

## SISTEMA PARA MEDIR LA COMPRESIBILIDAD ISOTÉRMICA DE ACEITES MINERALES

### RESUMEN

En este artículo se reporta la construcción de un sistema para medir el módulo de compresibilidad de aceites hidráulicos utilizados en los sistemas de potencia fluida. Se describe la metodología seguida en el proceso, el diseño y selección de componentes e instrumentación, el método de determinación del módulo, la metodología de prueba y los resultados obtenidos.

**PALABRAS CLAVES:** Módulo de compresibilidad, medición, aceites minerales, hidráulica.

### ABSTRACT

*In this paper it is reported the construction of a system to experimentally evaluate bulk moduli of working fluids used in hydraulic power systems. Theoretical formulations to disclose the influence the compressibility has in hydraulic systems behavior are outlined. It is described the methodology and procedure designed to measure the compressibility behavior of mineral oils for a representative range of pressures and temperatures. Results of the experimental work are presented.*

**KEY WORDS:** Bulk modulus, measurement, petroleum fluids, hydraulics.

### LUZ ADRIANA MEJÍA C

Estudiante Maestría en Sistemas Automáticos de Producción  
Laboratorio de Sistemas Dinámicos y Control  
Universidad Tecnológica de Pereira  
adriamec@yahoo.com

### MARIO HOYOS MESA

Profesor Titular  
Universidad Tecnológica de Pereira.  
Director del grupo de investigación de Potencia Fluida y Control  
marhoyos@utp.edu.co

## 1. INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto, realizado como trabajo de grado en la Maestría en Sistemas Automáticos de Producción y perteneciente al grupo de investigación en Sistemas de Potencia Fluida y Control de la facultad de Ingeniería Mecánica, se diseña, construye y valida un sistema de medida de la compresibilidad isotérmica para aceites minerales comerciales utilizados en sistemas óleo-hidráulico. El proyecto tiene financiación de la Maestría y del Centro de Investigaciones y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Al enfrentar el análisis de un sistema óleo-hidráulico, ya sea con el fin de diseñarlo o de evaluar su actual funcionamiento, es necesario conocer las particularidades de su operación y las características de los elementos y componentes que hacen parte del mismo, entre ellas las propiedades del aceite utilizado.

La *compresibilidad* es una propiedad de los aceites que tiene gran influencia en el desempeño de los sistemas óleo-hidráulicos y por lo tanto, contar con información sobre la misma, proporcionada por métodos de medición confiables, es importante a la hora de emprender tareas de análisis o diseño.

Entre los métodos de medición analizados en el proyecto, se eligió uno de medida directa, que consiste en determinar el volumen adicional que debe introducirse en un recipiente de volumen conocido y lleno de aceite para elevar la presión en su interior en un valor predeterminado.

## 2. MÓDULO DE COMPRESIBILIDAD

El *módulo de compresibilidad*  $\beta$  es la medida de la resistencia del fluido a cambiar de volumen bajo el efecto de la presión. Cuando el cambio de volumen ocurre a temperatura constante, esta medida recibe el nombre de módulo de compresibilidad isotérmico.

**Módulo de compresibilidad isotérmico secante:** Se define como:

•

$$\beta_T = \left| -V_o \frac{p - p_o}{V - V_o} \right|_T \quad (1)$$

Donde  $p_o$  es la presión atmosférica,  $p$  la presión de trabajo,  $V_o$  el volumen del fluido a la presión atmosférica y  $V$  el volumen del fluido a la presión  $p$ .

**Módulo de compresibilidad isotérmico tangente:**

Se define como:

•

$$K_T = -V(\partial p / \partial V)_T \quad (2)$$

Para un sistema compuesto por recipiente con fluido y el aire atrapado en él, se puede determinar un módulo llamado **módulo de compresibilidad efectivo**  $\beta_e$ , que puede calcularse como[4]:

$$\frac{1}{\beta_e} = \left( \frac{V_g}{V_t} \right) \frac{1}{\beta_g} + \frac{1}{\beta_l} + \frac{1}{\beta_r} \quad (3)$$

Donde  $\beta_e$  es el módulo de compresibilidad efectivo,  $\beta_g$  el módulo de compresibilidad del gas (aire) mezclado con el líquido (aceite hidráulico) en forma de burbujas,  $\beta_l$  es el módulo de compresibilidad del líquido y  $\beta_r$  es el módulo de compresibilidad del recipiente.  $V_g$  y  $V_t$  son los volúmenes de aire y volumen total respectivamente.

