\tilde{n}$ | Densidad   |
| $\dot{\nu}$ | Viscosidad |

## REFERENCIAS

- CATALANO, P., WANG, M., IACCARINO, G., MOIN, P. (2003). *Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at high Reynolds numbers*. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2003, Vol. 24, No 4, pp. 216-223. Elsevier Science Inc.
- FLUENT 5/6. (2002) *User's guide*. Fluent Inc. Lebanon, NH, USA.
- IACCARINO, G., OOI, A., DURBIN, P.A., BEHNIA, M. (2002). *Reynolds averaged simulation of unsteady separated flow*. Center of Turbulence Research, Stanford University, USA. Elsevier Science Inc.
- IACCARINO, G., OOI, A., DURBIN, P.A., BEHNIA, M. (2003). *Reynolds averaged simulation of unsteady separated flow*. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 24, No. 2, pp. 147-156. Elsevier Science Inc.
- POTTER, M.C., HONDZO, M., SHIH, T.I.P., WIGGERT, D.C. (2002). *Mecánica de fluidos*. Thomson International.
- SPEZIALE, C.G. & THANGAM, S. (1992). *Analysis of an RNG based turbulence model for separated flows*. Institute for Computer Applications in Science and Engineering, Hampton, Va.
- YAKHOT, V. & ORSZAG, S.O. (1986). *Renormalization group methods in turbulence*. Journal Science Comp., 1, p. 3.
- ZAMBRANO, T. (2000). *Análisis del flujo turbulento sobre un prisma de sección transversal cuadrada mediante simulación de vórtices grandes*. Universidad Central de Venezuela.