

Modelado y Simulación de una Planta de Flujo

Jorge A. Alvarado*, Claudio Garcia**

*Escuela Politécnica, Universidad de São Paulo, São Paulo, Brasil
(Tel: +55 11 95600 2139; e-mail: alemora@usp.br).

**Escuela Politécnica, Universidad de São Paulo, São Paulo, Brasil (e-mail
clgarcia@lac.usp.br)

Abstract: This paper presents the mathematical modeling of a flow pilot plant, including the pressure losses and the non-linearities in the system. Physical principles were used in this modeling. The model parameters were taken from technical manuals of the manufacturers of the different equipment and instruments in the process. The model was validated comparing its output with different results obtained from the plant, showing a quite good static and dynamic behavior.

Keywords: Mathematical model, variable speed pump, flow, pressure losses

1. INTRODUCCION

Para poder hacer una descripción matemática de sistemas reales, es necesario tener en cuenta los conceptos de modelado, para determinar la respuesta dinámica del sistema. En este trabajo, se realiza un proceso de modelado fenomenológico riguroso, donde es necesario conocer bien el sistema. La base de este es hacer una descripción del proceso a partir de las leyes de la Física y donde se tienen diferentes ecuaciones, las cuales la mayoría están basadas en las leyes de la conservación de masa y energía (GARCIA, 2009).

En el Laboratorio de Control de Procesos Industriales (LCPI) de la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo se tiene disponible una Planta de Flujo, que simula un ambiente industrial (fig. 1), la cual es utilizada para realizar experimentos que envuelven los principales conceptos de Ingeniería de Automatización y Control. El trabajo de modelado es realizado en esta planta, con el objetivo de proporcionar a los estudiantes una herramienta de ayuda para realizar testes simulados, sin tener la necesidad de operar la planta.



Fig. 1. Planta de Flujo disponible en el LCPI.

La planta posee dos válvulas de control, una de baja y una de alta fricción. La primera tiene una empaquetadura de teflón y

la segunda de grafito. Las válvulas tienen un índice de fricción asociado al revestimiento del empaque. Si este valor es alto se necesita más presión para abrir o cerrar la válvula. El flujo de agua por la planta es suministrado por una bomba, la cual es controlada por medio de un inversor de frecuencia.

El modelo obtenido es validado con datos colectados de la planta real.

En resumen, las contribuciones de este trabajo son: realizar el modelado de una planta de flujo, incluyendo todos los causantes de pérdidas de carga en el proceso y la bomba, responsable de impulsar el fluido de proceso. Los testes realizados incluyen situaciones estáticas y dinámicas del proceso, con variaciones en la abertura de las válvulas de control y en la rotación de la bomba.

2. EQUIPOS E INSTRUMENTACION EN LA PLANTA

La planta presentada está compuesta de una caja de almacenamiento de agua para alimentar el proceso, una bomba de tipo centrífuga, que se encarga de realizar el abastecimiento de agua en la planta, la cual es controlada por medio de un inversor de frecuencia, que varía la rotación de la bomba de 0% (0 rpm) a 100% (1725 rpm). Adicionalmente, la planta posee dos válvulas solenoides de tipo ON-OFF, normalmente cerradas, que se encargan de bloquear o permitir el flujo de agua en la planta.

Para realizar la medición del flujo se tiene una placa de orificio de tipo concéntrico, la cual genera una presión diferencial en la línea y crea un cambio de velocidad en el fluido, para hacer la medición del flujo. La presión diferencial es medida por medio de un transmisor, generando una señal de salida de 4-20mA.

Posteriormente, el fluido pasa por dos válvulas de control de tipo globo, que operan con aire para cerrar. Las dos válvulas tienen las mismas características, la única diferencia entre ellas es el material del empaque, una es de teflón (baja fricción) y la otra es de grafito (alta fricción). Se tiene una tercera válvula de tipo globo que se encarga de introducir

perturbaciones en el proceso; las tres válvulas son de tipo igual porcentaje.