### 2.1. Módulo de compresibilidad del recipiente.

En la determinación del módulo de compresibilidad del recipiente, es necesario, conocer su cambio de volumen generado por el cambio de presión. Como  $\beta_r = -V_r \frac{\Delta P}{\Delta V}$  y en este caso el recipiente se expande, entonces  $\Delta V$  es positivo, y el módulo de compresibilidad es negativo. Cuando el recipiente es un cilindro cerrado de pared gruesa y se quiere calcular el módulo de compresibilidad con exactitud, es necesario tener en cuenta el desplazamiento radial, la influencia que en el cambio volumétrico genera la presión sobre las tapas del recipiente y la deformación longitudinal sufrida. El valor del módulo está dado por la siguiente ecuación: (4)

$$\beta_r = \frac{r_1^2 \cdot p \cdot l}{\left[ (r_1 + u)^2 - r_1^2 \right] l + (r_1 + u)^2 \Delta l + \frac{\pi \cdot \delta}{6} \left[ \delta^2 + 3 \cdot (r_1 + u)^2 \right]}$$

Donde  $r_1$  es el diámetro interno del recipiente,  $p$  es la presión interna,  $l$  es la longitud del recipiente,  $\Delta l$  el alargamiento longitudinal generado en el recipiente,  $u$  es el desplazamiento radial y  $\delta$  la máxima flecha deformada en las tapas del recipiente. La deformación radial  $u$  está determinada como (5):

$$u = \frac{1 - 2\mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 p_1 - r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_1^2} r + \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_2)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r}$$

$\mu$  es el coeficiente de Poisson del material,  $p_1$  y  $p_2$  las presiones interna y externa,  $r$  el radio de estimación, que en este caso es el radio interno, y  $E$  es el módulo de elasticidad del material.

La flecha máxima correspondiente al centro de la tapa de espesor  $h$  es igual a:

$$\delta = \frac{3 \cdot p_1 \cdot (r_1 + u)^4 (1 - \mu^2)}{16 \cdot E \cdot h^3} \quad (6)$$

El alargamiento longitudinal  $\Delta l$  del recipiente, está dado por:

$$\Delta l = \frac{p \cdot l}{(\pi \cdot r_1)^2 (r_2^2 - r_1^2) E} \quad (7)$$

## 3. MEDIDA DE LA COMPRESIBILIDAD

### 3.1. Selección de la técnica de medida

Para la determinación del módulo de compresibilidad se utilizó un método que se basa en la medida del volumen que debe adicionarse a un recipiente lleno de aceite para alcanzar una presión determinada. Se analizaron diferentes alternativas de generación de la presión y de medida del incremento de volumen, y se optó finalmente por el sistema ilustrado en la figura 1 y conformado por: un recipiente de volumen conocido, una unidad de llenado y bombeo (bomba manual BRAND HP 22SA80), un baño termostático, un transductor de presión Stauff SPT-5000-N04- 420 MD, un transductor de temperatura (STAUFF Minitester PPC 04), válvulas de vías (aguja y apertura rápida), un nivel con escala de volumen y dispositivos de purga y ajuste de caudal. El equipo tiene capacidad trabajar hasta una presión de 5000 psi.

