

# LOCALIZACIÓN LINEAL DE FISURAS EN CILINDROS DE GNC

**Damián Craiem<sup>(1)</sup>, M.Armeite<sup>(2)</sup>, M. I López Pumarega<sup>(2)</sup>, M.M. Gutiérrez<sup>(2)</sup>, José E. Ruzzante<sup>(1)(2)</sup>,**

*(1) Grupo Analisis de Señales, Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional*

*(2) Grupo Ondas Elásticas, ENDE, Comisión Nacional de Energía Atómica,*

*Buenos Aires, Argentina.*

*Miembros del GLEA, Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica.*

*e-mails: ruzzante@cnea.gov.ar dcraiem@mbx.servicenet.com.ar armeite@cnea.gov.ar lopezpum@cnea.gov.ar mmgutier@cnea.gov.ar*

## RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue resolver la ubicación en forma lineal de fisuras en cilindros de GNC. Para ello se utilizaron dos sensores piezoeléctricos sobre la superficie exterior del tubo, ubicados sobre una generatriz del cilindro, teniendo en cuenta el orden de arribo de los pulsos que se propagan desde la fuente hasta los mismos. Luego, los datos de la localización son adquiridos por un equipo de Emisión Acústica y son transferidos a la PC, mediante una placa ISA que fue diseñada especialmente para medir diferencias de tiempo de arribo. Se planteó el desarrollo de un método para localización mediante curvas equitemporales, sobre las cuales se encuentran las posibles fisuras. Se desarrolló un software que permite visualizar los arribos de los eventos y la posición de las fuentes para cada cilindro, graficando también las curvas mencionadas en tiempo real. Se estudiaron los intervalos de error, para distintos sectores del tubo, haciéndose hipótesis sobre la ubicación de fisuras en las ojivas.

## ABSTRACT

The primary target of this work was to solve the location of cracks in GNC cylinders in a linear form. Two piezoelectric sensors were mounted on the outer surface of the tube, located on an axial line of the cylinder. Considering the order of arrival of the pulses that propagate from the crack to such sensors and the differences of arrival times between them, the software is able to show all the possible AE sources locations describing a curve. The development of an analytical method to find these curves called "equal times hyperbolas" is proposed. Special software that allows visualizing the events arrivals and the position of the sources for each cylinder was programmed. It also allows the drawing of the mentioned curves in real time. The error intervals were studied, for different sectors of the tube, arriving to solid conclusions.

## 1 - INTRODUCCION

Para detectar las posibles fisuras sobre un tubo cilíndrico de GNC, se emplean, para este caso, dos sensores piezoeléctricos. Los mismos se colocan, con el tubo en posición horizontal, sobre una misma línea recta axial, como muestra la Fig.1.

La información rescatada de los sensores debe ser amplificada y acondicionada para poder excitar circuitos digitales encargados de medir *las diferencias* en los tiempos de arribo de los frentes de ondas provocados por las posibles fisuras.

En un trabajo previo<sup>(1)</sup> se presentó el desarrollo y puesta a punto de un equipo de Emisión Acústica (EA) desarrollado en CNEA destinado a la detección y ubicación de fisuras en cilindros de GNC, con cuatro sensores.

En este trabajo se presenta un nuevo desarrollo para ubicar fuentes de EA usando el mismo equipo, pero empleando sólo dos sensores. Esta modificación está de acuerdo con la Norma ASTM E 1419-96.

El equipo de emisión acústica posee dos módulos principales. El primer módulo es el encargado de acondicionar la señal recibida por los sensores y

convertirla en una señal digital. Para ello el sistema permite ajustar, por canal, los niveles de ganancia y umbrales de detección. Asimismo, posee un contador que muestra la cantidad de eventos detectados (frentes de onda cuya amplitud cruza el umbral establecido).

El segundo módulo es una placa que permite interconectar el acondicionador de señal con la PC a través del bus ISA. En este caso la placa tiene habilitado solo 2 canales. Al detectarse un evento proveniente de alguno de los 2 sensores, el canal correspondiente arranca el contador, que se detendrá cuando reciba un pulso por el otro canal. En ese momento se genera una interrupción en la PC, que es mapeada por el software, y se lee el valor (8 bits) de la *diferencia de tiempos* entre el arribo de un mismo evento a los dos canales. Luego se espera un "tiempo muerto" y se resetea la placa para comenzar una nueva medición. La exactitud en la medición de la diferencia de tiempos es aproximadamente 4 µseg.

