

Estudio de la Fuerza sobre la Biela del Distribuidor para la Determinación del Torque en la Paleta de una Turbina Hidroeléctrica

Pablo J. Angermeier^{a,b*}, Roberto N. Schuster^b, Facundo E. Gonzalez^{a,b}, Gabriel A. Tarnowski^{a,b}

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b Centro de Estudios de Energía para el Desarrollo (CEED), Laboratorio de Simulación Numérica y Ensayo Mecánicos (LABSE), FIO-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: pabloangermeier539@gmail.com, schusterrobertonicolas@gmail.com, fakgonzalez@gmail.com, gabriel.tarnowski@gmail.com

Resumen

En el presente artículo se describen dos metodologías para el cálculo del torque en la paleta de distribuidor de una turbina hidroeléctrica por medio de la fuerza aplicada en la biela del mismo, siendo esta última obtenida mediante sensores de deformación instalados en la biela. La primera metodología planteada consiste en encontrar dicha relación por medio de un análisis experimental, mientras que la segunda metodología se basa en aproximar al sistema a uno de cuatro barras. Los resultados obtenidos fueron comparados con el torque medido en el eje de la paleta del distribuidor.

Palabras Clave – Biela de distribuidor, Deformación, Fuerza, Paleta de distribuidor, Sistema de cuatro barras, Strain gages, Torque.

1. Introducción

Ante la necesidad de conocer el torque aplicado en el eje de la paleta de distribuidor de una turbina hidroeléctrica, se presenta la dificultad en la instalación de los sensores de deformación, Strain Gages, debido al difícil acceso y el acotado espacio que se dispone en la zona donde se deben instalar los mismos. Además, al ser la construcción de esta pieza mediante forja sin mecanizado posterior, la terminación de la misma no es un cilindro perfecto, dificultando así el cálculo del torque aplicado a partir de la deformación que se produce en el eje. Debido a esto se plantea la necesidad de estudiar la posibilidad de cálculo del torque en la paleta del distribuidor mediante la fuerza aplicada en la biela, cuyo acceso es más simple, se tiene un mejor espacio de trabajo y la geometría de la pieza presenta una terminación acorde al necesario para realizar las mediciones.

Con este planteo se encara el problema desde dos perspectivas diferentes, una experimental utilizando un modelo de sistema de paletas de distribuidor plasmado en un software de dibujo 3D, el cual permitió variar la posición de las paletas y medir el ángulo que se formaba. Y otra analítica en la cual se considera al sistema como un sistema de cuatro barras [1] y se obtiene mediante ecuaciones el ángulo buscado.

2. Desarrollo

A partir de tener el sistema de paletas de distribuidor plasmado en un dibujo 3D, como se muestra en la Fig. 1, nos centramos en el estudio de una sola de ellas (Fig. 2) dado que el desarrollo es el mismo para las demás. Por tanto, se procede a encontrar la relación que existe entre la biela y

*Pablo J. Angermeier.

la paleta distribuidor, por lo cual se toma un eje de referencia que conecta el eje de rotación del anillo con el centro de rotación de la paleta de distribuidor en estudio.

Debido a que los datos de posición de paleta de distribuidor con los que se cuentan están plasmados en porcentaje, en primer lugar, se debe determinar la relación que existe entre la posición en ángulo y en porcentaje. Para ello, conociendo los ángulos que toma la paleta para un porcentaje de apertura de 0% (totalmente cerrado) y 100% (totalmente abierto) es posible determinar la siguiente ecuación que relaciona el ángulo de la paleta x con el porcentaje y .

$$y = -0,0187x + 1,5789 \quad (1)$$

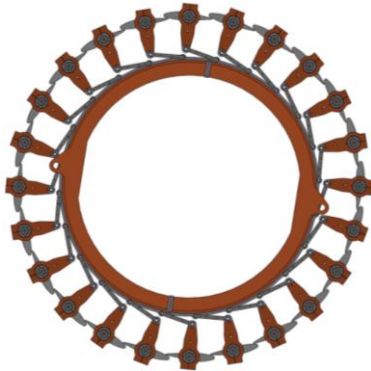


Fig. 1. Sistema de regulación.

