

## MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LA MAGNITUD DE LAS FUERZAS REACTIVAS EN LOS APOYOS DE LAS MAZAS DEL MOLINO PANELERO APOLO 5.

### EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF MAGNITUDE REACTIVE FORCES IN MACE SUPPORTS OF PANELA MILL APOLO 5.

Juan Fernando Ramírez Patiño<sup>1</sup> y Manuel Leandro Herrera Arango<sup>2</sup>

**Resumen.** La producción de panela en Colombia es una actividad a la que se dedican miles de campesinos, en la cual basan su economía y sustento y la cual lleva décadas sin ningún tipo de avance tecnológico en la maquinaria y las diferentes etapas del proceso de producción de la misma. En específico la maquinaria usada para la extracción de jugo de caña se basa en tecnología de más de 100 años, en la que no se han hecho mayores esfuerzos por su mejoramiento, quizá debido al desconocimiento de las variables implicadas en el proceso de extracción y su influencia sobre las fuerzas y esfuerzos que se generan sobre las cureñas de los molinos, lo cual dificulta el mejoramiento de éstas desde el punto de vista de la forma, materiales y dimensiones. En este trabajo se presenta el desarrollo experimental para la medición de las fuerzas reactivas en los apoyos de los ejes de las mazas del molino panelero marca Apolo 5. Se incluyen la correcta selección de los puntos de medición en el molino, la elección de la técnica de medición y el diseño de los dispositivos para la medición, así como el procedimiento a seguir para la instrumentación del molino. Los resultados obtenidos permiten identificar las zonas en las cureñas y en los ejes donde se aplican las máximas fuerzas.

**Palabras claves:** Molino Panelero, panela, celda de carga, fuerzas.

**Abstract.** The panela production in Colombia is an activity for thousands of farmers in which base their economy and sustenance and in which technology takes decades without any type of technological advance in machinery and different stages of production process in the same one. Specifically the machinery used for the extraction of cane juice is based on technology of more than 100 years with few efforts for its improvement, maybe due to ignorance of the implied variables in the extraction process and its influence on forces and stresses that are generated on mill cureñas, which makes difficult the improvement of these from the point of view of form, materials and dimensions. This work shows the experimental development for measurement of reactive forces in supports of mace shafts in Panelero mill - Apolo 5. This includes the correct selection of measurement points in mill, the election of measurement technique and design of devices for measurement, as well as the procedure to follow for mill instrumentation. The obtained results allow to identifying the cureñas zone and shafts where the forces are maximum.

**Key words:** Panela mill, panela, load sensor, forces.

La falta de conocimiento efectivo de las cargas a las que se encuentra sometida la estructura de un molino panelero durante su funcionamiento ha imposibilitado su mejoramiento, en particular en lo relativo a los materiales para su construcción, la forma y dimensiones de los mismos. Como resultado de esto, los diseños actuales de los molinos datan de hace más de 100 años, sin cambios o modificaciones representativas (Cano, 2004). La importancia de este

trabajo radica en la posibilidad de conocer la magnitud de las fuerzas que se generan en el proceso de extracción del jugo de caña mediante los molinos paneleros bajo condiciones normales de operación, establecidas éstas por el operario del molino. Con este conocimiento será posible más adelante realizar la evaluación de los diversos diseños actuales y desarrollar nuevas propuestas que conduzcan al mejoramiento y reducción del

<sup>1</sup> Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. A.A. 1027, Medellín, Colombia. <jframirp@unalmed.edu.co>

<sup>2</sup> Estudiante de Ingeniería Mecánica – Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. A.A. 1027, Medellín, Colombia. <mlherrera@unalmed.edu.co>

Recibido: Febrero 16 de 2007; aprobado: Marzo 4 de 2008.

costo de producción de los mismos, lo que posibilitará el acceso a estas máquinas de potenciales productores de panela y otros productos derivados del jugo de caña de azúcar. Adicionalmente se abre la puerta a un frente de investigación que permita determinar la variación de las fuerzas reactivas respecto a variables de entrada del proceso de molienda como lo son la abertura o separación de las mazas, preparación de caña, cantidad de caña alimentada, variedad de caña, madurez de la caña, etc.

Es así que el objetivo general de este trabajo fue cuantificar las fuerzas reactivas en las cureñas de un molino panelero Apolo 5 bajo condiciones normales de operación, es decir, aquellas que su operario considere como adecuadas, puesto que es el quien conoce su desempeño y correcta operación.