## 2 - DESARROLLO

Para la implementación del software se plantearon las ecuaciones correspondientes y luego se discretizaron para introducirlas en el programa.

Teniendo en cuenta lo descripto en la introducción, es importante destacar que con sólo dos sensores la información rescatada por el sistema digital es un número de 8bits (0 a 255) que, por analogía, representa una *diferencia* entre tiempos de arribo. Además se cuenta con la información de cuál de los dos sensores fue el que inició la cuenta (el primero alcanzado por el frente de onda). De esta manera se puede determinar si la fisura se encuentra en la mitad derecha o izquierda del tubo.

Para establecer una ecuación que identifique, con la medición mencionada, la curva que posea todos los puntos de los cuales pudo haber partido la EA, se establecen las siguientes convenciones (Fig.2):

- Los sensores se ubican como muestra la Fig.2, respetando una distancia de al menos 5cm con respecto a las ojivas.
- La distancia entre sensores, en cm, se denomina L.
- Debido a la simetría del cilindro, se trabaja con la mitad del tubo de radio "r", desplegándolo en el plano XY, formando un rectángulo de base L y altura p r. Así, las curvas serán simétricas con respecto a la línea que une los sensores (eje x).
- La línea que une los sensores será el eje x (y=0), y el origen de coordenadas se encuentra sobre el sensor izquierdo (sensor 1); por lo tanto el segundo sensor (sensor 2) está ubicado en el punto (x,y)=(L,0).
- La ubicación de la posible fisura se supondrá en el punto (x<sub>0</sub>,y<sub>0</sub>).

La distancia al sensor 1 desde la posible localización de la fisura, y teniendo en cuenta las convenciones detalladas, denominada d<sub>1</sub>, será:

$$\sqrt{x_0^2 + y_0^2} = d_1 \quad (1)$$

La distancia al sensor 2 (L,0) desde la fisura, denominada d<sub>2</sub>, será:

$$\sqrt{(L - x_0)^2 + y_0^2} = d_2 \quad (2)$$

Suponiendo una velocidad constante de propagación de las ondas, en la superficie del tubo, la distancia desde la fisura hasta el sensor es directamente proporcional al tiempo de propagación del frente de ondas, y esta velocidad es la constante de proporcionalidad ( $\bar{x} = \bar{v} \cdot t$ ). Si a la diferencia de distancias la llamamos D, entonces:

$$D = d_1 - d_2 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} - \sqrt{(L - x_0)^2 + y_0^2} \quad (3)$$

Elevando ambos miembros al cuadrado, definiendo a  $R = D^2 - L^2$  y operando hallamos, en función de la diferencia de distancias D, que la posición de una fisura ubicada en cualquier punto del plano (x,y)=(x<sub>0</sub>,y<sub>0</sub>) queda representada por:

$$4R \cdot x^2 + 4D^2 y^2 - 4LR \cdot x + 2L^2 D^2 - D^4 - L^4 = 0 \quad (4)$$

Para cada valor de D, podemos resolver esta ecuación encontrando una familia de hipérbolas que denominaremos: ***hipérbolas equitemporales*** o *familia de curvas resultante de puntos equidistantes desde los sensores* (Fig.3). Estas son las hipérbolas que representan, para un valor de diferencia de tiempo medido (diferencias de distancias "D"), todos las posibles ubicaciones de las fisuras. En el caso de la figura 3 se propuso L=70cm para varios valores de "D".

## 2.1 Diseño del Software

El software fue programado en Turbo C++ y tiene como objetivos principales el control de la placa ISA que almacena las diferencias de tiempos de arribo entre eventos, y la graficación de los mismos en pantalla. En el caso particular de tubos de GNC, se dispuso un criterio internacionalmente aceptado (Ref.2), aunque no normalizado, que considera que si un evento de EA se repite más de 5 veces en el mismo lugar, ese evento es considerado una posible fisura. En nuestro caso, cualquier fisura ubicada sobre una misma hipérbola, generará una lectura idéntica. Por ejemplo si la fisura se encuentra en cualquier punto sobre la circunferencia central del tubo (recta x = L/2), los valores leídos serán nulos, ya que todas las EA originadas en esa circunferencia, alcanzarán a los dos sensores al mismo tiempo.