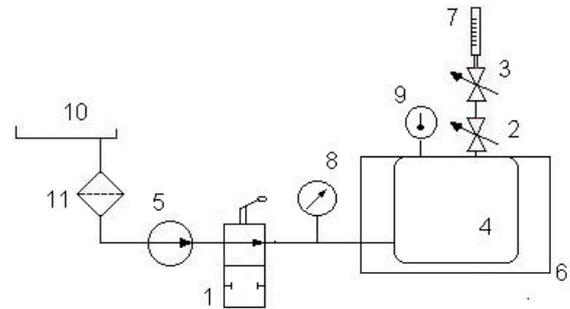


Figura 1. Sistema para medir la compresibilidad de aceites minerales. 1. Válvula de alimentación, 2. Válvula de alivio, 3. Válvula de ajuste de caudal de salida, 4. Recipiente, 5. Bomba manual, 6. baño termostático, 7. Medida de nivel, 8. Transductor de presión, 9. Transductor de temperatura, 10. Tanque, 11. Filtro.

En el diseño del recipiente se tuvieron en cuenta las solicitaciones de esfuerzos y en la selección del equipo y la instrumentación, además de los rangos de presión y temperatura requeridos, se aprovecharon los elementos existentes en el Laboratorio de Sistemas Dinámicos y Control. La figura 2 es una fotografía del aparato construido.

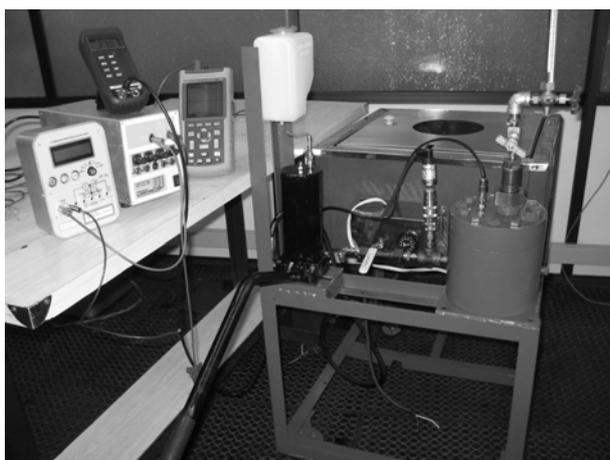


Figura 2. Sistema para medir la compresibilidad isotérmica de aceites minerales

### 3.2 Método de prueba para evaluar el módulo de compresibilidad.

Para asegurar estimados válidos del error experimental y de la media de los datos de los volúmenes obtenidos, las medidas se toman aleatoriamente y con repeticiones para los diferentes niveles de presión, con el fin de mejorar el estimativo del error experimental y la precisión del experimento, reducir la desviación estándar, aumentar el alcance de las conclusiones del proyecto e identificar la variabilidad del error. Estos objetivos son logrados con un mínimo de tres repeticiones por prueba.

La tabla 1 presenta los factores variantes en la prueba y los niveles que adquiere cada factor.

Factores	Niveles
Presión	200, 400, 600...4000
Temperatura	24,40,50,60
Densidad a 15°C	880, 872, 870

Tabla 1. Factores y niveles de experimento

#### 3.2.1. Metodología de prueba.

La determinación del módulo de compresibilidad se realiza a partir de la medida de volumen que la bomba debe agregar al sistema para alcanzar un determinado nivel de presión. Dicho volumen se lee en una columna de nivel calibrada, mediante la manipulación de válvulas de alimentación y descarga. Las acciones realizadas durante todo el proceso son las siguientes: Limpieza del recipiente, llenado del recipiente, purga de aire, ajuste de temperatura del baño termostático, adición de aceite hidráulico y medida del aumento de la presión, medida del volumen agregado y cálculo del módulo de compresibilidad.

Se realizaron pruebas en aceites Shell Tellus 37, 46 y 68, que son aceites hidráulicos muy utilizados en los sistemas comerciales y que presentan densidades diferentes, probados a una temperatura de 24° C y una presión desde 200 hasta 4000 psi, con incrementos de 200 psig. El aceite Tellus 46 se probó también a 30, 40, 50 y 60°C y presiones desde 600 hasta 3000 psi.

