COMPLEX FLOW OF STRUCTURAL LIQUIDS THROUGH OSCILLANTING PIPES

E. Emilio. Herrera (1), A. E. Chávez, O.Manero,R. Herrera, F. Calderas
(1) Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria Coyoacan, C.P 04510, México D,F.
e-mail: emilio_ed@hotmail.com

RESUMEN

En este trabajo, se estudia un líquido complejo que se estructura bajo flujo en una tubería de radio $R = a$ y longitud L. El proceso es isotérmico y se supone que el líquido es incompresible. La pared del cilindro es oscilada axialmente. A partir de esto, se calcula el aumento del flujo como función de las propiedades materiales y estructurales del líquido. Para caracterizar nuestro líquido complejo, se propone un modelo el cual resulta de acoplar una ecuación cinética con una reológica. El sistema acoplado, se resuelve mediante un planteamiento perturbativo y estocástico alrededor del número de Reynolds. Se demuestra que, el aumento en el flujo oscilante $I(\%)$ depende de la energía cinética, del cuadrado en la frecuencia angular ω y del factor J, el cual puede ser interpretado como un factor de ampliación que depende de las propiedades viscosas y estructurales del líquido.

1–ANTECEDENTES

Los líquidos sometidos a flujo oscilante exhiben propiedades interesantes como aumento en el gasto con respecto a aquél donde la frontera no se mueve. Sobre este sistema se han publicado una gran cantidad de artículos los cuales demuestran que el aumento en el flujo $I(\%)$ definido como:

$$I(\%) = \frac{\langle Q(t) \rangle - Q_p}{Q_p} \times 100 \tag{1}$$

depende de las propiedades viscoelásticas del material y de la frecuencia angular. En la ecuación (1) $\langle Q(t) \rangle$ es el promedio del flujo volumétrico oscilante y Q_p es el flujo a gradiente de presión constante. En el estudio de estos flujos, se han utilizado diferentes tipos ecuaciones constitutivas; entre las más empleadas en la literatura científica podemos citar: (i) modelos inelásticos (ley de potencia, Ellis, Carreau, newtoniano generalizado), (ii) modelos viscoelásticos (ecuación convectiva superior de Maxwell, Oldroyd-B, modelo de Pipkin, corrotacionales, White-Metzner, modelo de redes no afines, modelo de Wagner, modelo K-BKZ, y de Filbrey-Ericksen) [1-5]. Todas estas investigaciones, han permitido concluir que el aumento en el flujo oscilante está determinado por las siguientes condiciones:

(i) El líquido debe ser adelgazante al corte
(ii) La naturaleza de este aumento, esta determinado por un acoplamiento entre las propiedades viscoelásticas
(iii) La eficiencia, depende fuertemente de la naturaleza de la ecuación constitutiva.

Recientemente, los fluidos que presentan propiedades complejas han sido de gran importancia en las aplicaciones industriales. Desde un punto de visto energético, se ha demostrado que existen ventajas del flujo pulsátil con respecto a aquel a presión constante.

En el campo de las aplicaciones a la petroquímica, los fluidos complejos son utilizados en operaciones de recuperación en sistemas subterráneos. Esto sucede cuando se inyectan tensoactivos cationicos con alto peso molécular en los yacimientos, lo que produce un aumento en la fractura de las rocas en comparación con los líquidos poliméricos tradicionales.

En vista de la importancia tecnológica de estos líquidos, es sorprendente que no hayan recibido tanta atención en la literatura actual. Este es el objetivo de este trabajo. Para caracterizar nuestro líquido complejo, utilizamos una variante del modelo de Fredrickson-Bautista el cual acopla el modelo del newtoniano generalizado a una ecuación cinética de formación y destrucción de la estructura debido al flujo

2.-ECUACION DE MOVIMIENTO Y CONSTITUTIVA

Para caracterizar nuestro líquido complejo que se estructura bajo flujo, empleamos un modelo de reciente uso que ha sido utilizado en el estudio de líquidos complejos dependientes del tiempo. La versión simple del modelo Manero-Bautista [2] toma en cuenta los procesos de rompimiento y deformación de la estructura, sin tomar en cuenta la elasticidad del material.