Para tener en cuenta la repetición de señal en una misma posición del tubo, se decidió dibujar en un gráfico de barras, el número de veces que se lee un mismo valor. La altura de las barras se acomoda dinámicamente para poder ir observando los puntos con mayor probabilidad de ser candidatos a fisuras(Fig.4).

Es importante hacer notar que al recibir un 0, se incrementa la barra **central**, para brindar una noción de la ubicación de la misma al usuario. Si el sensor 1 es el golpeado primero, la fisura se encuentra sobre el lado izquierdo, y realizando un cálculo proporcional se grafica la barra, a la distancia correspondiente del centro para cada valor leído. Lo mismo sucede para el caso en que el primero en ser golpeado sea el sensor 2.

En pantalla además se visualizan las coordenadas x de las fuentes para los últimos 10 valores adquiridos. Para visualizar las barras en una posición aproximada en escala, se brinda la

posibilidad de configurar la distancia entre sensores en cm.

## 2.2 Calibración del sistema

Para asegurar la repetibilidad del ensayo en el laboratorio, previo a la medición se establecen las siguientes pautas de calibración, empleando un simulador como fuente de señal a detectar y conectado a un generador de señal exponencial de 1Hz:

1. Se coloca el cilindro en posición horizontal, y los dos sensores sobre una misma línea recta axial teniendo en cuenta que se encuentren cada uno a una distancia (cómo mínimo) de 5cm de las respectivas ojivas.
2. Se coloca el simulador en el centro sobre la línea que une los sensores.
3. Se enciende el generador que provee la señal al simulador. La señal debe ser exponencial (lo mas similar a un Delta de Dirac) y tener una frecuencia de repetición del orden de 1Hz o menor.
4. Se ingresa al programa de calibración y se verifica que en pantalla aparezca un valor cercano a 0 por cada golpe (aprox. un valor por segundo).
5. Se coloca el simulador en el centro ( $L/2, r$ ) sobre la generatriz opuesta a la que definen los sensores, y se busca la indicación de tiempo 0 (ambos sensores son alcanzados al mismo tiempo). Este tiempo se indica en la pantalla de la PC por cada señal de EA. Para esto se ajustan los umbrales y la ganancia al nivel mínimo posible que asegure una indicación estable (resultados de pruebas en el laboratorio: ganancia 30dB, umbrales en 1.5). Esto asegura que a la distancia máxima que se puede encontrar el simulador con respecto a un sensor, la amplitud del frente de ondas consiga cruzar el umbral y genere el pulso digital.
6. Se coloca el simulador cerca de un sensor y se calibra el umbral del sensor más lejano (opuesto) partiendo desde un valor alto, y bajando hasta obtener una cuenta uniforme en el display del contador de eventos. Si no se logra indicación, aumentar la ganancia de ambos sensores y volver al punto 5.
7. Se procede de la misma forma con el otro canal acercando el simulador hacia el otro sensor. Los umbrales deben ser similares para ambos sensores.
8. Se verifica nuevamente que la indicación con el simulador en el centro sea 0. Si no es así, se reajustan levemente los umbrales. Si la indicación no se puede llevar a 0, es necesario aumentar la ganancia de ambos sensores y volver al punto 5.

## 2.3 Realización de una medición

Luego de haber calibrado el equipo, se ingresa al software y se selecciona la opción de medición. Desde ese momento, cada vez que se produzca alguna señal de EA sobre la superficie del tubo, los frentes de onda se propagarán hasta alcanzar ambos sensores, quedando registrado en un buffer interno la diferencia en los tiempos de arribo. En ese momento la placa conectada al bus ISA generará una interrupción que será atendida por el *software*. La rutina de atención de la interrupción leerá el valor de tiempo almacenado en la placa identificando cual fue el sensor golpeado en primera instancia. El programa permanece detenido un tiempo muerto establecido (configurable por el usuario) y reseteará la placa para poder realizar una nueva medición.

El valor de tiempo leído aparecerá en pantalla, y la barra correspondiente incrementará su altura en una unidad, quedando registrada con un cambio de color.