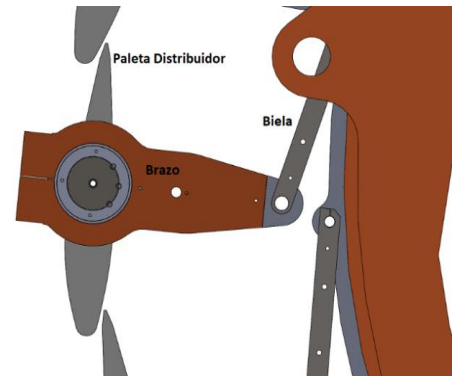


Fig. 2. Paleta Distribuidor en estudio.

A continuación, se procede a describir los dos métodos utilizados para la determinación de la relación entre la posición de la paleta con el de la biela.

2.1. Método Experimental

Con este método, lo que se busca es obtener de manera experimental la relación entre la posición de la paleta de distribuidor con la posición de la biela. Con la referencia establecida se midió el ángulo de la biela para distintos porcentajes de aperturas de la paleta de distribuidor, con estas mediciones se procede a trazar un gráfico (Fig. 3 Fig. 3. Relación angular de la Biela con la Paleta de Distribuidor.) que relaciona el porcentaje de apertura de la paleta de distribuidor (eje x) y la diferencia de ángulos que existe entre la paleta de distribuidor y la biela (eje y).

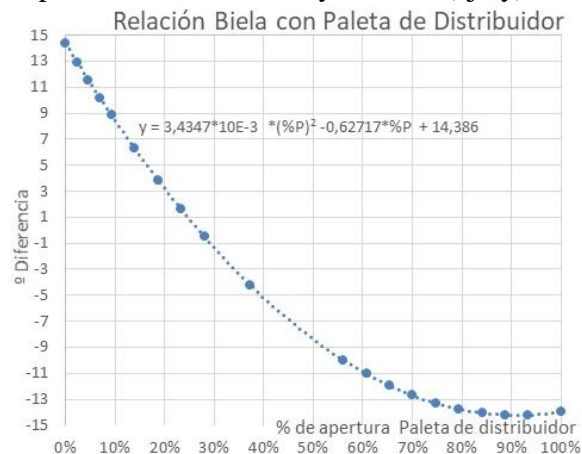


Fig. 3. Relación angular de la Biela con la Paleta de Distribuidor.

De esta manera con un porcentaje conocido de apertura de la paleta de distribuidor podemos determinar la relación entre la fuerza y el torque como se muestra en (2).

$$T = F_{\perp} * D_B \quad (2)$$

Siendo T el torque en la paleta de distribuidor, F_{\perp} la fuerza perpendicular al brazo que sostiene a la biela y D_B una distancia conocida que existe entre la paleta de distribuidor y el punto de aplicación de la fuerza.

Como se muestra en la Fig. 3 es posible obtener una curva que se aproxime a los puntos medidos, con lo cual se obtiene (3) que determina la diferencia de ángulos con solo conocer el porcentaje de apertura de la paleta de distribuidor.

$$^{\circ}Diferencia = 3.4347 * 10^{-3} * (%P)^2 - 0.62717 * (%P) + 14.386 \quad (3)$$

Introduciendo (4) en (5), se obtiene (6) con el cual es posible calcular el torque en el eje de la paleta de distribuidor en función del porcentaje de apertura de la paleta de distribuidor y la fuerza a la que está sometida la biela.

$$T = F_{Biela} * \cos(3.4347 * 10^{-3} * (%P)^2 - 0.62717 * (%P) + 14.386) * 1.1 \quad (6)$$

2.2. Método Analítico - Sistema de 4 Barras

A partir del sistema que se muestra en la Fig. 1, se procede a llevarlo a un sistema de 4 barras como se muestra en la Fig. 4, donde el conjunto paleta de distribuidor y brazo que llevan una relación de perpendicularidad entre ellos puede tomarse como la segunda barra, mientras que la biela donde se llevan a cabo las mediciones de deformación puede tomarse como la tercera barra, siendo el anillo el lugar donde están montadas todas las bielas y el centro de rotación de este puede tomarse como la cuarta barra, quedando así la última barra del sistema que es la denominada chasis que une el centro de rotación del anillo y el centro de rotación de la paleta de distribuidor.

Para la determinación de la posición angular de la biela con respecto a una posición determinada de la paleta de distribuidor se debe realizar unos cálculos previos con las ecuaciones que se expresan a continuación.