3. PROCEDIMIENTO DE MODELADO DE LA PLANTA

Un sistema de flujo se concentra en dos variables, flujo y presión. Inicialmente, como el fluido que se está trabajando es agua, se considera que él es incompresible, esto quiere decir que la presión aplicada en el líquido es transferida para todos los puntos de él de forma uniforme y en todas direcciones, por tanto la masa específica del fluido es constante (BATCHELOR, 2000).

El Teorema de Bernoulli aplica la conservación de la energía para fluidos que están en movimiento por un tubo. Para calcular la diferencia de presión entre dos puntos de la tubulación se tiene:

$$P_1 = P_0 - \rho \cdot g(h_1 - h_0) - \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_0^2) \quad (1)$$

donde:

P_i es la presión interna en el punto "i", $i=1,2$.

ρ es la masa específica del fluido.

v_i es la velocidad del fluido en el punto "i".

g es la aceleración de la gravedad.

h_i es la altura de la tubulación en el punto "i".

Esta ecuación es válida cuando se considera un ambiente ideal. En un proceso real, deben considerarse pérdidas de energía en el proceso, debido a la fricción del fluido con los instrumentos y con la tubulación, esto es llamado como pérdidas de carga. Adicionando esta variable, de la ecuación (1) se obtiene:

$$P_1 = P_0 - \rho \cdot g(h_1 - h_0) - \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_0^2) + DP \quad (2)$$

donde DP es la diferencia de presión o pérdida de carga entre los dos puntos generados por la fricción.

Para realizar un modelado lo más cercano posible de la realidad, es necesario tener en cuenta los valores reales de cada uno de los equipos y instrumentos, por tanto se hizo uso de todas las hojas de especificaciones dadas por los fabricantes para realizar el cálculo de las pérdidas de carga.

Las tubulaciones presentan pérdidas de carga a lo largo de toda la línea, las hay de dos tipos, distribuidas en los trayectos rectos de los tubos, y localizadas en las singularidades como lo son codos, té, etc. Para hacer el cálculo de la pérdida de carga total es necesario calcular la longitud de los tubos, incluyendo el valor equivalente de las singularidades. Ese valor se puede encontrar en el catálogo del fabricante de las tubulaciones. Como resultado se obtuvo que la longitud total de las tubulaciones fue de 113,13 metros. Con este valor y con ayuda de un ábaco también mostrado en el catálogo del fabricante, es posible calcular el valor de la pérdida de carga en las tubulaciones, dependiendo del diámetro de los tubos y de la velocidad del líquido, como se ve en la figura 2.

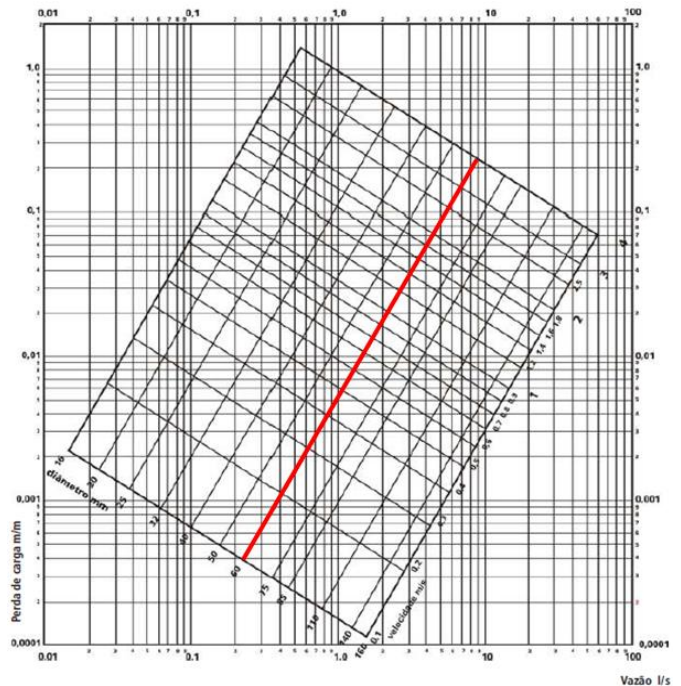


Fig. 2. Abaco para calcular la pérdida de carga en las tubulaciones (Tigre, 2008).