Para graficar en pantalla se tiene en cuenta que el rango de valores de tiempo leídos es de 0 a 255 (8 bits). En la mayor parte de los casos el rango no se utiliza completamente. En laboratorio y para un tubo de 1m de largo ( $L=70\text{cm}$ ) el rango de valores leídos es de 0 a 60. Linealizando el eje x de manera que 0 (cero) sea la barra central, 60 y -60 las barras sobre los sensores (se utilizó la convención negativa para la mitad derecha del tubo y positiva para la izquierda), se determina la ubicación de la barra a incrementar y se confeccionan los gráficos descriptos (Fig.4) por cada evento recibido.

De esta manera, al colocar el simulador en cualquier posición fija sobre la superficie del tubo y entre los sensores, se observa el crecimiento de una barra, sobre un dibujo del esquema del tubo y los sensores, y algún crecimiento en las adyacentes, aunque en menor medida (estas corresponden a la dispersión inherente a cada medición). A simple vista es notoria la barra predominante. En un caso real, si la altura de la barra central llegara a 5, esto evidenciará una posible fisura. La misma se encontraría en algún punto sobre la hipérbola descripta por ese valor de tiempo (o distancia D) leído.

## 2.4 Determinación de errores

Para la calibración en el caso de medición de errores hay que agregar los siguientes pasos:

9. Para lograr graficar las hipérbolas y calcular errores, es necesario realizar 6 mediciones sobre la línea que une los sensores. Para esto se divide la distancia entre sensores en 6 partes iguales y se realiza una marca en cada una.

10. Se coloca el simulador sobre la primera marca comenzando siempre de izquierda (sensor 1) a derecha (sensor 2) , y se lee el valor de tiempo indicado.
11. Si el valor indicado no es estable, se reacomoda el simulador, hasta lograr la mayor repetibilidad posible.
12. Se completa para los seis valores medidos el campo correspondiente a la calibración en pantalla, con el valor más estable obtenido en el punto 11.
13. Se repiten los pasos 10, 11 y 12 para cada marca.
14. Al concluir, el equipo se encuentra calibrado y se puede comenzar a medir.

Para determinar con qué grado de exactitud se localizan las fisuras, se agregaron otras rutinas que permiten graficar en pantalla, y sobre el tubo desplegado en el plano XY, las hipérbolas correspondientes para cada lectura.

Para realizar el gráfico en la pantalla (Fig.5) se dispuso de todo el ancho (640 pixels) para los 70cm de distancia entre sensores. Sólo se desplegó una mitad del tubo suponiendo simetría con respecto al eje x (la convención de ejes se mantiene).

Al medirse un valor, y utilizando la calibración de los 6 segmentos descripta, se decide entre cuál de ellos se encuentra la hipérbola a dibujar. Luego utilizando la ecuación de la familia de hipérbolas discretizada, y escaleada (70cm = 640pixels) se dibuja la hipérbola correspondiente.

Para realizar la medición se cuadrículó el tubo real, respetando una grilla de 10 cm en el eje x, y 8 cm en el eje y.

Para poder realizar la cuantificación del error cometido, en pantalla aparece una grilla punteada con la misma cantidad de intersecciones que la real y a escala. Además se provee de un cursor (cruz gruesa) que va “saltando”, utilizando los cursores del teclado, entre los cruces de la líneas verticales y horizontales que conforman la grilla. Este cursor modeliza a la posición real del simulador sobre el tubo.

Los pasos a seguir para la medición de errores se detallan a continuación:

1. Se calibra el sistema siguiendo los pasos 1 a 14 ya indicados.
2. Se ingresa en el menú de “Ubicación Superficial y medición de errores”.
3. Se coloca al simulador sobre el tubo en la intersección de algún par de rectas que conforman la grilla y se enciende el generador de pulsos del simulador.
4. Se ubica, utilizando los cursores del teclado, la cruz gruesa que provee el software, en la intersección análoga en pantalla a la original en el tubo.

5. Por cada evento recibido, se observa en pantalla el dibujo de la hipérbola correspondiente, junto con el segmento que representa la distancia mínima entre la hipérbola graficada y la cruz gruesa que representa al simulador.
6. El programa almacena los valores de distancia mínima graficados (en pixeles) y calcular el valor medio del conjunto de valores almacenados para cada posición del simulador. Las distancias mínimas son el resultado de haber colocado al simulador en cada punto de la grilla y promediar las distancias mínimas a las hipérbolas, para 10 eventos consecutivos con la misma posición del simulador.
7. Se repiten los pasos 3 a 6 para todos los puntos de la grilla en la misma mitad del tubo. El orden en que se realizan las mediciones no es relevante ya que se almacenan las distancias y los valores (x,y) correspondientes a la hipérbola y al simulador para cada una.