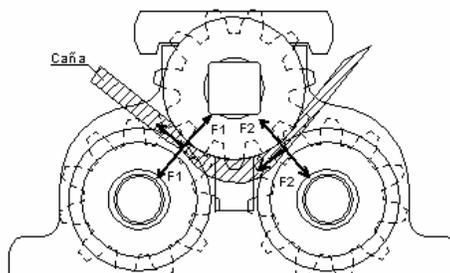
## MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del trabajo, éste se dividió en cuatro partes; selección de los puntos de medición, selección de la técnica de medición, diseño de los dispositivos de medición y procedimiento a seguir para la instrumentación del molino. Estos cuatro frentes se manejaron de manera conjunta teniendo en cuenta la relación estrecha entre cada uno de ellos.

**Selección de los puntos de medición.** Para la selección de los puntos de medición se partió de la determinación del flujo de fuerzas en el molino, con lo cual se identificaron los puntos por donde las fuerzas se transmiten de un elemento a otro, para esto se comienza observando que las fuerzas se generan en el momento en el que el molino se enciende y se obtiene un par disponible para realizar trabajo, el cual es usado en el momento en el que la caña se introduce en el primer par de mazas (par quebrador).

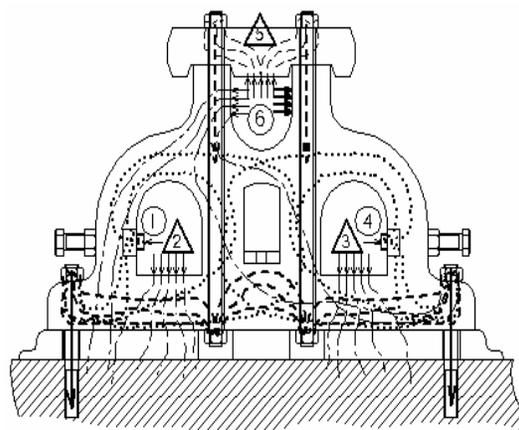
En la Figura 1 se presenta un esquema de las fuerzas que se producen durante el proceso de compresión de la caña para la extracción de jugo. Las fuerzas que no se han rotulado en esta misma figura corresponden a las fuerzas de fricción entre la caña y la superficie de las mazas, estas fuerzas generan una resistencia al avance de la caña la cual es vencida por el par disponible del motor.

Las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  anteriormente descritas, se transmiten a través del eje hacia la cureña por medio de los apoyos, para luego llegar hasta los pernos de anclaje tal como lo presenta la Figura 2.



**Figura 1.** Fuerzas generadas durante la compresión de la caña, en un molino panelero Apolo 5.

De lo anterior se deriva que los puntos más adecuados y representativos para la medición de la magnitud de las fuerzas reactivas en los apoyos de los ejes de las mazas del molino, que al mismo tiempo corresponden a los puntos de ubicación de las fuerzas activas que entran en la cureña, son los puntos marcados en la Figura 2 con números del uno al seis y encerrados en círculos para las fuerzas horizontales y triángulos para las verticales. En estos puntos marcados las fuerzas que se generan durante la extracción del jugo de caña pasan de los ejes a las cureñas cruzando a través de los apoyos. En cada punto se colocó un elemento de medición entre la cureña y el apoyo, para que el flujo de fuerzas que viene de la compresión de la caña, cruce a través de estos hacia la cureña y así poder medir las fuerzas de interés.



**Figura 2.** Flujo de fuerzas a través de la cureña, en un molino panelero Apolo 5.

**Selección de la técnica de medición.** Para la selección de la técnica de medición se tomó en cuenta que en los puntos seleccionados se deben colocar elementos que permitan el flujo normal de las fuerzas pero que a la vez posibiliten la correcta medición de la magnitud y variación en el tiempo de tales fuerzas, lo cual básicamente restringe el panorama al uso de celdas de carga (Rally y Riley, 1978). Para ello se usaron celdas de cargas diseñadas y construidas en el Laboratorio de Diagnóstico de Maquinaria de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, las cuales funcionan con base en extensometría eléctrica y deben cumplir las especificaciones previamente definidas por Herrera (2006).

### **Diseño de los dispositivos de medición**

**Requerimientos de diseño.** El dispositivo debe tener una sensibilidad de por lo menos 200N (parámetro definidos por el diseñador).

- La altura de los dispositivos no debe ser inferior a 15 mm para permitir la instalación de las galgas y un máximo definido por las características geométricas del molino.
- Que la carga máxima aplicada genere un esfuerzo que no supere el límite elástico del material del dispositivo.

