

SIMULACIÓN DE FLUJO Y EVALUACIÓN DE LA FUERZA DE ARRASTRE ACTUANDO EN EL CUERPO DE UN PIG CON UN *BYPASS*

Ricardo E. Ramírez^{a,b} y Max S. Dutra^a

^a*Laboratório de Robótica e Projeto de Máquinas LabRob, Programa de Engenharia Mecânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Sala I-101, Cidade Universitária, Ilha de Fundão, CEP 21945-970, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, max@mecanica.coppe.ufrj.br, <http://www.labrob.coppe.ufrj.br>*

^b*Grupo de Plataformas Robóticas UnRobot, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Of. 453-401, Ciudad Universitaria, Bogotá, Colombia, rramirez@ufrj.br, <http://www.unrobot.unal.edu.co/>*

Palabras Clave: Pigs, Simulación, Fuerza de arrastre, Oleoductos, CFD.

Resumen. Un pig es un dispositivo para operaciones de limpieza e inspección en ductos de petróleo y gas. Algunos pigs permiten que parte del fluido pase de atrás para el frente del pig usando los llamados orificios de *bypass*. Los operadores de la línea pueden controlar la velocidad del pig o mejorar la limpieza de la pared del tubo usando sistemas de *bypass*. Este artículo presenta la simulación del flujo en un tubo con un pig dentro de él. El cuerpo del pig con *bypass* es representado por un cilindro con un orificio axial. El objetivo es evaluar la fuerza de arrastre causada por el flujo con el pig parado. Se varían algunos parámetros genéricos en tres tipos de contorno del orificio y se simulan los flujos en cada caso. Con base en los resultados de la simulación son identificados los rangos de la fuerza de arrastre y de la caída de presión. Fueron realizadas variaciones en el diámetro del orificio, longitud axial de la contracción y de la expansión y en el contorno de la sección axial. De los resultados de la simulación, es identificado el contorno que genera la menor fuerza de arrastre. Otras condiciones como propiedades del fluido, velocidad del flujo y geometría del tubo son constantes. Fue utilizada una herramienta de software de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) para simular el flujo y calcular los resultados.

1. INTRODUCCIÓN

Los pigs son dispositivos, herramientas o vehículos autocontenidos e independientes que se mueven a través de ductos e utilizados en operaciones de limpieza, dimensionamiento e inspección (PPSA, 2010), tradicionalmente aplicados en oleoductos y gasoductos. En los últimos años han sido aplicados a otros tipos de líneas de transporte como mineroductos y acueductos. En el caso de poliductos también se usan pigs como elemento separador entre productos diferentes.

Los pigs de limpieza y de separación, no requieren de componentes electrónicos para su aplicación. Actualmente se les adiciona un componente magnético o electrónico que emite una señal, para hacer el seguimiento del recorrido se usan otros dispositivos electrónicos que reciben la señal y detectan el paso del pig por un lugar determinado (Bal, 1992).

Los pigs de inspección o pigs instrumentados (PPSA, 2010) llevan un conjunto de elementos sensores que detectan pérdidas por corrosión o grietas en el tubo y escapes del fluido, con baterías y tarjetas electrónicas que registran la información de estado del tubo y el lugar donde fue leída la información. Las tarjetas electrónicas tienen reducido consumo de energía y la tendencia es que sea menor con el paso de los días.

Todos estos tipos de pigs se desplazan por el tubo empujados por el mismo fluido transportado, la velocidad del pig es aproximadamente la misma velocidad media del flujo. Algunos pigs tienen orificios que permiten paso controlado del fluido de atrás para delante del pig, dichos orificios se llaman *bypass* (Nguyen et al., 2001). Un *bypass* permite en unos pigs hacer control de velocidad. En gasoductos evitan grandes variaciones de velocidad que pueden causar daños al pig o al ducto (Matthews et al., 2007). En algunos casos han sido utilizados los *bypass* para crear chorros de alta velocidad en frente al fluido facilitando operaciones de limpieza.

Se proyecta crear un pig con un *bypass* y que mediante control de velocidad pueda parar en un punto predeterminado del ducto mientras el fluido continua fluyendo. En esta condición la diferencia de velocidad entre el fluido y el pig es máxima y asimismo la fuerza de arrastre del fluido sobre el pig es máxima.