Para poder visualizar los intervalos de error a lo largo de los sectores del tubo, se confeccionaron gráficos en 3D (Fig.6 a 8.). Estos gráficos muestran, siguiendo la convención adoptada, el plano XY como un rectángulo de base “L” (eje x) y alto “p r” (eje y, una sola mitad). Este rectángulo modeliza el despliegue de medio tubo cilíndrico sobre un plano. El eje z simboliza los valores medios de las distancias mínimas (en pixeles) calculadas por el software de detección de errores, para cada punto de la grilla del tubo.

Analizando las curvas observamos que el error sobre la generatriz que une los sensores (eje x) es 0 ya que forman parte de las 6 mediciones de calibración. Destacamos además un valle sobre la circunferencia central que muestra la detección del 0 ó arribo simultáneo a los 2 sensores con aceptable precisión. Concluimos que cerca de las ojivas los errores se incrementan pero no simétricamente. Esto lo adjudicamos a la diferencia en el espesor del metal en la ojiva superior e inferior.

El error máximo registrado es de 40 pixeles que equivale a 4.4 cm

( $40 \text{ pixeles} \cdot \frac{70 \text{ cm}}{640 \text{ pixeles}} = 4.4 \text{ cm}$ ); aunque cabe

destacar que el promedio de error en todos los puntos es bastante menor, y está en el orden de los 14 pixeles = 1.5cm.

### 3 - CONCLUSIONES

De esta manera contamos con un *software* que es eficaz en la detección lineal de posibles fisuras en la superficie de cilindros, usando sólo 2 sensores,

pudiendo además observarse en la pantalla de la PC el número de eventos que se generan y su ubicación estimada.

Para una dada posición de la fisura, la repetibilidad en la ubicación de los eventos es alta y la dispersión baja. Esto se evidencia al colocar el simulador en una posición y ver acrecentarse la barra correspondiente y las adyacentes en mucho menor medida.

Para localizar con mayor precisión la posición de las fisuras, se hizo un desarrollo teórico por medio de las curvas equitemporales (hipérbolas), que representan todas las posibles ubicaciones de la fuente de EA, para

cada diferencia de tiempo de arribo medida. Esta determinación se hace con un de error absoluto máximo de 4.4 cm, para dos sensores ubicados a 70 cm entre sí.

En este momento nos encontramos en la elaboración de una hipótesis que nos brinde información acerca de qué sucede en los sectores del tubo externos a la zona analizada en este caso, es decir, en las ojivas. Es necesario destacar que allí, el espesor del material es mucho mayor que en el resto del cilindro produciéndose grandes distorsiones en la propagación de las ondas.

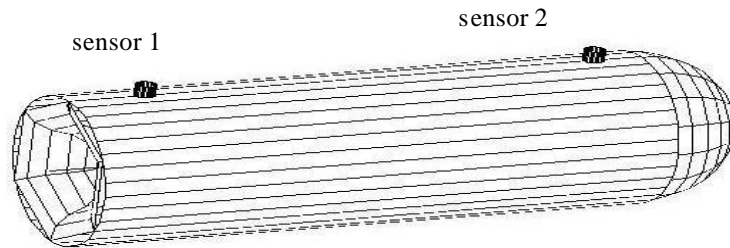


Figura 1. Esquema general del tubo y los sensores.