### **Restricciones de diseño**

- Las cureñas del molino no pueden ser modificadas por ningún motivo.
- El elemento colocado no debe interferir con el normal funcionamiento del molino.
- Los apoyos de bronce pueden ser modificados sólo en las caras planas.
- El material disponible para la fabricación de las celdas de carga es el acero AISI 1020, cold rolled.

**Dimensionamiento del cilindro para la construcción de la celda.** Para estimar la máxima carga teórica que debe soportar la celda se partió de los valores teóricos presentados por Cano (2004), de donde se puede decir que el molino mas parecido al Apolo 5 es el Amaga 11D para el cual Cano (2004)

presenta una carga máxima teórica aproximada de 25KN. Como este valor es un valor teórico que no ha sido validado experimentalmente, se asume que la carga máxima que debe soportar la celda es de 40KN, es decir se introduce un factor de seguridad de 1,6.

Con base en la teoría de la elasticidad (Goncalves (2002), establece la Ecuación 1 que define el esfuerzo normal como:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde:

- $\sigma$ : Esfuerzo producido
- $F$ : Fuerza aplicada sobre el elemento
- $A$ : Área de la sección transversal perpendicular a la dirección de aplicación de la carga

y según (Matweb, 2006) las propiedades del material AISI 1020 steel, cold rolled son:

$$\begin{aligned} E &= 205 \text{ GPa} \\ S_y &= 250 \text{ MPa} \\ \nu &= 0,29 \end{aligned}$$

Con lo cual es posible calcular el área mínima de la sección transversal del cilindro para construir la celda de carga. Para tener un mayor nivel de confianza que el material sometido a la carga esperada no supera el límite elástico se supone un factor de seguridad de 2, ya que para tener una completa validez en los resultados no es permitido tener deformaciones plásticas de las celdas construidas (Goncalves, 2002; Enríquez, 1988). y así se obtiene lo siguiente:

$$\sigma_{admisible} < \frac{S_y}{2} \Rightarrow \sigma_{admisible} < 125 [\text{MPa}] \quad (2)$$

Entonces de la ecuación (1):

$$A = \frac{F}{\sigma_{admisible}} \Rightarrow A = 3.2 \times 10^{-4} [m^2]$$

Por las condiciones del molino, los espacios disponibles para la colocación de los sistemas de medición y el cálculo anterior, se determina que las celdas diseñadas deben ser cilindros huecos de 30 mm de diámetro exterior, con esta información

fijada, se calcula el diámetro interno del cilindro a partir de la ecuación:

$$A = \pi(R^2 - r^2) \quad (3)$$

Donde:

A = área transversal del cilindro

R = radio exterior del cilindro

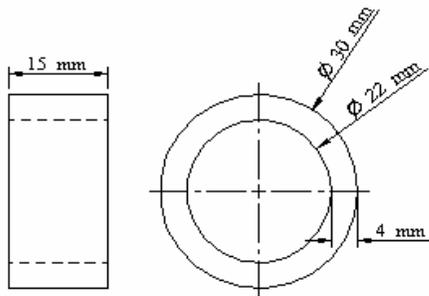
r = radio interior del cilindro

Con  $R = 0,015 \text{ m}$  de la ecuación se obtiene que:

$$r^2 = R^2 - \frac{A}{\pi} \Rightarrow r \approx 11[\text{mm}] \quad (4)$$

Finalmente el espesor  $e = R - r = 4 \text{ mm}$

La Figura 3 muestra la forma y dimensiones finales del cilindro para la construcción de la celda.



**Figura 3.** Cilindro para la construcción de la celda usada en la medición de la magnitud de las fuerzas reactivas, en los apoyos de las masas del molino panelero Apolo 5.

**Cálculo de la sensibilidad teórica del dispositivo.** La sensibilidad del dispositivo se define como la mínima carga que producirá una microdeformación de la celda. De la teoría de elasticidad (Goncalves, 2002) se sabe que:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5)$$

Donde:

$\sigma$ : esfuerzo producido

$E$ : módulo de elasticidad del material

$\varepsilon$ : deformaciones producidas por el esfuerzo en el material.