Para saber si es factible diseñar un pig para esta condición se requiere conocer el rango de variación de la fuerza de arrastre, también la pérdida de energía causada por la presencia del pig dentro del ducto.

Este documento presenta los resultados de la fuerza de arrastre calculados usando simulación del modelo en un software de CFD.

Son evaluados tres tipos de perfil del orificio que representa el *bypass* del pig. Con los resultados se selecciona el perfil más adecuado a los objetivos del proyecto y ese perfil se toma como base para continuar el diseño mecánico del pig.

2. ESPECIFICACIONES GENERALES

El modelo estudiado está formado por un segmento de tubo y el pig (ver Fig. 1). El tubo es cilíndrico, recto y horizontal. El diámetro nominal escogido en el proyecto es de 12 pulgadas, que corresponde a un tubo de diámetro interno de 304.8 mm. y externo de 323.85 mm., la longitud es de 4 m. y la rugosidad interna de 25 micrómetros.

El modelo usado para simular el pig es un cilindro con salientes que simulan los discos de raspado, tiene un orificio axial cuya forma y dimensiones varían para los diferentes casos a ser simulados. El diámetro externo corresponde con el diámetro interno del tubo. La longitud de pig usada es 2 veces el diámetro interno del tubo, es una relación comúnmente utilizada por los fabricantes de pigs, permite que el pig no quede atascado en las curvas del ducto. El orificio tiene en su parte más estrecha un diámetro de 60 mm.

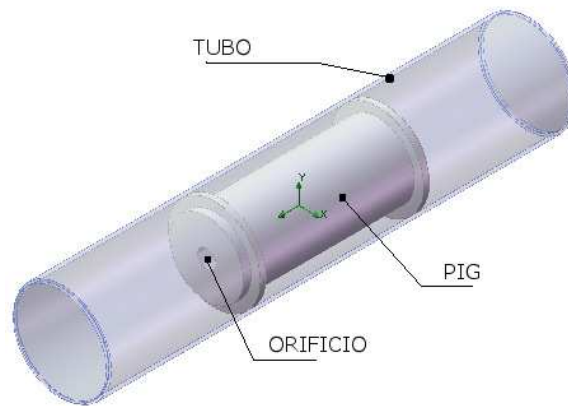


Figura 1: Modelo geométrico

El fluido considerado es gasolina con densidad constante de $\rho = 747 \text{ kg/m}^3$ y viscosidad dinámica $\mu = 6,5736 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, también constante. La velocidad del flujo es de 5 m/s que corresponde a la velocidad máxima utilizada típicamente en poliductos que transportan productos refinados.

3. MODELO

3.1. Descripción del problema.

Un pig con *bypass* constituye un cambio en el área de flujo, en la parte de atrás del pig hay una reducción y en la parte delantera hay una expansión. La reducción y la expansión son más bruscas o más suaves según la forma del orificio en el pig. Los cambios de área generan turbulencia y en consecuencia pérdida de energía del fluido. El perfil del orificio es determinante en la cantidad de energía perdida. Un objetivo del proyecto es minimizar la pérdida de energía generada por el pig parado dentro del flujo.

La interacción hidrodinámica entre el flujo y el pig es asociada a dos fuerzas principales. La primera es la fuerza de arrastre por el movimiento de fluido sobre las superficies del pig. La segunda es la fuerza por la diferencia de presiones aguas arriba y aguas abajo actuando en dirección normal a las superficies del pig. La componente axial de estas dos fuerzas empuja el pig, la dinámica del desplazamiento del pig en el tubo depende de estas fuerzas sumadas a la acción de la gravedad, la fricción en los discos y fricción en el freno si el pig tiene uno. Se desea evaluar en que rango varía la interacción hidrodinámica, de ese rango depende si el pig va a requerir un freno y la viabilidad de hacer un control de parada y puesta en movimiento con el líquido fluyendo.

El pig va a llevar baterías, circuitos electrónicos y motores, se desea maximizar el espacio disponible dentro del cuerpo del pig para los casos en que se requiera llevar un número grande de estos elementos. Este factor de carácter no hidrodinámico determina también la selección del mejor perfil del orificio.