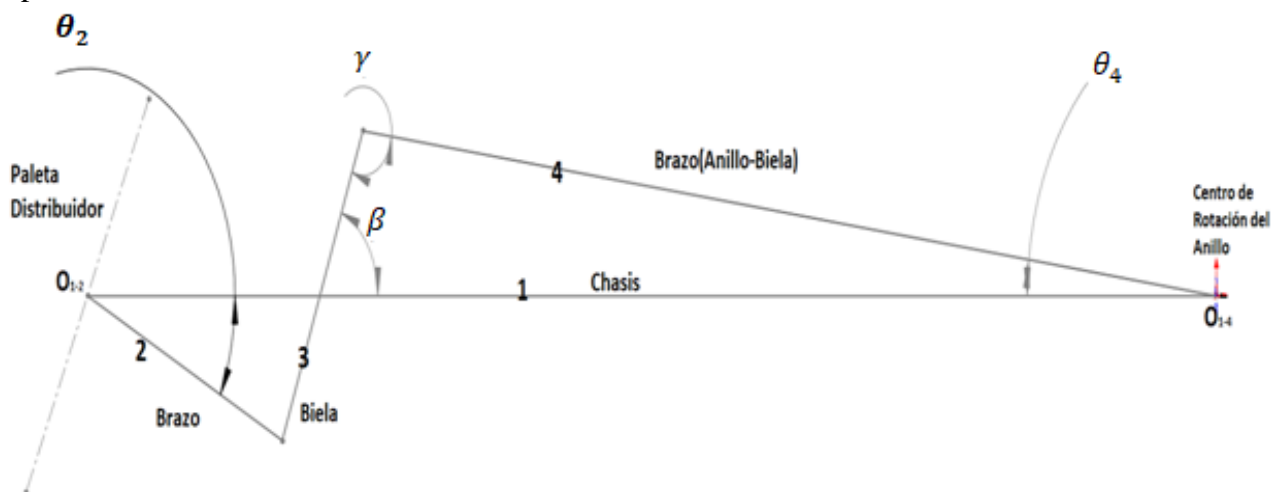


Fig. 4. Sistema idealizado.

Se determina el ángulo del brazo con respecto a la referencia tomada, por lo mencionado anteriormente se sabe que entre el brazo y la paleta de distribuidor guardan una relación de perpendicularidad, por lo tanto, el ángulo del brazo es:

$$\theta_2 = 90^\circ - x \quad (7)$$

Posteriormente se determina la distancia Z que está relacionada con la distancia al cuadrado de la barra 1 y 2, como se muestra en (8)

$$Z^2 = R_1^2 + R_2^2 - 2 * R_1 * R_2 * \cos(\theta_2) \quad (8)$$

Donde R_1 es la longitud del chasis, R_2 la longitud del brazo que corresponde a la barra 2, R_3 es la longitud de la biela donde se miden las deformaciones y R_4 la longitud de la barra 4, siendo estos valores todos constantes y conocidos.

Luego se calcula con (9) el ángulo α que relaciona la barra 4 con la dirección de Z , con (10) se determina el ángulo φ que relaciona la barra 1(chasis) con la dirección de Z , siendo todos estos ángulos menores a 180° .

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{Z^2 + R_4^2 - R_3^2}{2 * Z * R_4} \right) \quad (9)$$

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{Z^2 + R_1^2 - R_2^2}{2 * Z * R_1} \right) \quad (10)$$

Para determinar el ángulo entre la barra 1(chasis) y la barra 4 se realiza la diferencia de ángulos calculado con (9) y (10).

$$\theta_4 = \alpha - \varphi \quad (11)$$

Posteriormente es necesario determinar el menor ángulo entre las barras 3 y 4, para ello se utiliza (12) como se presenta en [1].

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{Z^2 - R_4^2 - R_1^2}{-2 * R_4 * R_1} \right) \quad (12)$$

Como se observa en la Fig. 4 las barras 1 (chasis), 3 y 4 forman un triangulo donde la suma de sus ángulos internos es de 180° , de esta manera se determina el ángulo β .

$$\beta = 180^\circ - \gamma - \theta_4 \quad (13)$$

Una vez determinados los ángulos y distancias mencionadas anteriormente estamos en condiciones de determinar la diferencia de ángulos entre la paleta de distribuidor y la biela.

$$^\circ\text{Diferencia de ángulos} = \theta_2 + 90^\circ - \beta \quad (14)$$

Conocida la diferencia de ángulos se procede a calcular el torque en la paleta de distribuidor.

$$T = F_{Biela} * \cos(^\circ\text{Diferencia de ángulos}) * 1.1 \quad (15)$$

2.3.Comparación entre los métodos

A continuación se procede a comparar los resultados obtenidos entre los dos metodos de calculo, para ello se toma como ejemplo un porcentaje de apertura igual a 75%.