## 4. RESULTADOS

De los valores de incremento volumétrico y las expresiones matemáticas enunciadas con anterioridad, se determina el módulo de compresibilidad y se construyen las curvas para los diferentes aceites. En la figura 3 se presenta el comportamiento del módulo de compresibilidad para los aceites Tellus 37, 46 y 68.

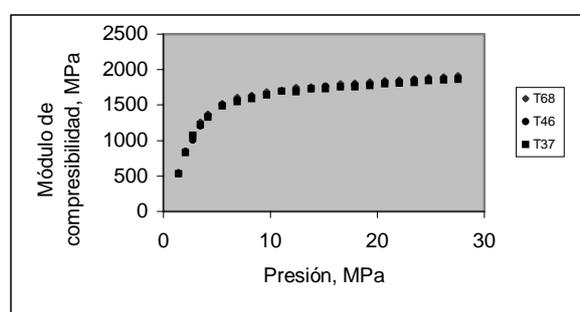


Figura 3. Módulo de compresibilidad del aceite vs presión a 24 °C.

Se observa que a medida que la presión aumenta, es mayor la resistencia que ejerce el aceite hidráulico a ser comprimido, y que el módulo de compresibilidad aumenta con la densidad del fluido. Para el aceite Tellus 68, con mayor densidad, el módulo de compresibilidad es mayor que en los otros dos aceites hidráulicos de menor densidad. En la figura 4 se presenta el comportamiento del módulo con respecto a la densidad del fluido hidráulico a una presión constante de 3000 psig. El factor correlacional  $r = 0,99$  nos indica que existe una fuerte relación lineal entre ambas variables. Para las demás presiones, la línea de tendencia presenta una pendiente similar, y genera una familia de curvas que aumentan de forma ascendente en la medida que la presión aumenta.

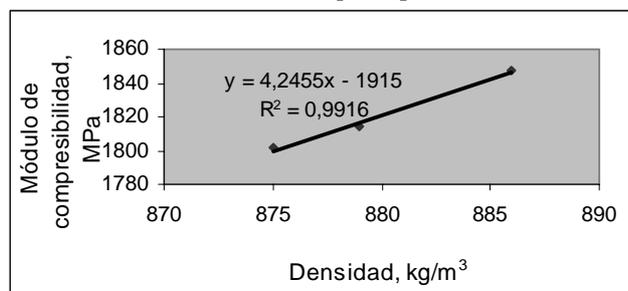


Figura 4. Módulo de compresibilidad vs densidad del aceite.

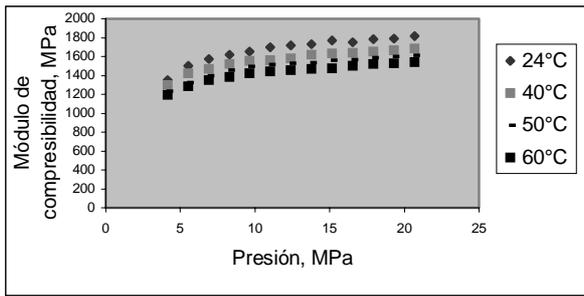


Figura 5. Módulo de compresibilidad del aceite Tellus 46 a diferentes temperaturas.

Otro de los factores influyentes en el comportamiento de la compresibilidad de los aceites hidráulicos es la temperatura. La figura 5 presenta el cambio del módulo de compresibilidad con respecto a las temperaturas de prueba.

La figura 6 presenta la variación del módulo de compresibilidad isotérmico con respecto a la temperatura para una presión constante de 2000 psig. El factor de correlación para la regresión exponencial  $r = 0,99$ , indica una fuerte relación exponencial entre el módulo de compresibilidad isotérmico y la temperatura:

$$\beta = 1975 \cdot e^{-0,00447 \cdot T}$$

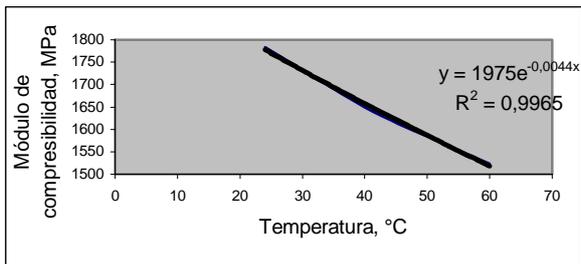


Figura 6. Comportamiento del módulo de compresibilidad con respecto a la temperatura para una presión constante de 2000 psig.