3.2. Perfiles

El diámetro del pig varia en forma importante la fuerza hidrodinámica sobre el pig, el efecto de esta variable ya fue estudiada, ver (Ramirez y Dutra, 2009). Para resolver el problema propuesto, se modifica el perfil del orificio o *bypass*, manteniendo el diámetro mínimo constante. Se

seleccionaron tres tipos de perfil y cada perfil es modificado variando uno o varios parámetros que influyan en su geometría. Los perfiles son descritos a continuación.

3.2.1. Perfil tipo I

El perfil corresponde a una reducción y una expansión cónicas. Cada cono se considera como generado por la rotación de una línea recta inclinada alrededor del eje del pig. El orificio puede tener una sección cilíndrica en la parte central del pig. Cada línea generatriz varía en función de dos parámetros: una dimensión radial y una axial (ver Fig. 2).

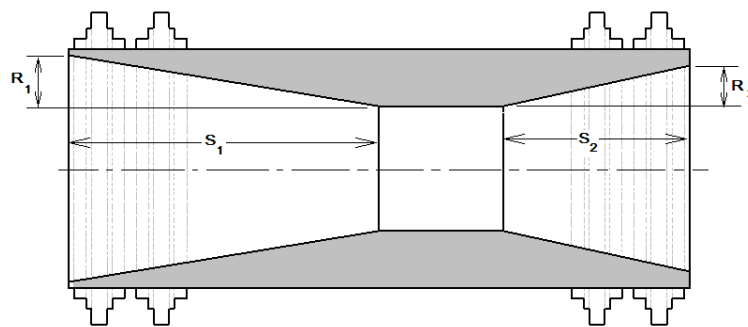


Figura 2: Perfil tipo I

3.2.2. Perfil tipo II

El segundo perfil corresponde a una reducción y una expansión con perfil curvo similar a un bocal. Este perfil es calculado a partir de la condición que la variación de presión en la dirección axial es constante.

$$\frac{\partial P}{\partial s} = cte. \quad (1)$$

Este perfil se puede ver en la Figura 3.

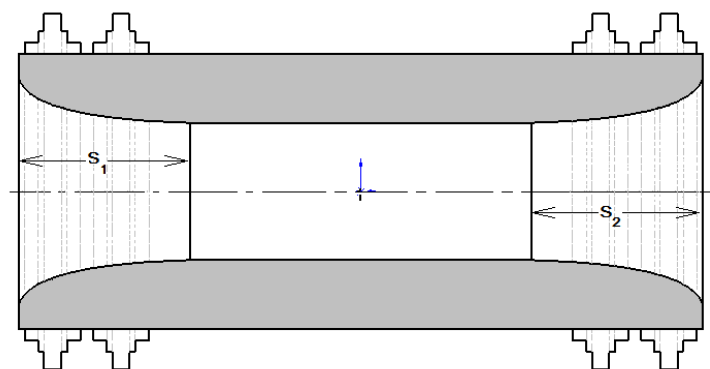


Figura 3: Perfil tipo II

3.2.3. Perfil tipo III

El tercer perfil es generado por curvas tipo *spline* que rotan alrededor del eje del pig. La curva *spline* es calculada con base en seis parámetros, la inclinación y las coordenadas axial y radial de los puntos inicial y final de la curva. El resultado corresponde a un polinomio de grado 3. Para obtener un perfil más suave en la unión con el sector cilíndrico central en todos los casos se uso un valor cero para la inclinación en ese punto, otros dos parámetros son constantes en todos los casos, la coordenada radial en el punto de unión con el sector central y la coordenada axial en el otro punto de la curva que corresponde a la cara anterior y a la posterior del pig.

Los parámetros se indican en la Figura 4 para una de la curvas *spline*. Las coordenadas axiales son indicadas por s , las radiales por r y la inclinaciones por i .