En el caso del análisis experimental el cálculo del torque es simple, debido a que solo basta con reemplazar el porcentaje de apertura de la paleta de distribuidor y la fuerza en la biela en (6), obteniendo así un valor de torque igual a:

$$T = F_{Biela} * 1,070364 \quad (16)$$

En el caso del sistema de 4 barras la metodología de cálculo es un poco más compleja debido a la necesidad de calculos previos. Como primer paso se debe determinar el ángulo de la paleta de distribuidor, para ello se utiliza (17) obteniéndose así un ángulo de apertura de 44,33°, luego se determina el ángulo del brazo utilizando (7) con lo cual se obtiene un ángulo del brazo de 45,67°.

De esta manera estamos en condiciones de calcular las distancias de Z^2 y Z con (8).

$$Z^2 = 25.353.768,97 \quad Z = 5.035,25$$

Determinando el ángulo α con (9) y φ con (10), pudiendo así determinar θ_4 utilizando (11) .

$$\alpha = 10,76^\circ \quad \varphi = 8,99^\circ \quad \theta_4 = 1,77^\circ$$

Posteriormente se procede a calcular γ con (12) obteniéndose un ángulo de 121,32°, de esta manera calculamos β el ángulo de la biela con (13), siendo el ángulo de 56,91°, y por último la diferencia de ángulo entre la paleta de distribuidor y la biela se calcula con (14), el cual da como resultado -12,58°.

Una vez realizados todos los cálculos anteriormente mencionados se puede decir que estamos en condiciones de calcular el torque en la paleta de distribuidor y nos quedaría en función de la fuerza de la biela quedando de la siguiente manera.

$$T = F_{Biela} * 1.073592$$

Si tomamos el factor que se le multiplica a la fuerza como una variable k que esta en funcion del angulo de apertura de la paleta distribuidor podemos calcular el error entre los metodos, tomando como valor verdadero el del sistema de 4 barras se obtiene:

$$e\% = \frac{k_{Sist\ 4\ Barras} - k_{Experimental}}{k_{Sist\ 4\ Barras}} * 100 = \frac{1,073592 - 1,070364}{1,073592} * 100 = 0,3\%$$

Realizando el mismo análisis entre los métodos con diferentes porcentajes de apertura se observan resultados similares, con errores menores al uno.

3. Resultados Comparativos entre el Torque Medido y el Calculado

A partir de los datos de fuerza en la biela, torque en el eje de la paleta de distribuidor y porcentaje de apertura del mismo, los cuales fueron obtenidos de un ensayo realizado, se procede a calcular el torque en el eje de la paleta de distribuidor con los datos de fuerza y de porcentaje de apertura por medio del método experimental ya que el mismo es de fácil aplicación y no presenta errores de consideración frente al método analítico. Una vez aplicado el método experimental se procede a comparar el torque calculado con el medido por medio de deformaciones. Ya que en el ensayo se contaban con muchos datos se procedió a graficarlos en dos partes.

En la primera parte (Fig. 5) se aprecia que el torque calculado se encuentra por debajo del medido, presentando a simple vista dinámicas similares entre.