Para relacionar este ábaco con el modelo se utilizó la herramienta *Lookup Table* disponible en *Simulink/MATLAB®*, la cual permite realizar interpolación-extrapolación de puntos de un gráfico. En el caso de la planta, la curva correspondiente a la pérdida de carga en las tubulaciones es la curva para 60mm de diámetro. A la salida de este bloque se multiplica por la longitud total de las tubulaciones para obtener el valor total de pérdidas de carga en los tubos.

Existen dos válvulas solenoide las cuales solamente se encargan de permitir el flujo de agua en el proceso y son operadas totalmente abiertas o totalmente cerradas, por lo tanto se consideran como un generador de presión diferencial simple. La ecuación (3) muestra la expresión para el cálculo de pérdidas de carga en una válvula solenoide.

$$\Delta P = \left(\frac{Q}{K_v}\right)^2 \quad (3)$$

donde:

Q es el flujo volumétrico en [m³/h].

ΔP es la pérdida de carga en la válvula solenoide en [kgf/cm²].

K_v es el coeficiente de resistencia al flujo, el cual es suministrado por el fabricante de la válvula.

En el caso de las válvulas de control, es necesario tener en cuenta el comportamiento inherente de las mismas. Éstas tienen un valor de C_v asociado, que depende de la geometría de la válvula y es equivalente a la cantidad de galones de agua por minuto que fluye por la válvula totalmente abierta, cuando se tiene una pérdida de presión en la válvula de 1 psi (FISHER, 2010).

En la figura 3 se ve la curva de C_v dada por el fabricante para para las válvulas presentes en la planta.

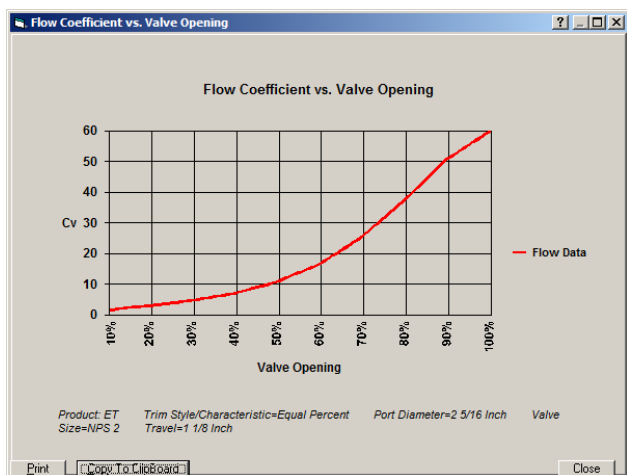


Fig. 3. Curva de C_v de las válvulas de control.

Este valor de C_v está directamente relacionado con la abertura de la válvula, como se puede ver en la ecuación (4), que el fabricante de las válvulas ofrece para calcular la pérdida de carga en las mismas (EMERSON, 2005):

$$\Delta P = \left(\frac{Q}{C_{vrel} \cdot F_p \cdot N} \right)^2 \cdot G_f \quad (4)$$

De (4) se tiene que:

F_p es un factor geométrico que debe ser considerado cuando las válvulas están montadas entre reductores.

N es una constante de ajuste de unidades dada por el fabricante.

C_{vrel} es un valor de C_v relativo, que está relacionado con la posición de abertura de la válvula, según la figura 3.

G_f es el valor de densidad relativa del fluido.

El gráfico de la figura 3 también fue representado en el modelo con la ayuda del bloque *Lookup Table* y con la ecuación (4) se hizo el cálculo de las pérdidas en las válvulas de control.

Con la ecuación (4) también se realizó el cálculo de las pérdidas en la válvula de perturbación, debido que esta también puede ser tratada como una válvula de control, solamente se debe tener en cuenta la curva de C_v relativo, la cual se muestra en la figura 4.