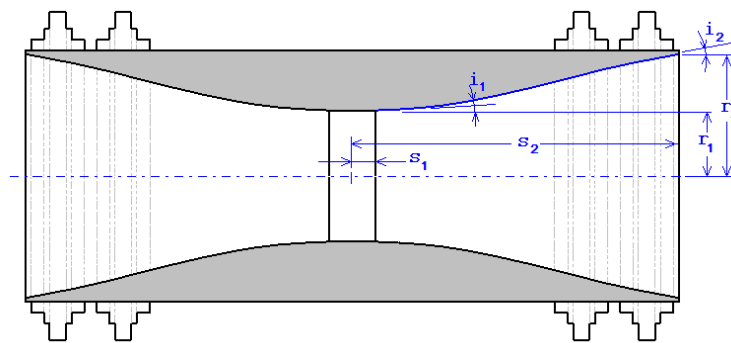


Figura 4: Perfil tipo III

3.3. Solución

Para la solución del problema hidrodinámico se establecieron las siguientes condiciones simplificadoras: se considera el fluido incompresible. Entonces la densidad del fluido es constante. Los análisis de ductos de transporte de combustible se consideran isotérmicos (Stukenbruck, 2008). La pared del tubo es de tipo rugoso con una rugosidad media de $25\mu\text{m}$ que corresponde a la rugosidad típica en un ducto de acero nuevo. Las condiciones de frontera son: velocidad del fluido a la entrada del tubo de 5m/s y presión de salida de $506,625\text{Pa}$.

Usando el software de CFD Floworks [®] fue obtenida la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes (ver Ec. (2)) (Lomax et al., 2001). Los resultados obtenidos son el gradiente de presiones y el campo de velocidad en estado estable para el volumen de trabajo analizado.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial X} = 0, \quad (2)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ e \end{bmatrix}; \quad E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ u(e + p) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{4}{3}\mu \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{4}{3}\mu u \frac{\partial u}{\partial x} + \kappa \frac{\partial T}{\partial x} \end{bmatrix}$$

La malla utilizada está formada por celdas de tipo cúbico, con refinamientos en la zonas de reducción y expansión. En la Figura 5 se pueden ver los resultados de presión y velocidad para uno de los casos estudiados del perfil tipo I.

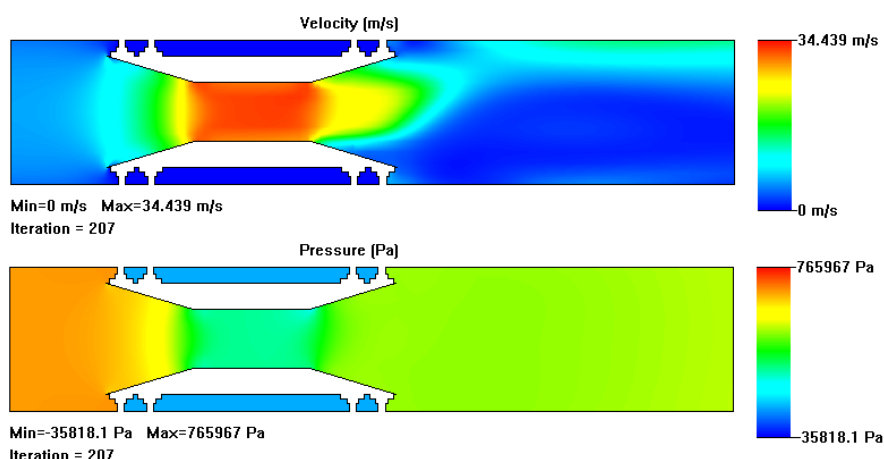


Figura 5: Gradiente de presiones y campo de velocidad

3.3.1. Cálculo de la Fuerza

La fuerza que fluido ejerce en el PIG es la suma de la fuerza de presión más la fuerza de arrastre. La fuerza de presión corresponde a la suma sobre todas la superficies expuestas del pig del producto de la presión por los segmentos de área diferenciales de la malla. Está fuerza actúa normal a cada segmento de área. La fuerza de arrastre se calcula como la suma sobre todas las superficies expuestas de pig del producto del esfuerzo cortante por los segmentos de área diferenciales de la malla. Está fuerza actúa tangencialmente a cada segmento de área y en la dirección del flujo en ese punto.

$$\vec{F}_s = \int_S P d\vec{S} + \int_S \tau_\omega d\vec{S} \quad (3)$$

El primer término de la Ecuación 3 corresponde a la fuerza normal de presión y el segundo a la fuerza de arrastre. τ_ω es la tensión cortante y P es la presión en el elemento de superficie dS (COSMOS Analysis Products, 2007). Se extrae la componente en la dirección axial de la fuerza calculada por la Ecuación 3, este es el valor de interés para el posterior diseño mecánico del pig y para el estudio de su dinámica de movimiento.