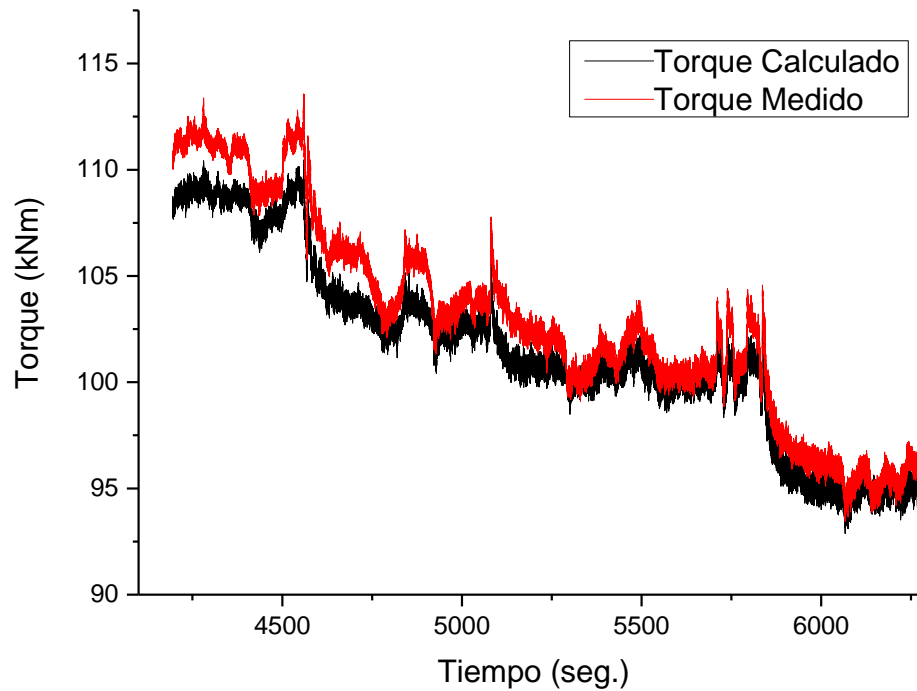


Fig. 5. Torque parte 1(Medido-Calculado)

En la Fig. 6 se presenta el error que se tiene al utilizar este método para el cálculo, el cual no supera los 3,5% durante esta etapa del ensayo.

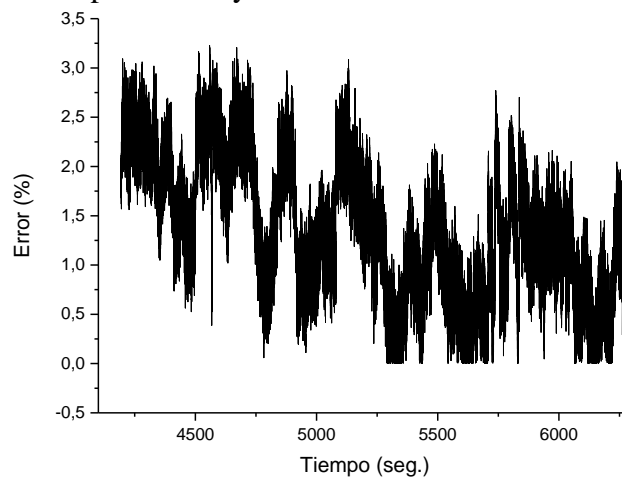


Fig. 6. Error del Torque (Medido-Calculado) Primera parte.

A continuación, se presenta en la Fig. 7 la segunda parte del ensayo, donde se puede apreciar las mismas características vistas en la primera parte.

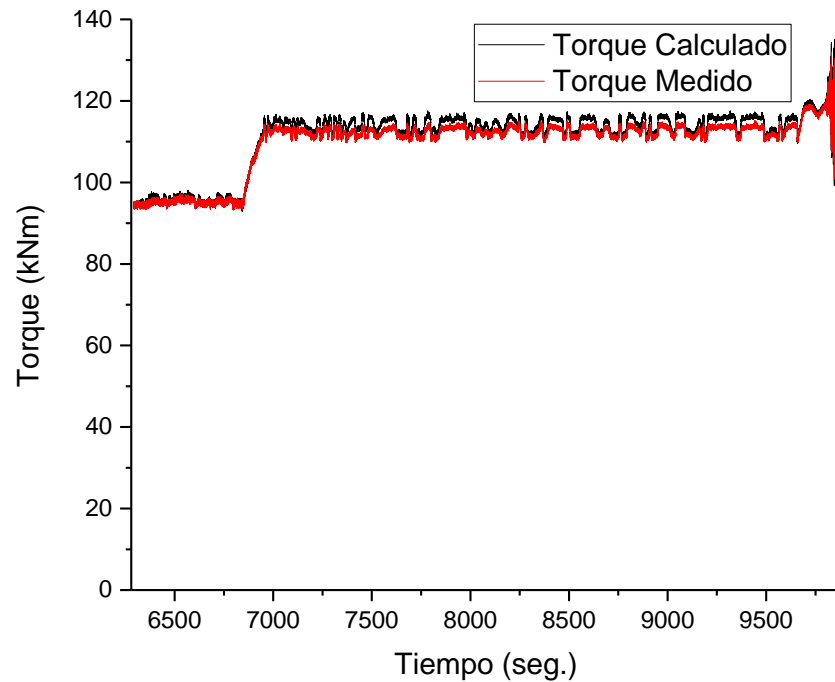


Fig. 7. Torque parte 2(Medido-Calculado)