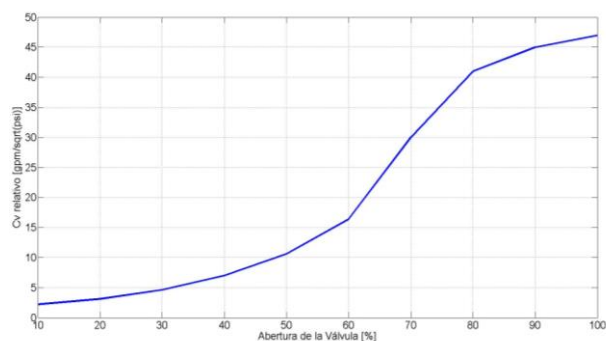


Fig. 4. Curva de C_v relativo de la válvula de perturbación.

El flujo en la placa de orificio tiene una relación cuadrática con la diferencia de presión ΔP y está representada por medio de la siguiente ecuación (DELMÉE, 2003):

$$Q = C \cdot E \cdot \beta^2 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad (5)$$

donde:

C es el coeficiente de descarga que depende de la geometría del elemento [adimensional]. Este valor generalmente es dado por el fabricante.

E es el factor de velocidad de aproximación [adimensional].

β es la relación del diámetro de la placa y del diámetro interno del tubo [adimensional].

ρ es la masa específica del fluido [kg/m^3].

A es el área transversal de las tubulaciones [m^2].

De la ecuación (5) se puede obtener la diferencia de presión medida en la placa de orificio para hacer la medición de flujo, pero debemos tener en cuenta la pérdida permanente de presión que se genera en la placa. Esta está definida por medio de la ecuación (6) descrita en (DELMÉE, 2003):

$$\Delta P_{po} = \frac{1 - C \cdot E \cdot \beta^2}{1 + C \cdot E \cdot \beta^2} \cdot \Delta P \quad (6)$$

donde ΔP_{po} es la pérdida de carga permanente generada por la placa.

Después de considerar las pérdidas de carga en los instrumentos, es necesario tener en cuenta el modelo del conjunto motor+bomba, que da el flujo para el proceso. Entre mayor es la pérdida de presión en un sistema mayor será la energía necesaria en la bomba para entregar el flujo deseado, esta energía se denomina *altura manométrica* (MATTOS; FALCO, 1989).

El fabricante de la bomba suministra una curva, que relaciona la altura manométrica con el flujo que es capaz de suministrar al proceso. Esta curva es comúnmente llamada *curva característica*. En la figura 5 se puede ver la curva característica para la bomba presente en el laboratorio, la curva que representa el comportamiento de la bomba es la curva 202 del gráfico presentado.

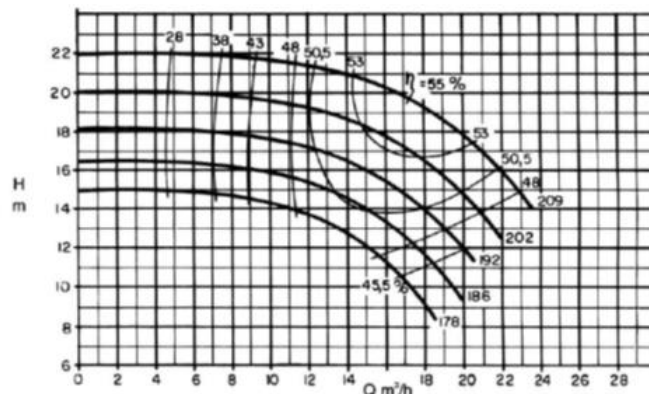


Fig. 5. Curva característica de la bomba (KSB, 2009).

Esta curva solo es válida para la bomba en rotación máxima (1725 rpm). Para obtener un modelo general para todas las rotaciones de la bomba se hace uso de las *Leyes de Semejanza*, estas son una serie de expresiones que definen las mudanzas en la capacidad y la carga de la bomba cuando ocurren cambios de velocidad (MATOS; FALCO, 1989). La ecuación (7) describe la relación entre la rotación, el flujo y la altura manométrica para una bomba centrífuga.

$$\frac{N_0}{N_1} = \frac{Q_0}{Q_1} = \sqrt{\frac{H_0}{H_1}} \quad (7)$$

donde:

N_0 es la rotación nominal y N_1 es la rotación deseada.

