



DEFORMACIONES DE UNA COLUMNA LÍQUIDA FRENTE A CARGAS CUASI-ESTÁTICAS EN UN COHETE DE SONDEO

ISIDORO MARTÍNEZ
E.T.S.I. Navales (U.P.M.)
isidoro.martinez@upm.es
Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica 344, pp. 17-30, 1996

1. INTRODUCCIÓN

Se describen aquí los pormenores del análisis de un experimento singular sobre el comportamiento de una gran masa de líquido mantenida casi flotando en el espacio. Se trata de un puente líquido que se establece entre dos discos sólidos coaxiales, consiguiendo que quede anclado por fuerzas de mojado a las aristas de los discos, e inyectando líquido hasta conseguir puentes cilíndricos (si no hay fuerzas de gravedad), y que al ser esbeltos (más largos que anchos) se han venido en llamar “columnas líquidas en ingravidez”. Precisamente con este título empezó en 1975, subvencionado por la extinta C.O.N.I.E., y dirigido por el Prof. I. Da Riva, uno de los programas de investigación más fructíferos de esta Universidad, que ha dado lugar a una gran variedad de trabajos teóricos y experimentales, ocho Tesis Doctorales y numerosas publicaciones.

La Fig. 1 muestra una imagen típica obtenida durante el experimento realizado a bordo del cohete TEXUS-33 el 30-11-94 [1]. Aunque la visualización y grabación de imágenes ha mejorado enormemente respecto a los ensayos a bordo del laboratorio espacial internacional Spacelab en su primer vuelo en 1983, todavía falta mucho hasta llegar al diagnóstico totalmente digital y en tiempo real.

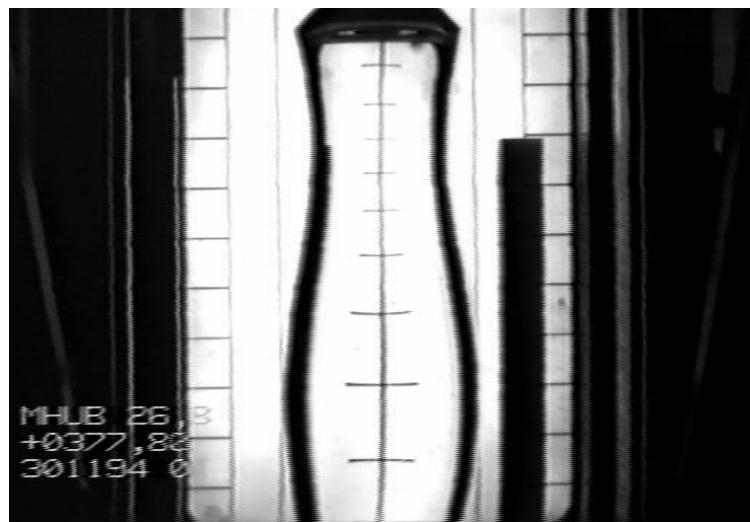


Fig.1. Imagen digitalizada extraída directamente de la grabación en vídeo del experimento TEXUS-33. En el centro se observa la columna líquida o puente líquido (forma de ánfora central transparente), de 85 mm de longitud y 30 mm de diámetro. Detrás del líquido hay una rejilla con separación de un centímetro entre las marcas, que sirve de referencia. A la derecha del puente se encuentra la varilla (de 1 cm de lado) que sirve de referencia del movimiento armónico al que está sometida toda la columna. Las partes laterales oscuras corresponden a la pared frontal de la cámara de ensayo. La leyenda indica elevación en el movimiento sinusoidal (MHUB), tiempo desde el lanzamiento del cohete (segundos) y fecha del vuelo.

En el estado de equilibrio, en ausencia de fuerzas másicas, la columna sería perfectamente cilíndrica (esférica si no hubiera apoyos) debido a las fuerzas de cohesión que dan lugar a la tensión superficial y que también se llaman fuerzas capilares. Estas fuerzas de tensión superficial son muy pequeñas (p.e. 0,02 N/m para el aceite de silicona que se usa normalmente en estos experimentos, y 0,07 N/m para el agua) por lo que en la Tierra sólo son dominantes en sistemas milimétricos o en las pompas de jabón al estar huecas. Pero al contrarrestar el peso con la fuerza de inercia en el vuelo balístico de una plataforma microgravitatoria (torre de caída libre, vuelo parabólico de avión, cohete de sondeo o laboratorio espacial, las pequeñas fuerzas capilares son dominantes. O al menos así se creía en un principio, pues luego se ha comprobado que, al ser tan pequeñas las fuerzas capilares, cualquier ligera perturbación residual como el ruido de motores adyacentes, pasos de los astronautas, control de actitud del vehículo (en el TEXUS con cohetes de gas de 0,3 N, gradiente de fuerzas másicas, resistencia aerodinámica, etc., puede llegar a vencerlas.