$$\rho \frac{D\underline{V}}{Dt} = -\nabla P + \nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}}(\underline{R},t) + \rho \underline{g} \tag{2}$$

$$\underline{\underline{\sigma}}(\underline{R},t) = \frac{2}{\varphi(R,t)} \underline{\underline{D}}(\underline{R},t) \tag{3}$$

$$\frac{d\varphi(\underline{R},t)}{dt} = \frac{\varphi_0 - \varphi(\underline{R},t)}{\lambda} + K(II_{\underline{\underline{D}}})(\varphi_\infty - \varphi(\underline{R},t))\underline{\underline{\sigma}}(\underline{R},t) : \underline{\underline{D}}(\underline{R},t) \tag{4}$$

Es importante notar que en la ecuación (3), $\underline{\underline{\sigma}}(\underline{R},t)$ en un tensor de esfuerzos viscoso-estructural, $\varphi(\underline{R},t)$ es la fluidez (inverso de la viscosidad) y $\underline{\underline{D}}(\underline{R},t)$ es el tensor rapidez de deformación (parte simétrica del tensor gradiente de velocidad). En la ecuación (4) $\varphi_0, \varphi_\infty$ son la fluidez a rapidez de deformación baja y alta respectivamente, λ es un tiempo de reestructuración del material y $K(II_{\underline{\underline{D}}})$ puede ser interpretada como una función cinética de formación y destrucción de la estructura que en general depende del segundo invariante del tensor rapidez de deformación $II_{\underline{\underline{D}}}$.

3.-SISTEMAS FÍSICO

El problema consiste en un tubo de radio $R = a$ y longitud L el cual, contiene un líquido complejo incompresible que se estructura bajo flujo cortante simple. El proceso es isotérmico. En la frontera del tubo $R = a$ el sistema oscila axialmente en la pared., i.e satisface la siguiente condición de frontera:

$$V_Z(R = a,t) = Vn(t) = \left(\frac{\varphi_0}{k_0} a\right) n(t) \tag{5}$$

donde $n(t)$ es una variable aleatoria estocástica, que satisface las relaciones de Weinner-Kitchen [5].

$$\langle n(t') \rangle = 0 \tag{6}$$

$$\langle n(t')n(t'+s) \rangle = R(s) \tag{7}$$

en (5) $V = \left(\frac{\varphi_0}{k_0} a\right)$ es la velocidad característica del sistema la cual se expresa como el producto del inverso de un tiempo debido a la relación de los procesos viscosos y de estructura multiplicado por la longitud característica radial a.

4.-VARIABLES ADIMENSIONALES

Se introducen las siguientes variables con el fin de que aparezca el número de Reynolds en la ecuación de movimiento y proponer un esquema perturbativo alrededor de este número.

$$v=\frac{k_0 V_Z}{\varphi_0 a};r=\frac{R}{a};z=\frac{Z}{L};\Gamma_{ij}=k_0\sigma_{ij};\,p=\frac{k_0 aP}{L};t'=\omega t\,;q=\frac{k_0}{\varphi_0}\frac{\partial V_Z(R,t)}{\partial R} \tag{7}$$

en (7) ω es la frecuencia característica, L y a son las longitudes características axiales y radial respectivamente, φ_0 es la fluidez a rapidez de corte cero, k_0 es una constante cinética de formación y destrucción de la estructura, $\frac{\partial V_Z(R,t)}{\partial R}$ es la rapidez de deformación y P es la presión del sistema. Al introducir (7) en (2) obtenemos la ecuación adimensional de movimiento.

$$\mathrm{Re}\frac{\partial v}{\partial t'}=-\frac{dp}{dz}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\Gamma\right) \tag{8}$$

en (8) Re es el Reynolds vibracional definido como $\mathrm{Re}=\rho\omega^2 a\varphi_0<<1$.

5.- ANÁLISIS PERTURBATIVO.