Q_0 es el flujo nominal y Q_1 es el flujo deseado.

H_0 es la altura manométrica nominal y H_1 es la altura deseada.

La figura 6 muestra el comportamiento del flujo en la planta al aplicar una señal tipo escalón en la rotación de la bomba en $t=10$ segundos. Como se puede ver en la figura, al haber una variación en la rotación de la bomba, esta respuesta no es instantánea debido a la inercia del motor y a la dinámica presente en el medidor de flujo.

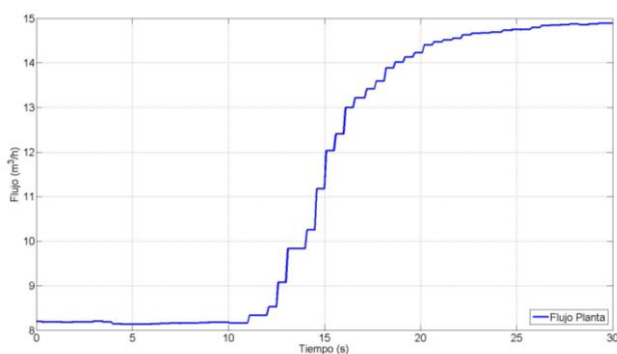


Fig 6. Variación del flujo en la planta.

La respuesta del flujo de la figura 6 se comporta como un sistema de segundo orden, con dos constantes de tiempo τ en las cuales se deben considerar dos factores que hacen influencia en la dinámica del proceso, la primera es la inercia del motor y la segunda es la dinámica asociada al medidor de flujo. A partir de varios testes realizados para diferentes señales tipo escalón en la bomba, se realizó el cálculo de las constantes de tiempo asociadas a estos dos equipos para realizar la dinámica del proceso.

Se dividió la dinámica en dos funciones de transferencia de primer orden. Las constantes de tiempo fueron obtenidas por medio de análisis de curva de proceso en donde la respuesta llega al 63,2% de su variación total (OGATA, 2003). Se obtuvo que la respuesta tiene un tiempo muerto de 2 segundos en relación con el instante de tiempo donde se realizó la variación de la rotación. Las constantes de tiempo obtenidas fueron de 1,1 segundos para el transmisor y 2,5 segundos para la bomba.

No se tuvo en cuenta ninguna constante de tiempo en las válvulas, ya que las entradas de posición en el modelo son

señales tomadas del sensor de posición instalado en las mismas, por lo tanto, estas señales ya tienen incluidas las dinámicas que describen el comportamiento de las válvulas.

4. RESULTADOS

4.1 Motor+Bomba

Los resultados presentados se enfocan en el flujo, cuando se varía la rotación de la bomba y cuando se varía la abertura de las válvulas. Se realizaron diversos testes en la planta y se colectaron datos, para después ser comparados con los resultados obtenidos en el modelo.

Inicialmente se realizaron testeos de variación de la rotación de la bomba con las válvulas totalmente abiertas. Se vio que existe un error de la rotación real con respecto a la rotación teórica, como se puede ver en la tabla 1. Nótese que el error aumenta a medida que la rotación se hace menor.

Tabla 1. Error en la rotación de la bomba.

Rotación deseada (%)	Rotación teórica (rpm)	Rotación medida (rpm)	Error (%)
100	1725	1741	-0,93
90	1575	1621	-2,92
80	1400	1449,6	-3,54
70	1225	1274	-4,00
60	1050	1096	-4,38
50	875	915,46	-4,62
40	700	734,53	-6,93
30	525	555,12	-5,74
20	350	374,63	-7,04
10	175	190,53	-8,87

Para minimizar el error en el modelo, se trabajó con el valor real de la rotación en la bomba para realizar los testes en el modelo de la planta. Los valores recomendados para operar la bomba son entre 40% y 100%, debido a que la placa de orificio pierde precisión para valores pequeños de flujo. Se aplicaron señales de tipo escalón, siempre saliendo de un valor nominal de rotación. Se trabajó con 80% de la rotación máxima, como valor inicial para todos los ensayos realizados. Se realizaron comparativos de los valores estáticos de flujo aplicando diferentes rotaciones. La tabla 2 muestra los resultados obtenidos para diferentes rotaciones de la bomba.