Se presentan también las curvas y regresiones para el cambio de módulo de compresibilidad con respecto a la temperatura a diferentes presiones para el aceite Tellus 46. Estos datos pueden ser consultados para aplicaciones del laboratorio, dado que las unidades hidráulicas de las que se disponen allí funcionan con este aceite.

La predicción del módulo de compresibilidad mediante la norma ISO 6073, permite comparar los resultados obtenidos con el sistema de medida propuesto y con datos experimentales logrados antes de la introducción de la norma.

En la figura 7 se presenta el módulo de compresibilidad obtenido experimentalmente y el determinado mediante la norma ISO 6073 para el aceite hidráulico Tellus 37. Se observa que el módulo de compresibilidad dado por la norma ISO 6073 presenta un comportamiento lineal

respecto a la presión. Sin embargo, el obtenido experimentalmente tiene una tendencia exponencial similar a la del módulo de compresibilidad efectivo

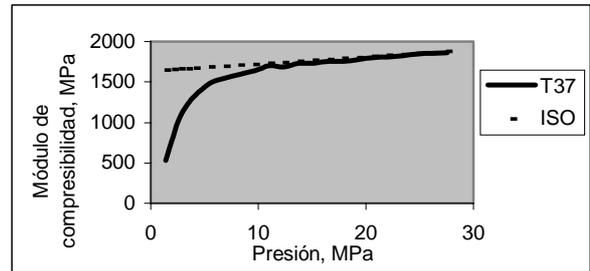


Figura 7. Módulo de compresibilidad experimental e ISO para aceite Tellus 37.

Dado que en los cálculos del módulo de compresibilidad se tuvo en cuenta la deformación del recipiente, la desviación fuerte observada por debajo de una presión cercana a los 10 MPa es debida a la presencia de burbujas de aire en el sistema. La eliminación absoluta del aire en el sistema de medición no pudo lograrse, por dificultades en la obtención de un suficiente vacío para la purga. De acuerdo con la ecuación [2]:

$$\beta_e = \beta_o \left[ \frac{S_o + \frac{P}{P_o}}{\frac{S_o \cdot \beta_o}{P} + \frac{P}{P_o}} \right] \quad (8)$$

Es posible determinar la relación  $S_o$  (relación aire/aceite a presión atmosférica) utilizando el valor del módulo de compresibilidad para el aceite dado por la norma ISO 6073. Al determinar el valor de  $S_o$  a presión 0 psig (presión atmosférica), se obtiene 2,7% de aire por volumen para el aceite Tellus 68. Esto indica que el sistema contenía  $22,03 \text{ cm}^3$  de aire.

Se puede usar la expresión  $\frac{\rho}{\rho_o} = 1 - \frac{P}{\beta}$  para calcular la

densidad del aceite a presión y temperatura dadas a partir de datos experimentales del módulo de compresibilidad. La figura 8 presenta los resultados de este proceso para los rangos de presión manejados.

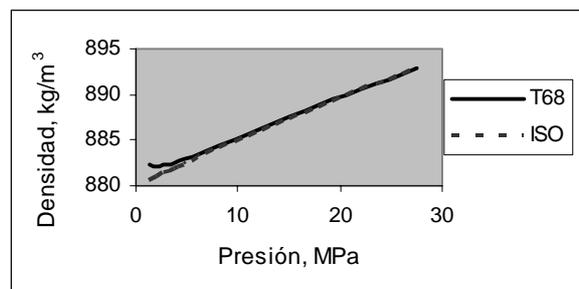


Figura 8. Densidad vs presión experimental e ISO para el aceite Tellus 68.

A diferencia del módulo de compresibilidad, la densidad no presenta diferencias tan radicales respecto a los valores encontradas por la norma ISO 6073. Esto indica que la presencia de aire no es tan influyente en el valor de la densidad, como sí lo son la presión y la temperatura.