3.3.2. Cálculo de la Energía

A ecuación de energía entre la entrada (e) y la salida (s) del segmento estudiado está dada por (Stukenbruck, 2008):

$$z_e + \frac{P_e}{\rho g} + \frac{v_e^2}{2g} = z_s + \frac{P_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} + H_p \quad (4)$$

Donde z representa la altura, P la presión, v la velocidad, g la aceleración de la gravedad, ρ la densidad del fluido y H_p la pérdida de energía entre la entrada y la salida. Como el segmento considerado es horizontal z_e y z_s son iguales, las áreas de entrada y salida son iguales entonces por la ecuación de continuidad las velocidades v_e y v_s son iguales. La pérdida de energía es:

$$H_p = \frac{P_e - P_s}{\rho g} \quad (5)$$

Esta pérdida de energía es la suma de la energía perdida por fricción en el ducto más la pérdida de energía causada por el pig. Para efectos de comparación con la potencia de bombeo suministrada al ducto se definió calcular una potencia equivalente de las pérdidas (N_p)(ver Ec. 6). Q es el caudal de flujo.

$$N_p = Q \cdot (P_e - P_s) \tag{6}$$

La presión en la entrada es un resultado obtenido de la simulación en cada caso y la presión de salida es constante para todas las simulaciones y es dada como un dato de entrada.

4. RESULTADOS

Para cada uno de los perfiles son muchas las variantes que se pueden obtener, fueron realizadas simulaciones para variantes en los extremos de los rangos de variación de los parámetros, en puntos medios y con base en los resultados obtenidos se hizo una operación de búsqueda de los puntos donde mejor se alcanzan los objetivos definidos.

A continuación son presentados los resultados más representativos obtenidos para la fuerza y la pérdida de energía según cada tipo de perfil.