Tabla 2. Comportamiento estático para diferentes valores de rotación en la bomba.

Rotación (%)	Flujo en la planta (m³/h)	Flujo en el modelo (m³/h)	Error (%)
40	6,36	6,44	1,26
50	8,08	8,05	-0,37
60	9,80	9,74	-0,61
70	11,39	11,16	-2,02
80	13,07	13,10	0,31
90	14,70	14,63	-0,48
100	16	16,58	3,62

Los valores mostrados en la tabla 2 son valores medios obtenidos de varios testes realizados en diferentes momentos, debido que la posición de la válvula cuando está totalmente abierta no siempre es exactamente la misma, por

causa del efecto de la fricción. Este fenómeno se hace más notorio en la válvula con empaque de grafito.

Finalmente, para validar el comportamiento de la bomba, se realizaron pruebas para observar el comportamiento dinámico del flujo aplicando diferentes escalones en la rotación, tanto positivos como negativos. La figura 7 muestra los resultados obtenidos aplicando una señal escalón de 80% a 90% de la rotación.

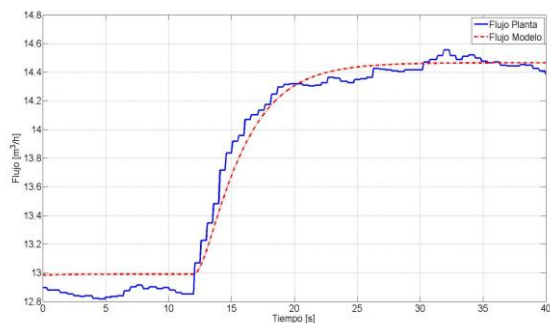


Fig. 7. Flujo obtenido aplicándose un escalón de 80 a 90%.

Nótese en las figuras posteriores que algunos de los valores no coinciden exactamente con los valores de la tabla 2, debido a que en las figuras se están tomando casos particulares donde se tienen como valores de entrada en las válvulas la posición real de abertura de las mismas.

De igual forma se aplicó un escalón de pendiente negativa de 80% a 60% de rotación de la bomba, el resultado se puede observar en la figura 8.

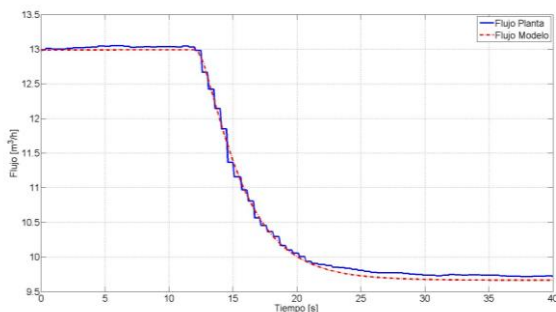


Fig. 8. Flujo obtenido aplicándose un escalón de 80 a 60%.

Las respuestas obtenidas en las figuras 7 y 8 muestran que el comportamiento estático y dinámico del modelo comparado con el comportamiento real de la planta presenta resultados con errores aceptables, esto quiere decir que la dinámica de la bomba manteniendo la abertura de las válvulas constante está próxima del comportamiento real del proceso y se puede pasar al siguiente paso que es hacer tests haciendo variaciones en las válvulas de control.

4.2 Válvulas de control

Aquí se pasó a realizar pruebas manteniendo la rotación de la bomba constante pero ahora variando la abertura de las válvulas. Inicialmente se trabajó con la válvula de grafito totalmente abierta y se varió la abertura de la válvula de teflón, aplicando señales de tipo escalón. Por seguridad se recomienda no cerrar las válvulas más de 50%, debido que la

presión en los tubos puede ser muy alta y puede llegar a dañar algún instrumento. En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos aplicando diferentes valores de abertura en la válvula, donde 100% significa que la válvula está totalmente abierta y 0% significa que la válvula estaría totalmente cerrada. Durante estos tests la rotación de la bomba se mantuvo constante con una rotación de 80%.