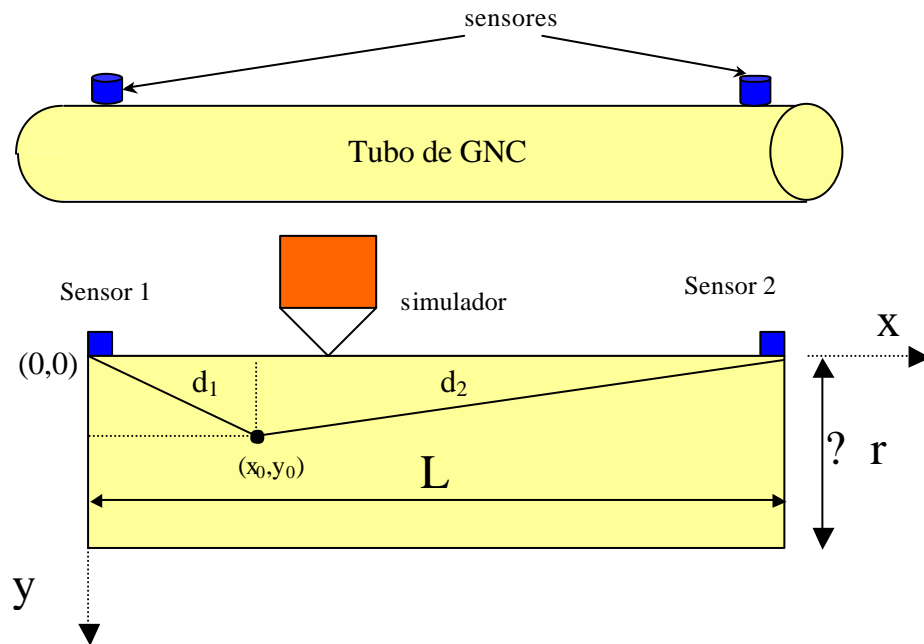


Figura 2. Mitad del tubo desplegado en el plano XY.

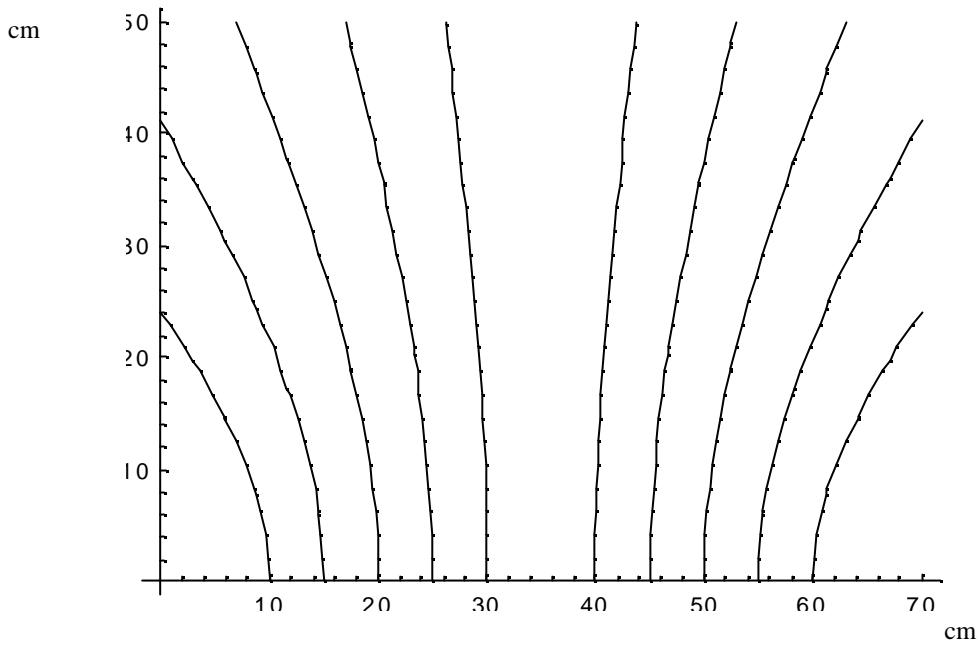


Figura 3. Hipérbolas generadas para  $L=70$  cm y varios valores de  $D$ .