Combinando la ecuación con la ecuación se obtiene:

$$\frac{F}{A} = E\varepsilon \quad (6)$$

Despejando  $F$ :

$$F = AE\varepsilon \quad (7)$$

El valor de A se definió anteriormente como el área mínima para que el material no sobrepase el límite elástico, de la misma manera el modulo elástico  $E$  es una característica propia de cada material, por lo tanto:

$$F = (3,2 \times 10^{-4}) [m^2] \times (205 \times 10^9) \left[ \frac{N}{m^2} \right] \times (10^{-6} \mu\varepsilon)$$

$$F \approx 65,6 \left[ \frac{N}{\mu\varepsilon} \right] \Rightarrow F \approx 6,6 \left[ \frac{Kgf}{\mu\varepsilon} \right]$$

De esta manera queda dimensionado al cilindro para la construcción de la celda y el siguiente paso será la selección de la configuración y el número de galgas extensométricas para la fabricación de la celda.

**Selección de la configuración de galgas para la medición con la celda.** Para la selección de la configuración existen tres alternativas, cuarto de puente, medio puente y puente completo (Hannah, 1992; García, 1969), esta configuración definirá la sensibilidad del circuito y la precisión del mismo. Las celdas de carga comerciales utilizan una configuración de puente completo porque ofrece una mayor precisión en la medición; por lo tanto, para la construcción de las celdas se usa dicha configuración.

**Equipo para la adquisición de la señal de salida del puente.** Para la adquisición de la señal de salida del puente, se emplearon dos dispositivos comerciales fieldpoint FP-sg-140 de 8 canales y un modulo FP-1000 de conexión a PC marca National Instrument.

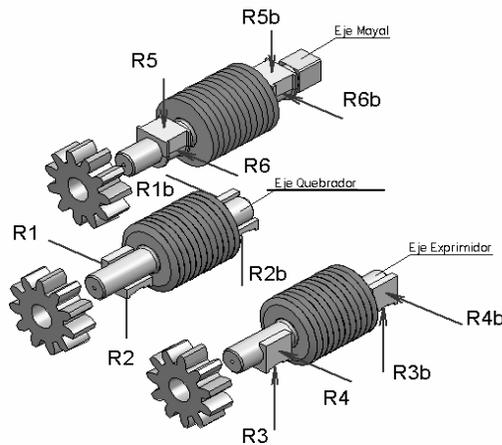
**Confiablez de las celdas de carga.** Para darle validez a los resultados que se obtengan de las mediciones hechas sobre las cureñas de los molinos paneleros, es necesario calibrar las celdas de carga. Este procedimiento se realizó en el Laboratorio de Tracción de la Universidad de Antioquia, en el cual cada una de las celdas fue cargada a velocidad constante de  $0,5 \text{ KNs}^{-1}$  desde 0 N hasta una carga de 45 KN, este procedimiento se repitió para cada una de las celdas 5 veces. Luego de comparar las curvas arrojadas por la máquina universal de ensayos de tracción y los valores presentados por las celdas de carga se resume en la Tabla 1 los porcentajes de error máximos para cada una de ellas.

**Tabla 1.** Porcentaje de error de las celdas de carga usadas en la medición de la magnitud de las fuerzas reactivas en los apoyos de las masas del molino panelero Apolo 5.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R1a	R2b	R3c	R4d	R5e	R6f
%Error	0,12	0,13	0,17	0,2	0,11	0,15	0,18	0,15	0,13	0,14	0,12	0,19

**Procedimiento a seguir para la instrumentación del molino.** Para la instrumentación del molino fue necesario el levantamiento de los planos del mismo y la modificación de los apoyos de los ejes para la colocación de las celdas de carga, tal como lo presenta de una manera detallada (Herrera, 2006), también se identificaron las áreas adyacentes a la máquina, con el fin de determinar la disponibilidad de espacios para la colocación de herramientas y equipos, seguidamente se realizó una limpieza profunda para eliminar la grasa y la suciedad propia de los molinos para evitar complicaciones en la instrumentación que fue ejecutada de la siguiente manera:

- Levantamiento de planos del molino Apolo 5.
- Rediseño y construcción de los apoyos.
- Desmontaje del molino.
- Limpieza del molino.
- Montaje de los apoyos modificados y celdas de carga: la Figura 4 muestra donde fueron colocadas cada una de las celdas para la medición.
- Ajuste del molino para el trabajo, según especificaciones del operario del mismo.
- Encendido del sistema de adquisición de datos y PC.
- Encendido del molino.
- Adquisición de los datos.