Al realizar un análisis de regresión a la curva de densidad vs presión a temperatura constante para el aceite Tellus 68 (figura 9), se obtiene una curva de ajuste polinomial de segundo grado.

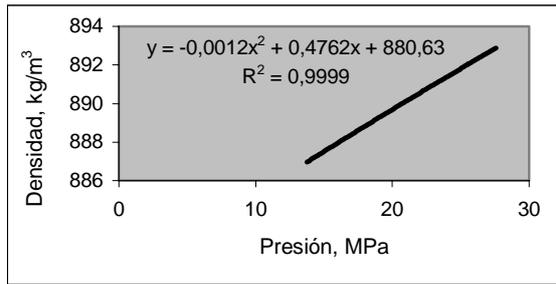


Figura 9. Curva de regresión para los datos de densidad vs presión obtenidos experimentalmente para el aceite Shell Tellus 68 (temperatura T= 24 °C ).

La densidad en función de la presión puede expresarse de manera aproximada como  $\rho = \rho_0(1 + a \cdot p + b \cdot p^2)$ . a y b son constantes empíricas que pueden determinarse con la fórmula de regresión. Para el caso del aceite Shell Tellus 68 (temperatura T= 24°C ), toman valores de  $a = \frac{0,4762}{\rho_0}$  y  $b = -\frac{0,0012}{\rho_0}$ .

De igual manera la densidad en función de la temperatura, puede expresarse aproximadamente como  $\rho = \rho_0(1 - \alpha \cdot \Delta T)$ , donde  $\alpha$  depende del fluido. Para las curvas de densidad contra temperatura obtenidas experimentalmente se tiene que:

$$\rho = \rho_0 \left( 1 - \frac{0,6602}{\rho_0} \Delta T \right) \quad \text{donde } \Delta T = T - T_0 \text{ en } ^\circ\text{C}$$

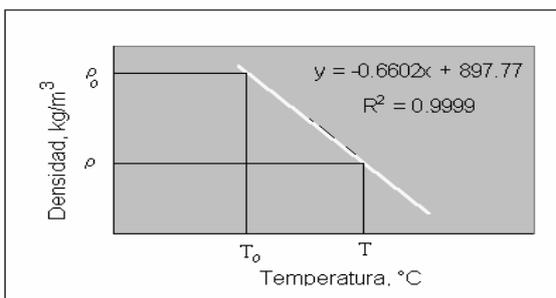


Figura 10. Análisis de regresión para la densidad como función de la temperatura para el aceite Tellus 46 a 2600 psig.

Comparando ésta con la expresión anterior, se tiene que para el aceite probado Tellus 46  $\alpha = \frac{0,6602}{\rho_0}$  a una

presión constante de 2600 psig. y  $\alpha = 7,5 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$  (figura 10).

El análisis estadístico del conjunto de muestras tomadas (324 en total) revela una desviación estándar  $\sigma = 0,079$  y una incertidumbre total  $\mu = 0,035 \text{ cm}^3$  para la medida de volumen adicionado. No se hizo cálculo del error porque se comprobó que el sistema contiene burbujas de aire en un porcentaje que depende de la presión y que afecta drásticamente el módulo de compresibilidad.

Con el fin de sistematizar los datos obtenidos, se elaboró un programa computacional que permite, además de calcular el módulo de compresibilidad de los aceites a la temperatura de prueba, comparar los resultados con la norma ISO 6073.

### 5. CONCLUSIONES.

Se ha presentado el concepto de módulo de compresibilidad y se han explorado los posibles métodos de medición de dicho parámetro de los fluidos. Parte importante del trabajo se refiere a la construcción de un sistema que permite medir el módulo de compresibilidad isotérmica de aceites minerales comerciales utilizados en sistemas de potencia fluida.

Este proyecto ha servido para analizar la influencia de la compresibilidad sobre la respuesta transitoria y en frecuencia en sistemas óleo-hidráulicos, y su importancia como parámetro de selección de los aceites utilizados en sistemas de potencia fluida.