Después de sustituir las variables adimensionales definidas en (7) en las ecuaciones (2-4) postulamos que la velocidad, la rapidez de deformación y el tensor de esfuerzos se pueden expresar en series de potencias en torno al número de Reynolds

$$v(r,t')=\sum_{j=0}^{\infty}\mathrm{Re}^j v_j(r,t');\quad q(r,t')=\sum_{j=0}^{\infty}\mathrm{Re}^j q_j(r,t');\quad \Gamma(r,t')=\sum_{j=0}^{\infty}\mathrm{Re}^j\Gamma_j(r,t') \tag{9}$$

6.-AUMENTO N EL FLUJO

Después de introducir las variables adimensionales (9) en (8) y utilizar las relaciones de Weinner-Kitchen hasta el segundo orden en el número de Reynolds, el aumento en el flujo toma la forma:

$$I(\%)=\mathrm{Re}^2(t')^2 J \tag{10}$$

donde $I(\%)$ es el aumento en el flujo definido en (1), Re^2 es el cuadrado en el número de Reynolds, $(t')^2$ es la frecuencia adimensional y J es conocido como factor de ampliación el cual, se define a continuación:

$$J=\frac{25}{\Gamma w}\frac{\int_0^{\Gamma w}\Gamma_0^4\frac{\ddot{\Gamma}_0}{\dot{\Gamma}_0}d\Gamma_0}{\int_0^{\Gamma w}q_0\Gamma_0^2 d\Gamma_0} \tag{11}$$

en la ecuación (11) $\Gamma_0=\Gamma_0(q_0)$ es el esfuerzo adimensional a orden cero, $\dot{\Gamma}_0$ y $\ddot{\Gamma}_0$ son la primera y segunda derivada del esfuerzo con respecto $q_0=q_0(r)$ y $\Gamma w=\frac{1}{2}\left(\frac{dp}{dz}\right)$ es el esfuerzo en la pared. Para calcular el esfuerzo a orden cero en nuestro sistema, eliminamos la dependencia temporal en los modelos Bautista-Manero y Boek

$$\Gamma_0(q_0)=\frac{-(1-Aq_0{}^2)+\sqrt{(1-Aq_0)^2+4Bq_0{}^2}}{2Bq_0} \tag{12}$$

en (12) $A = \dfrac{\lambda \varphi_0}{k_0}$; $B = \dfrac{\lambda \varphi_\infty}{k_0}$ son números adimensionales que representan la combinación de mecanismos viscosos y estructurales de nuestro sistema.