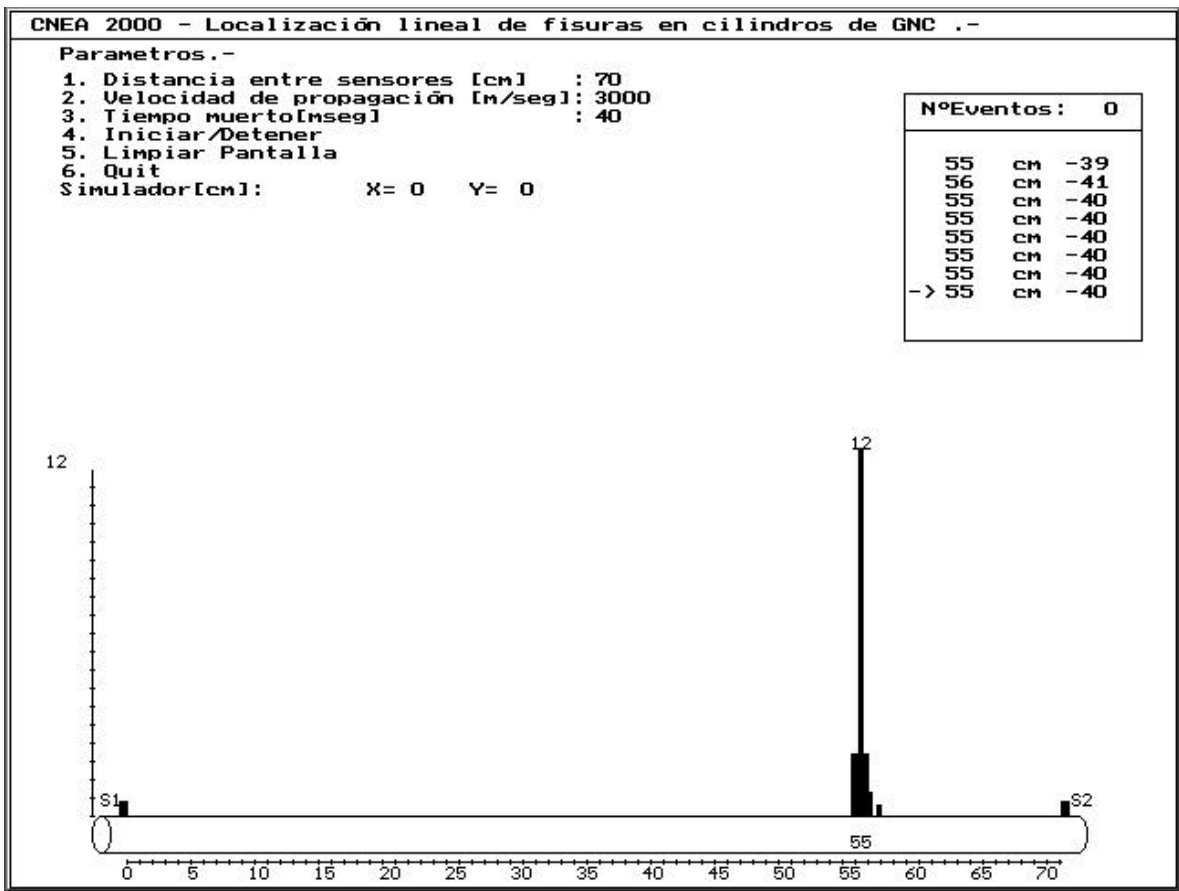


Figura 4. Gráfico de barras que muestra la detección de eventos sobre el tubo.