Tabla 3. Comportamiento estático del flujo variando la abertura de la válvula de teflón.

Abertura válvula (%)	Flujo en la planta (m³/h)	Flujo en el modelo (m³/h)	Error (%)
50	8,49	8,48	-0,12
55	9,80	9,91	-1,12
60	10,89	10,74	-1,38
65	11,67	11,48	-1,73
70	12,21	12,00	-1,72
75	12,52	12,37	-1,20
80	12,72	12,61	-0,86
85	12,83	12,80	-0,23
90	12,88	12,98	0,78
95	12,94	13,08	1,08
100	12,95	13,10	1,23

Por otro lado se realizaron ensayos para validar la dinámica del sistema. En la figura 9 se muestra la comparación del flujo obtenido aplicando una señal tipo escalón de 100% a 50% de abertura de la válvula, manteniendo la rotación de la bomba constante con una rotación de 80%.

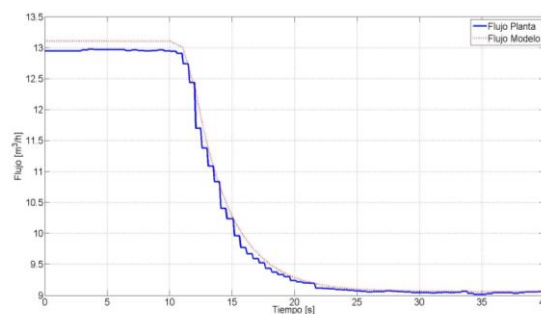


Fig. 9. Comportamiento del flujo aplicando una señal tipo escalón de 100% a 50%.

Adicionalmente se envió una señal escalón de 50% a 100% de abertura de la válvula, el resultado de muestra en la figura 10.

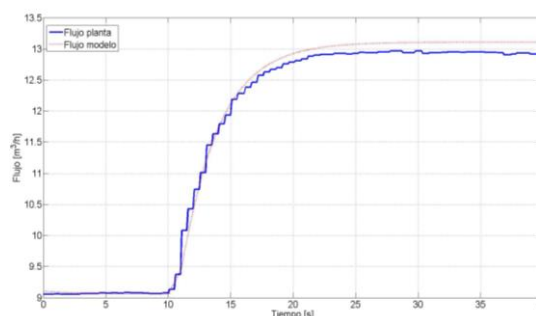


Fig. 10. Comportamiento del flujo aplicando una señal tipo escalón de 50% a 100%.

La dinámica de la válvula de teflón en las figuras 9 y 10 presentaron errores aceptables. Cabe recordar que los valores iniciales y finales de las mismas presentan una diferencia con respecto a los valores de la tabla 3, debido a que los valores que se toman en la tabla son valores medios y los resultados de las figuras 9 y 10 son testes particulares, donde se tomó como valores de entrada en el modelo la posición real de la válvula.

Se realizaron los mismos ensayos en la válvula de grafito. La Tabla 4 muestra los resultados estáticos de la misma.

Tabla 4. Comportamiento estático del flujo variando la abertura de la válvula de grafito.

Abertura válvula (%)	Flujo en la planta (m ³ /h)	Flujo en el modelo (m ³ /h)	Error (%)
50	9,85	9,94	-0,9107
55	10,35	10,42	-0,6763
60	11,66	11,61	0,4288
65	12,01	11,98	0,2498
70	12,61	12,60	0,079
75	12,70	12,75	-0,39
80	12,77	12,79	-0,16
85	12,80	12,79	0,078
90	12,80	12,79	0,078
95	12,80	12,79	0,078
100	12,81	12,79	0,1561

Debido a la alta fricción que presenta la válvula, esta se mueve muy poco al aplicar aberturas menores al 20%, debido a que la presión aplicada no logra vencer la fricción estática asociada a la válvula. Por esto solamente se nota un cambio en el flujo cuando se aplican escalones mayores de 20%, ya que se presenta un cambio en la posición de la válvula.