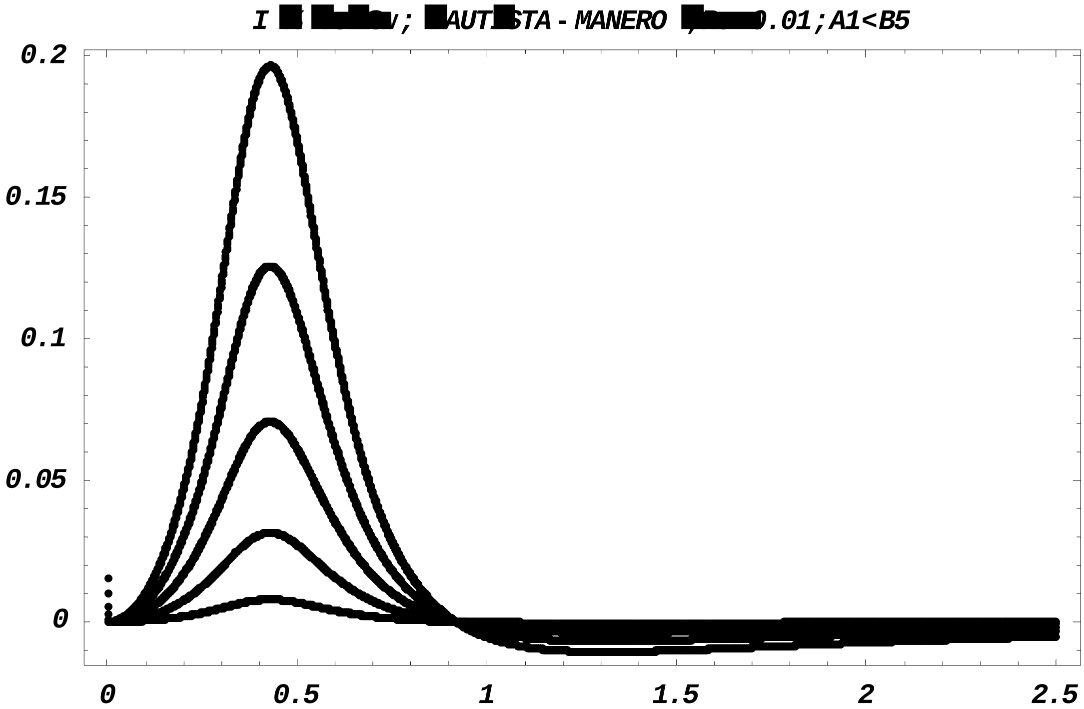

Figura1.- Predicciones del Modelo Bautista-Manero el flujo oscilante de líquidos complejos. Los parámetros materiales utilizados en la simulación son: $\mathrm{Re} = 0.01$; $A = 1$; $B = 5$

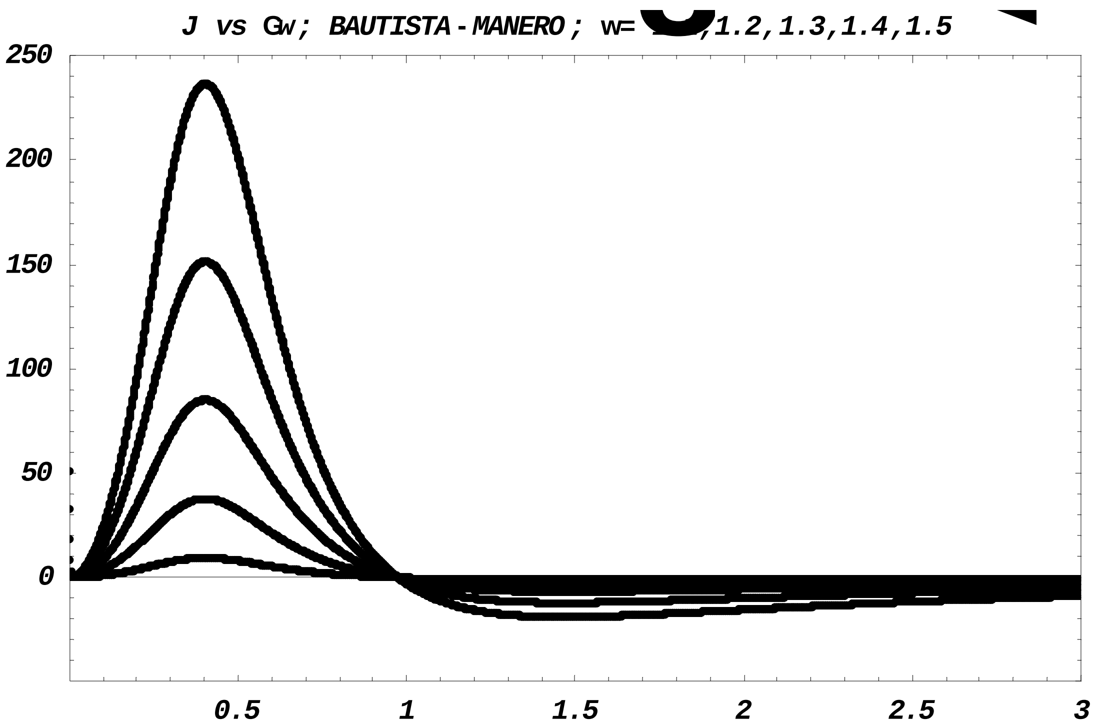

Figura 2.- Muestra el factor de ampliación J como función del esfuerzo en la pared, para diferentes valores de la frecuencia. $\mathrm{Re} = 0.01$; $A = 1$; $B = 5$; $\omega = \{1,1,1.2,1.3,1.4\}$; $A = 1$; $B = 5$