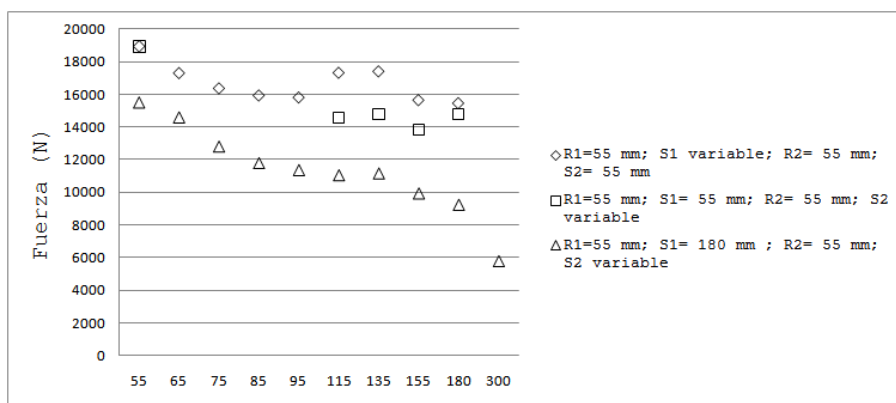


Figura 6: Resultados para la fuerza en el pig de perfil tipo I

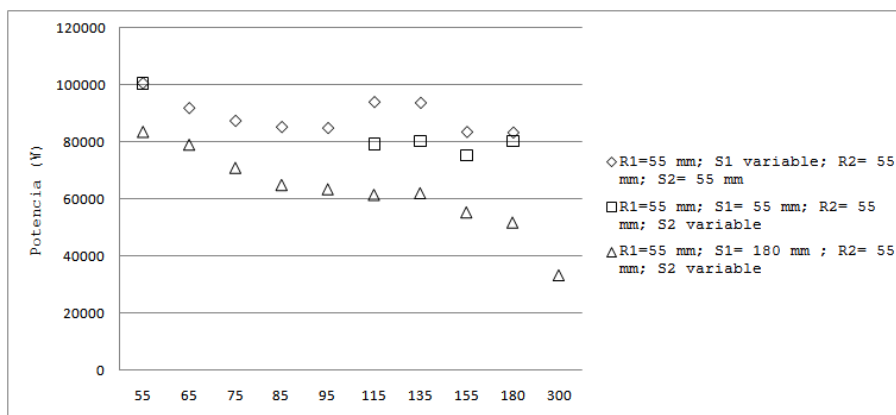


Figura 7: Resultados para la potencia de pérdidas en el pig de perfil tipo I

Para el primer perfil los resultados de fuerza se presentan en la Figura 6 y de potencia en la Figura 7, las dimensiones son indicadas de acuerdo con la Figura 2. El rango de variación de la fuerza es de 5.747 a 18.930 newton, el de la potencia es de 33.352 a 100.485 vatios.

Para el perfil tipo II los resultados de fuerza se presentan en la Figura 8 y de potencia en la Figura 9, las dimensiones son indicadas de acuerdo con la Figura 3. La variación de la fuerza es de 4.733 a 11.091 newton, el de la potencia es de 28.589 a 60.701 vatios.