La figura 11 muestra el resultado de aplicar una señal de tipo escalón de 100% a 50% en la válvula de grafito y en la figura 12 se puede ver el comportamiento del flujo aplicando una señal de 50% a 100% en la abertura.

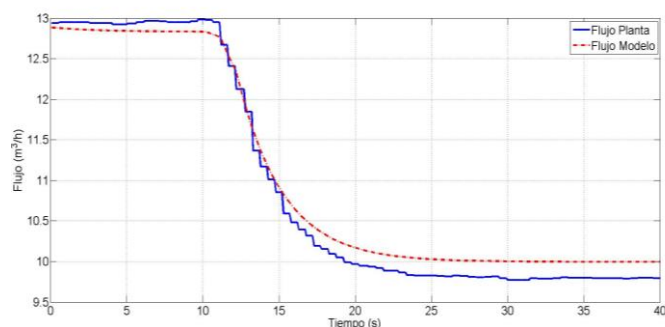


Fig. 11. Comportamiento del flujo aplicando una señal tipo escalón de 100% a 50% en la válvula de grafito.

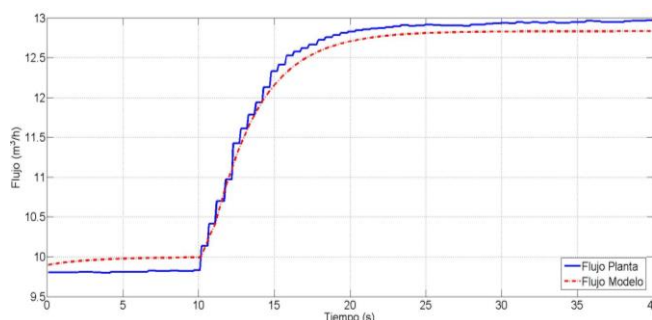


Fig. 12. Comportamiento del flujo aplicando una señal tipo escalón de 50% a 100% en la válvula de grafito.

Los gráficos de las figuras 11 y 12 mostraron resultados con errores aceptables, tanto para los valores finales e iniciales como para la dinámica de la válvula. Los datos de las tablas 3 y 4 son valores promedio, tomados de varios ensayos realizados debido que las mediciones presentan una pequeña variación por causa de la sensibilidad de los sensores de flujo. Las figuras 11 y 12 son casos particulares que se utilizaron para verificar la dinámica del sistema, utilizando la posición medida de la válvula directamente en el sistema supervisorio.

5. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en las pruebas realizadas se pudieron obtener resultados buenos pero el modelo no lleva en consideración algunos factores que podrían influenciar en la planta real, como calibración, limpieza y desgaste de los instrumentos, ruido de medición, etc. Estos factores afectan directamente la medición del flujo.

Es muy importante a la hora de realizar un modelo fenomenológico, siempre trabajar con los valores reales de los instrumentos, ya que por ejemplo la rotación de la bomba real tenía diferencias con la rotación que se presenta en la hoja de especificaciones y eso influyó inicialmente a la hora de hacer la validación del modelo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la agencia brasilera CNPq por el financiamiento de la beca de maestría de Jorge A. Alvarado.

REFERENCIAS

BATCHELOR, G.K. An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press, New York, NY, 2000.

DELMÉE, G. J. Manual de Medição de Vazão. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2003.

EMERSON, Control Valve Handbook. 4. ed. Fisher Controls International LLC, 2005.

GARCIA, C. Modelagem e Simulação. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2009.

KSB, Manual de Curvas Características, N° A2740/42/44.1P/E/S/6, 2009.

MATTOS, E. E.; FALCO, R. Bombas Industriais. 1. ed. Rio de Janeiro: JR Editora Técnica, 1989.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 4. ed. São Paulo: Pearson / Prentice Hall, 2003.

TIGRE, Catálogo Técnico Água Fria Predial, 2008.