**Figura 4.** Puntos de ubicación de las celdas de carga usadas en la medición de la magnitud de las fuerzas reactivas en los apoyos de las masas del molino panelero Apolo 5.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La medición hecha en campo durante un periodo de tres horas y a una tasa de adquisición de un (1) dato por cada 20 segundos permitió recaudar un total de 540 datos de fuerza para cada una de las celdas de carga. Debido al interés particular de este experimento de conocer únicamente los valores máximos de la fuerza reactivas en los ejes durante

el proceso de extracción de jugo, se procedió a extraer los valores pico en cada uno de los ciclos de carga y con ellos a construir un valor promedio, el cual se presenta en la Tabla 2, donde la numeración de las fuerzas corresponde a la indicada en la Figura 2. Cabe aclarar que las condiciones de operación del molino fueron establecidas por el operario del mismo dentro de los parámetros normales de funcionamiento.

**Tabla 2.** Resultados de la medición de la magnitud de las fuerzas reactivas en los apoyos de las mazas, en el molino Apolo 5.

Punto de medición	1	2	3	4	5	6
Fuerza [KN]	16,2	28,1	2,8	13,4	37,1	3
Desviación estándar	2,2	4,4	0,7	1,5	2,8	0,2

De la tabla anterior se observa que la máxima carga obtenida se halla en el punto 5 por lo que este punto será de máxima sollicitación en el molino, mientras que los puntos 3 y 6 son los menos cargados en la cureña.

Los órdenes de magnitud de las fuerzas reportadas en la Tabla 2 están de acuerdo a los rangos establecidos en los modelos teóricos desarrollados por Cano (2004) (Cano, 2004). Mas aún, una simple verificación del flujo de fuerzas permite establecer de forma razonada con base en la mecánica, que la fuerza de mayor magnitud efectivamente debe ser la que se haya en el punto 5.

Los valores de desviación estándar para las fuerzas medidas, hacen notoria la gran variación de las fuerzas en condiciones normales de operación, esto se debe principalmente a las condiciones no uniformes de la alimentación del molino durante el proceso de extracción y a las características no homogéneas tanto geométricas como mecánicas de la caña.

### CONCLUSIONES

Se aportan unos resultados indirectos representados básicamente en unos dispositivos o celdas de carga válidos para sensar fuerzas en cureñas de molinos paneleros.

Los valores de carga obtenidos permiten abordar una nueva fase de investigación y desarrollo, haciendo uso de estos como valores de entrada, en un modelo computacional de análisis de esfuerzos con el cual sea posible elaborar una propuesta de rediseño de las cureñas tanto en lo geométrico como en lo material.

Las mismas cargas que actúan sobre las cureñas corresponden también a las fuerzas reactivas en los ejes de las mazas del molino por lo que también es posible usar esta información para la evaluación de las dimensiones y materiales de los ejes.

La tecnología actual de los molinos dificulta la instrumentación de los mismos ya que las modificaciones necesarias para realizar la instrumentación se ven reducidas a los apoyos de los ejes, puesto que las cureñas técnicamente no son viables de modificar.

Los bajos porcentajes de error presentados durante la calibración de las celdas de carga, permiten garantizar la confiabilidad de las fuerzas medidas.

### BIBLIOGRAFÍA

- Cano, J.D. 2004. Mejoramiento del sistema de lubricación en los apoyos de los ejes de las mazas de los molinos paneleros. Trabajo de Grado. Ingeniero Mecánico. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 147 p.
- Dally, J.W. and W.F. Riley. 1978. Experimental stress analysis. 2<sup>nd</sup> ed. McGraw Hill Book Co., New York. 345 p.
- Enríquez, C.H. 1988. Aplicación de la extensometría eléctrica al diseño mecánico e inspección de equipos. En: I Seminario Nacional sobre Diseño Mecánico e Inspección de Equipos. Asociación Colombiana de Ingenieros Electricistas, Mecánicos, Electrónicos y Afines, Cartagena de Indias, Colombia. 900 p.
- García, G. 1969. Los fundamentos de la extensometría eléctrica. Rev. Dyna 86:69-79.
- Goncalves, R. 2002. Introducción al análisis de esfuerzos. 2<sup>nd</sup>ed. Industria Grafica Integral, C.A. Caracas, Venezuela. 475 p.
- Hannah, R.L. and S.E. Reed. 1992. Strain gage users' handbook. Society for Experimental Mechanics Inc., London and New York. 424 p.
- Herrera, M. 2006. Medición experimental de las fuerzas reactivas en los ejes de las mazas del molino panelero Apolo 5. Ingeniero Mecánico. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 150 p.
- MatWeb. 2006. Material property data. En: <http://www.matweb.com/search/MaterialGroupSearch.aspx>. Consulta: Noviembre 2006.