De las curvas obtenidas para el coeficiente de compresibilidad como función de la presión, se concluye la importancia de extraer completamente del aceite las burbujas de aire. El porcentaje promedio estimado de aire a presión atmosférica fue del orden de 2,55 %, a pesar del rigor aplicado en la purga del sistema. Con los medios disponibles en el laboratorio es difícil alcanzar una extracción de aire mayor que la alcanzada. La consecución de una bomba de vacío sería una medida de optimización de la purga de aire para el sistema construido, debido a que al purgar a una presión menor, las burbujas de aire que aún puedan llegar a quedar atrapadas se disuelven en el aceite al aumentar la presión (a mayor presión más solubilidad del aire en el aceite) hasta la atmosférica y el sistema quedaría libre de burbujas de aire.

A pesar de la enorme influencia comprobada de las burbujas de aire en el aceite en el valor del módulo de compresibilidad, las curvas experimentales obtenidas son similares a las determinadas por la norma ISO 6073 para presiones superiores a 2000 psig (14 MPa), por lo tanto, el sistema de medida de la compresibilidad propuesto es viable para presiones por encima de este valor, justo para

presiones de operación de sistemas de control rápidos y de altas potencias.

El análisis de los datos obtenidos experimentalmente y su comparación con la norma ISO 6073 sugieren la posibilidad de construir, con base en el aparato desarrollado en este proyecto, un sistema que permita medir la cantidad de aire en forma de burbujas dentro del aceite a presión. Se recomienda trabajo posterior en este sentido para evaluar dicho parámetro.

Resultados importantes obtenidos a partir de las pruebas realizadas son diferentes curvas de cambio en la densidad con respecto a la temperatura y la presión, que pueden ser consultadas para su utilización en sistemas reales. De allí, se pueden determinar las constantes que predicen el comportamiento de la densidad con la presión a temperatura constante y la densidad con la temperatura a diferentes niveles de presión constante (no sólo la atmosférica, como se encuentra en la literatura).

El sistema desarrollado puede ser utilizado con otros fluidos, como los combustibles minerales y biodiesel, para los cuales el coeficiente de compresibilidad es relevante, por su influencia en parámetros de proceso como el tiempo y duración de la inyección.

Otra actividad importante del proyecto fue la creación de una herramienta computacional que permite visualizar las curvas del coeficiente de compresibilidad vs. presión para los datos obtenidos experimentalmente y compararlas con la norma ISO 6073. Además, el programa puede ser utilizado como ayuda didáctica en el área de hidráulica y potencia fluida, pues permite observar la influencia que variables como la presión, la temperatura y la cantidad de aire en el sistema, tienen sobre el coeficiente de compresibilidad y la densidad del fluido.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer al Centro de Investigaciones y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira por la financiación y el apoyo brindado en la realización de este proyecto.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMERICAN NATIONAL STANDARD. ASTM D 6793 – 02. Standard Test Method for Determination of Isothermal Secant and Tangent Bulk Modulus, ASTM International, USA, 2002.
- [2] CHO B., LEE H., OH J. Estimation technique of air content in automatic transmission fluid by measuring effective bulk modulus. International Journal of Automotive Technology Vol 3 No 2,

2002, pp 57-61.

- [3] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 6073: Prediction of bulk moduli of petroleum fluids used in hydraulic fluid power systems. 2a edición, ISO, Suiza, 1997
- [4] McCLOY D. and MARTÍN H.R. Control of Fluid Power: Analysis and Design. 2ª edición. Ellis Hoorwood, 1980.
- [5] MEJIA L. y HOYOS M. Propuesta para la Construcción de un Sistema de Medida de la Compresibilidad Isotérmica de los Aceites Minerales. Revista Scientia et Técnica No 20, Universidad Tecnológica de Pereira, octubre de 2002.
- [6] PISARENKO G. S. Manual de resistencia de materiales. Editorial Mi, Moscú, 1979.