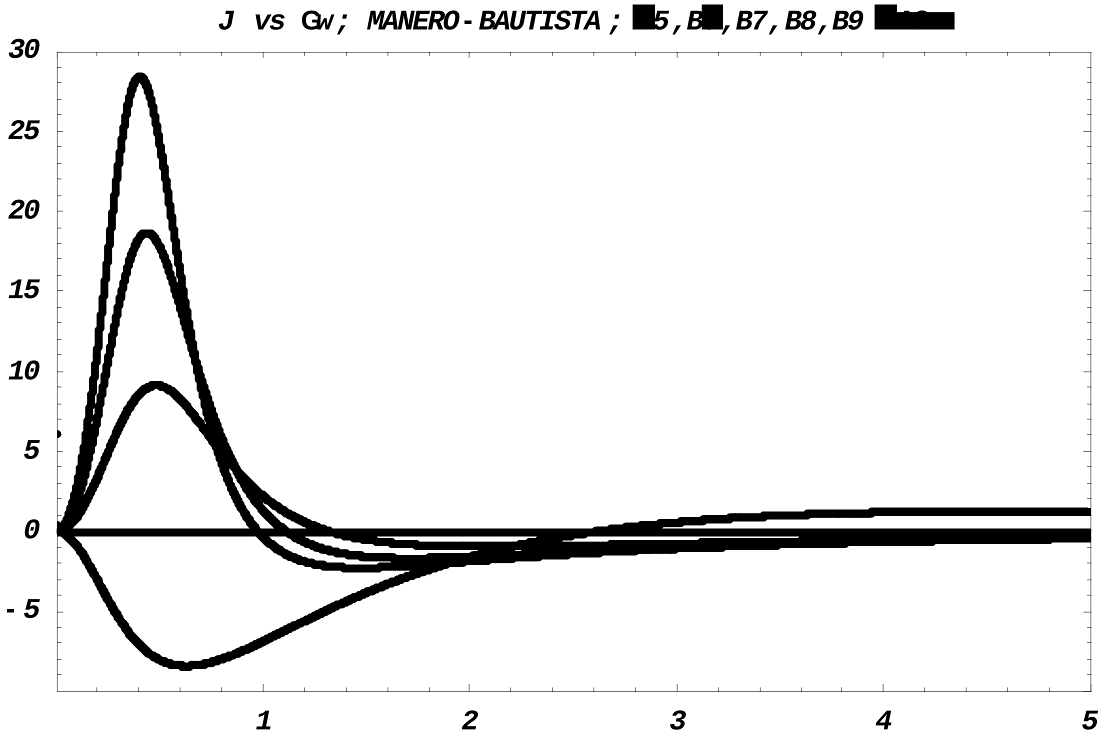

Figura 3.- Muestra el factor de ampliación J como función del esfuerzo en la pared, para diferentes valores de la frecuencia. $\mathrm{Re} = 0.01$; $A = 1$; $B = 5$; $\omega = \{1,1,1.2,1.3,1.4\}$; $A = 1$; $B = 5$

7.-CONCLUSIONES

En este trabajo se modela un líquido con estructura transitoria. El líquido es caracterizado con un sistema de ecuaciones acopladas. Los resultados más importantes se presentan a continuación:

1.-El aumento en el flujo $I(\%)$ depende del cuadrado de la frecuencia, del cuadrado del número de Reynods y de un factor J que se definio como un factor de ampliación que depende de las propiedades viscosas y cinético estructurales.

2.- Se observa que al aumentar el número adimensional A, el líquido presenta eficiencias negativas es decir, al pasar de estados de menor a mayor estructura, el sistema presenta eficiencias negativas.

3.- Cuando el sistema pasa de estados de mayor a menor estructura se obtienen las curvas resonantes del sistema.

4.- Un hecho importante, es de acuerdo con las investigaciones, parecer ser que los líquidos de estructura transitoria alcanzan la máxima eficiencia a menores gradientes de presión en comparación con los modelos tradicionales.

5.- Por ultimo, es necesario, realizar la parte experimental con el fin de comparar las predicciones teóricas con los resultados experimentales.

8.-BIBLIOGRAFÍA

[1] Fredrickson, A.G, A Model for the Thixotropy of Suspensions, AIChEJ.16, 436 (1970)
[2] Bautista, F, J.F.A. Soltero, J.H. Perez Lopez, J.E. Puig, and O.Manero, "J. Non-Newtonian Fluid Mech. 94 57-66 (2000)
[3] Barnes HA, Towsend P, Walters K (1971), Rheol Acta 10:517-527
[4] J.Mansel Davies, Sakarindr Bhumiratana and R. Byron Bird, J. Non-Newtonian Fluids Mechs. 3 (1977/1978) 237-259.
[5] N.Phan Thien, J.Non-Newtonian Fluids Mech, 4 (1978) 167-176