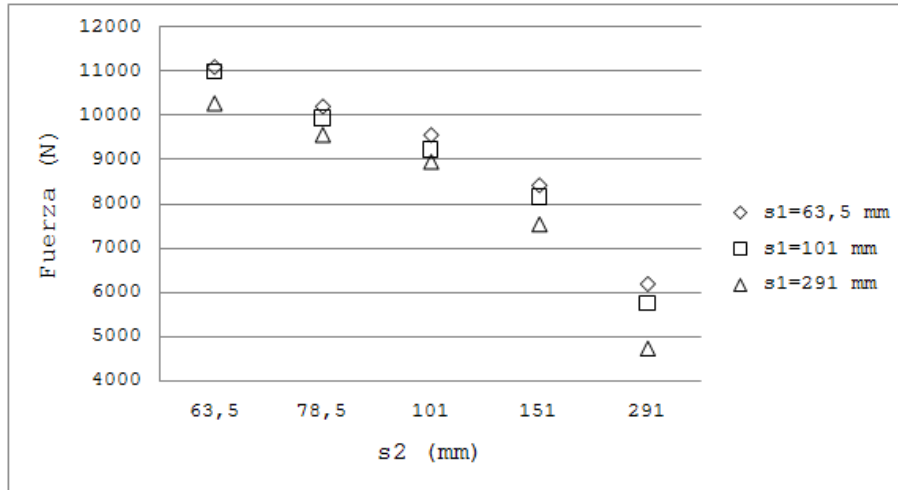


Figura 8: Resultados para la fuerza en el pig de perfil tipo II

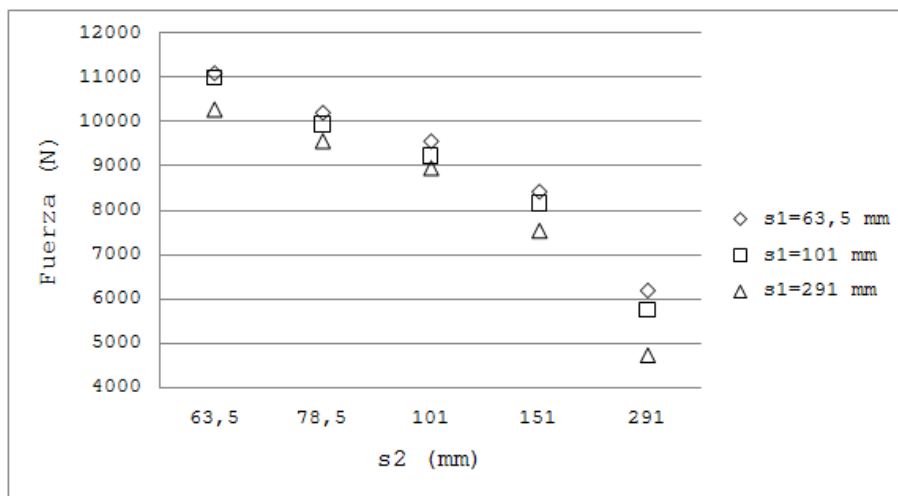


Figura 9: Resultados para la potencia de pérdidas en el pig de perfil tipo II

Para el perfil tipo III los resultados de fuerza se presentan en la Figura 10 y de potencia en la Figura 11, las dimensiones son indicadas de acuerdo con la Figura 4 y la tabla 1. Tres de los parámetros son constantes: $r_1=60$ mm, $s_2=300$ mm e $i_1=0$. La fuerza varía de 6.573 a 22.303 newton y la potencia de 37.699 a 117.642 vatios.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de las simulaciones comprueban que cambiar el perfil del orificio de *bypass* se consigue variar la fuerza hidrodinámica del fluido sobre el cuerpo del pig. De esta forma, en el diseño de detalle se podrán aplicar procesos de optimización y selección ponderada del mejor perfil para el cuerpo del pig.