En las Fig. 8 y Fig. 9 se puede apreciar que el error entre el torque calculado y el medido se mantiene con un máximo del 3,5%. Salvo por el pico al final de la Fig. 8 el cual se debe a que para toda esta etapa del ensayo se considera un porcentaje de apertura constante, y como se puede observar en el torque medido de la Fig. 7 al final este se reduce abruptamente lo que significa que la apertura de las paletas cambio de valor lo que no está contemplado en el torque calculado.

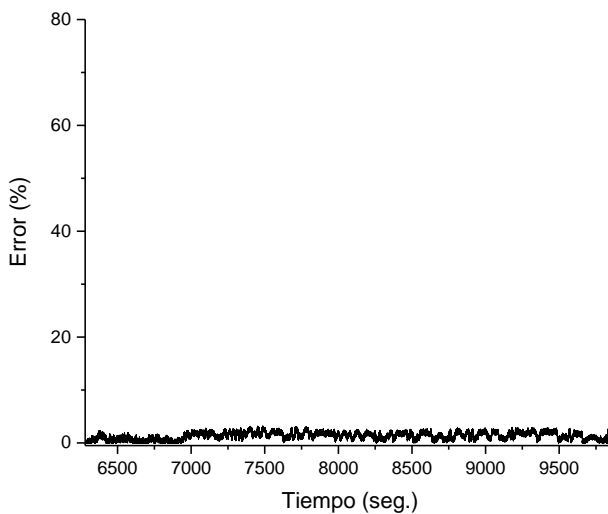


Fig. 8. Error del Torque (Medido-Calculado) Segunda parte.

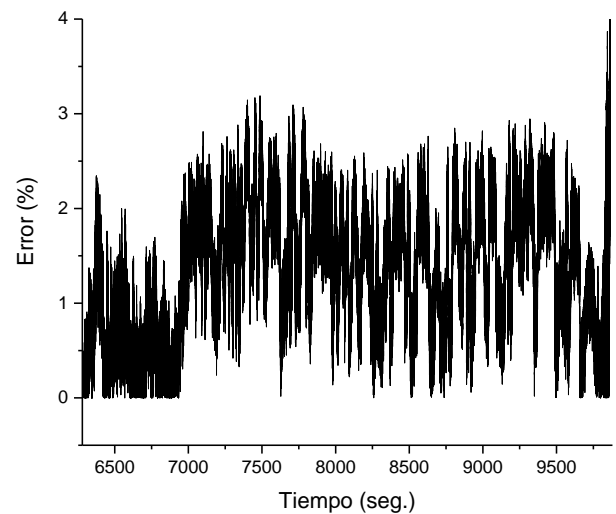


Fig. 9. Acercamiento sobre la sección inferior del gráfico de error de la Fig. 8.

4. Conclusión

El estudio realizado nos permitió encontrar dos metodologías distintas para el cálculo del torque en el eje de la paleta de distribuidor, con solo utilizar la fuerza a la que está sometida la biela y el porcentaje de apertura de la paleta.

La diferencia obtenida entre los dos métodos fue menor al 1%, lo que hace indistinto el uso de uno u otro. Sin embargo, el método experimental presenta una mayor facilidad de cálculo debido a que solo es necesario el uso de una ecuación.

Al calcular el torque, con cualquiera de los dos métodos los resultados obtenidos presentaron durante el ensayo errores por debajo del 4%. Y teniendo en consideración que la instalación de los sensores en el eje de la paleta de distribuidor es un procedimiento con elevada dificultad por la ubicación y espacio disponible, y la geometría del mismo no es cilíndrica perfecta. Por lo tanto, el cálculo indirecto del torque a partir de la fuerza aplicada en la biela utilizando cualquiera de estas metodologías es razonable.

Referencias

- [1] CINEMATICA DE LAS MAQUINAS, Ing. ARTURO CASTILLO RAMIREZ, UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS DE POTOSÍ, ENERO 2005.