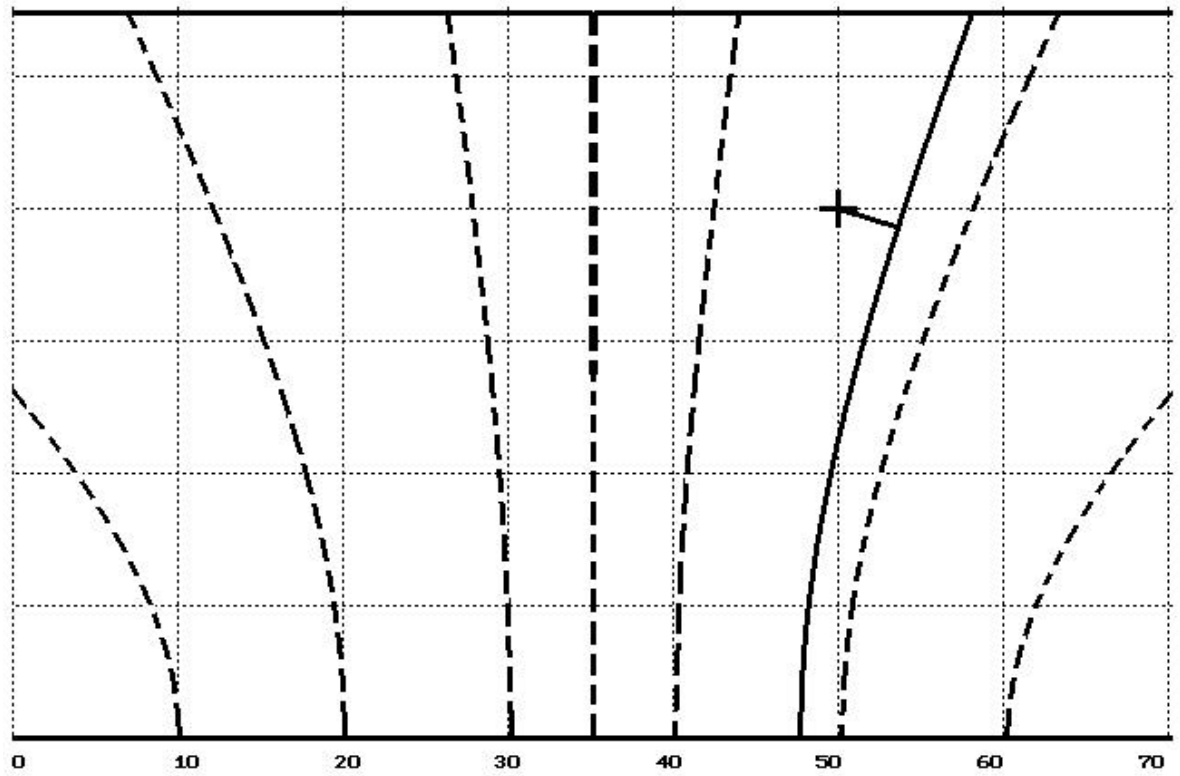


Figura 5. Pantalla de la PC: hipérbolas de calibración en línea punteada; en línea llena, hipérbola detectada, cursor y segmento de distancia mínima.

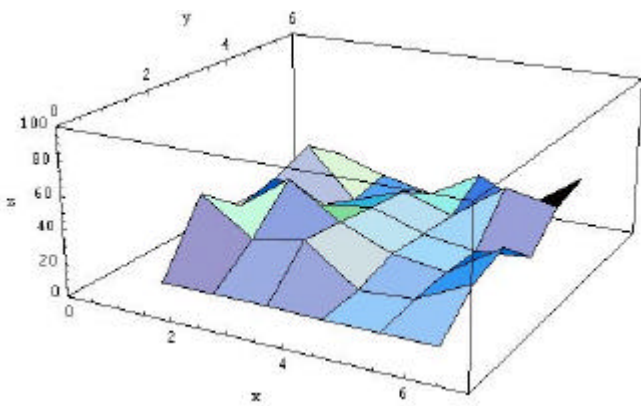


Figura 6. Gráfico de cuantificación de errores en función de medio tubo cilíndrico desplegado en el plano XY

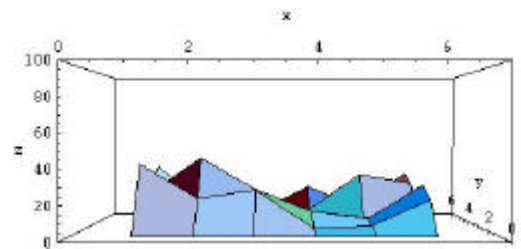


Figura 7. Vista lateral

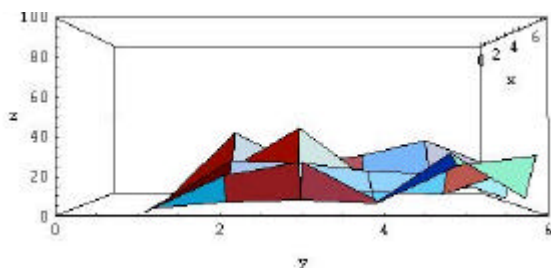


Figura 8. Vista frontal

#### 4 - REFERENCIAS

- 1 - “Desarrollo y puesta a punto de un equipo de emisión acústica para cilindros de GNC”. M. I. López Pumarega, A. Straus, M. Armeite, M.P. Gómez, J.E.Ruzzante, C. Verrastro, L.Ardisana, G. Róbalo, Actas CORENDE, 27-30 de octubre de 1997, pp 289-291.
- 2- “Cilindros de aço sem costura- Método de ensaio por emissao acústica”. NBR 13199. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Proyecto: 04:009.07-018/1993. Válida a partir de 30.09.1994.
- 3 – “Applied PC Interfacing, Graphics & Interrupts”, William Buchanan. Ed. Adison Wesley.
- 4 – “El IBM PC y PS/2”, Peter Norton y Richard Wilton, Microsoft Press.
- 5 – “Los Microprocesadores Intel. Arquitectura, programación e interfaces”, Barry B .Brey. Ed: Prentice Hall.
- 6 – “Aplique Turbo C++”, Herbert Schildt, McGraw-Hill.