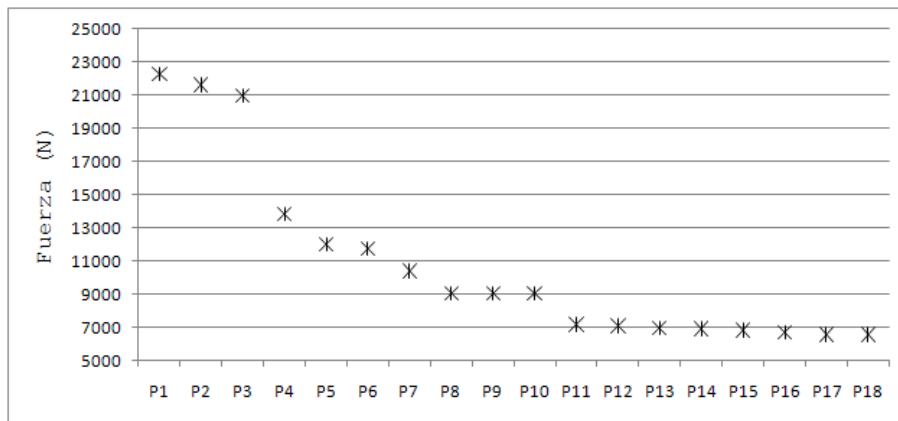


Figura 10: Resultados para la fuerza en el pig de perfil tipo III

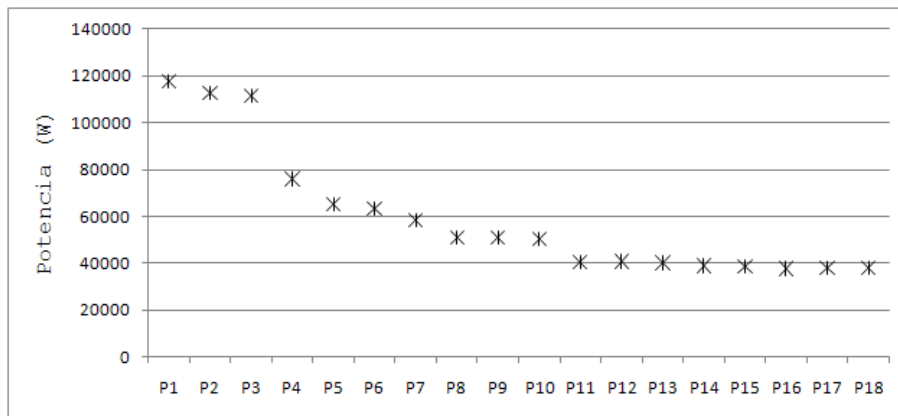


Figura 11: Resultados para la potencia de pérdidas en el pig de perfil tipo III

Para los casos simulados se encontró que la fuerza del fluido sobre el pig varía de 4.733 a 22.303 newton. Estos resultados en primer lugar permitieron conocer la magnitud de fuerza que está presente en las condiciones del problema. En principio están indicados como mejores candidatos los perfiles que dan las menores fuerzas. La presión diferencial entre puntos al frente y atrás del pig, correspondiente a los casos de menor fuerza, permite concluir que es viable conseguir que el pig pare dentro del ducto por efecto de la fricción de los discos con el ducto o con el uso de un freno de baja robustez. esta conclusión se basa en los datos sobre presiones diferenciales medidas con pigs instrumentados y reportados por fabricantes de pigs e investigadores (O'Donoghue, 2001; Short y Fletcher, 2000; Nestleroth, 2002).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
si (mm)	280	279	177	30	232	228	186	115	114
rf (mm)	78	65	67	111	89	93	108	106	106
inc	0.001	0.017	0.111	0.204	0.072	0.120	0.105	0.106	0.105
	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18
si (mm)	113	72	75	87	70	71	52	72	73
rf (mm)	89	92	107	101	89	89	88	108	108
inc	0.106	0.120	0.071	0.225	0.120	0.072	0.092	0.072	0.072

Tabla 1: Parámetros usados en el perfil 3.

Los resultados de simulación para la potencia dan una variación de 28.589 a 117.642 vatios. Estos valores pueden representar menos de 2 % de la potencia de bombeo comparando con las potencias típicas disponibles en las estaciones de bombeo y las potencias de bombas indicadas por los fabricantes (Flowserve, 2006). Entonces, es viable la operación de un ducto con el pig propuesto parado dentro del ducto.

El modelo de CFD y la herramienta de software utilizada fueron adecuados para realizar los estudios requeridos y los resultados son concordantes a la teoría hidrodinámica y a los comportamientos esperados.

6. AGRADECIMIENTOS

El primer autor expresa su agradecimiento al *CNPq Conselho Nacional de Pesquisa do Brasil* por el apoyo financiero y a la Universidad Nacional de Colombia por la comisión de estudios de doctorado.

REFERENCIAS

- Bal C. *Pipeline design for pigging*, volumen Pipeline Pigging Technology, 2nd Ed., capítulo 5. Butterworth-Heinemann, 2nd edición, 1992.
- COSMOS Analysis Products. *Introducing COSMOS Floworks*. Dassault Systemes, 2007. Manual do software em formato PDF.
- Flowserve. Pipeline/transportation pumps. Bulletin FPD-8. Disponible en <http://www.flowserve.com>, 2006. Acceso en Septiembre de 2010.
- Lomax H., Pulliam T.H., y Zingg D.W. *Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, 2001.
- Matthews L., Kennard M., y O'Donoghue A. *Velocity control of pigs in gas pipelines*, volumen Pipeline Pigging and Integrity Technology, capítulo 1. Scientific Surveys Ltd., 3rd edición, 2007.
- Nestleroth J.B. Circunferencial magnetic flux leakage (MFL) in-line inspection. In National Energy Technology Laboratory, editor, *Natural Gas Infrastructure Reliability Industry Forum 2002 Conference Proceedings*. National Research Center for Coal and Energy, National Energy Technology Laboratory, 2002.
- Nguyen T., Hui R., W. Y., y B. S. Speed control of pig using bypass flow in natural gas pipeline. In IEEE, editor, *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, páginas 863, 868. IEEE Institute for Electrical and Electronics Engineering, IEEE, 2001.
- O'Donoghue A. Dynamic simulation of the norne heidrun 10 x 16 dewatering pig. *Pipes and Pipeline International*, 2001.
- PPSA. Pigging terminology, abbreviations and formulae. Disponible en <http://www.ppsa-online.com/pigging-terms.php>, 2010. Acceso en Agosto de 2010.
- Ramirez R.E. y Dutra M.S. Theoretical evaluation of the hydrodynamic forces acting on a bypass pig inside an active pipeline. In ABCM Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, editor, *Proceedings of COBEM 2009*. 20th International Congress of Mechanical Engineering, ABCM, 2009.
- Short G. y Fletcher M. The role of smart cleaning pigs in pipeline rehabilitation and maintenance. In PennWell Petroleum Group, editor, *Proceedings of the 4th International Pipeline Rehabilitation and Maintenance Conference, 4-8, Prague*. 4th International Pipeline Rehabilitation and Maintenance Conference, 2000.

Stukenbruck S. Escoamento em dutos, 2008. Notas de curso, PUC-Rio.