Esto precisamente fue el origen del experimento TEXUS-33. Durante el vuelo del Spacelab-D1 en 1985 se observó que la columna líquida se deformaba como si estuviese sometida a una aceleración de $70 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ($=70 \mu\text{g}$ en el argot microgravitatorio, donde μ es el submúltiplo usual y g es la aceleración gravitatoria en la superficie terrestre, $g=9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Al no poder explicar este resultado, después de muchos análisis, se propuso en 1990 este nuevo experimento, consistente simplemente en someter una columna líquida a una aceleración perfectamente conocida ($100 \mu\text{g}$), muy por encima del ruido esperado en el TEXUS ($<10 \mu\text{g}$), y medir con precisión la respuesta (deformación en ánfora).

Debido a que el retraso en las campañas de cohetes fue incluso superior al enorme retraso de los vuelos del Spacelab, el experimento en el TEXUS-33 tuvo lugar en 1994, después del experimento en el Spacelab-D2 en 1993 que produjo resultados contradictorios [2] con los del Spacelab-D1. Esta desincronización en la secuencia de ensayos mermó el rendimiento del experimento en el Spacelab-D2, por lo que se ha tratado de realizar un esfuerzo adicional en el análisis del TEXUS-33.

2. OBJETIVO

El objetivo general del programa de investigación sobre el comportamiento de columnas líquidas en microgravedad es, en su aspecto básico, la contrastación de los resultados teóricos (obtenidos según unas ciertas hipótesis) con los resultados experimentales (obtenidos según unas ciertas prácticas). En sus aspectos aplicados, esta configuración de puente líquido es directamente aplicable a la técnica de crecimiento cristalino sin crisol llamada de zona flotante, y se ha propuesto también como sistema acelerométrico a frecuencias sub-hertzianas.

Pero el objetivo concreto que aquí se trata es extraer la máxima cantidad de información (con la máxima precisión) de la grabación de vídeo del experimento. Los experimentos espaciales son todavía hoy tan costosos (del orden de 100 MPta éste ensayo) que se trabaja en modo ‘rumiante’ (ir, coger cuanto se pueda, volver y digerir). Este modo de análisis en diferido no es propio de la física de fluidos, donde el bajo coste del material de trabajo (se trata siempre de fluidos representativos de una cierta compresibilidad, viscosidad, conductividad, etc.) y la enorme cantidad de variables a medir (posiciones, velocidades, temperaturas, presiones, concentraciones) propician un trabajo interjectivo con visualización, análisis y ajuste fino en tiempo real.

En cualquier caso, en tiempo real o en diferido, en cuanto se pasa de las primeras etapas de prueba y error y se quiere un análisis cuantitativo fino, se necesita una cierta precisión en el análisis de imágenes grabadas en vídeo, surgiendo la necesidad de la informática y con ella la utilización de programas que gestione adecuadamente la información extraída mediante una tarjeta digitalizadora de la señal de vídeo. Para este propósito se ha desarrollado aquí el programa llamado *Videodaq*, creado específicamente para extraer los contornos de puentes líquidos en ingravidez de los experimentos realizados en el Spacelab, en los TEXUS, o incluso en tierra [3], a partir de grabaciones en blanco y negro de los mismos mediante el estudio del cambio de luminosidad de los puntos de la imagen (niveles de gris de blanco a negro o viceversa).

Puede surgir el interrogante de por qué crear un programa para tal efecto (búsqueda de bordes en imágenes), existiendo en el mercado abundantes programas que ya realiza esta tarea. La razón es la necesidad de precisión en el análisis de detalles y la versatilidad de la que por otra parte carecen dichos programas comerciales, como el usado para generar la Fig. 2 por extracción de bordes de la Fig. 1.

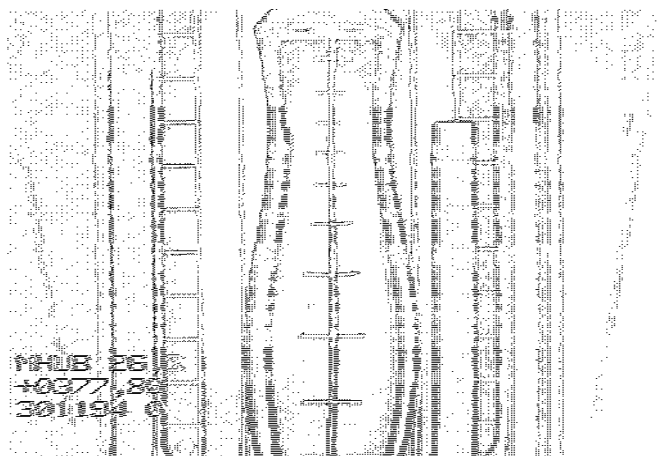


Fig. 2. Extracción del contorno del puente líquido representado en la Fig. 1 mediante el uso de un programa comercial (se ha pasado de 512x512 píxeles de 8 bits de escala de grises a 512x512 píxeles de 1 bit, blanco o negro). Se puede observar que los contornos presentan bandas y detalles difíciles de analizar.

Lo que se quiere, en primera instancia, es extraer de la Fig. 1 la curva del contorno del puente líquido que se muestra en la Fig. 3.

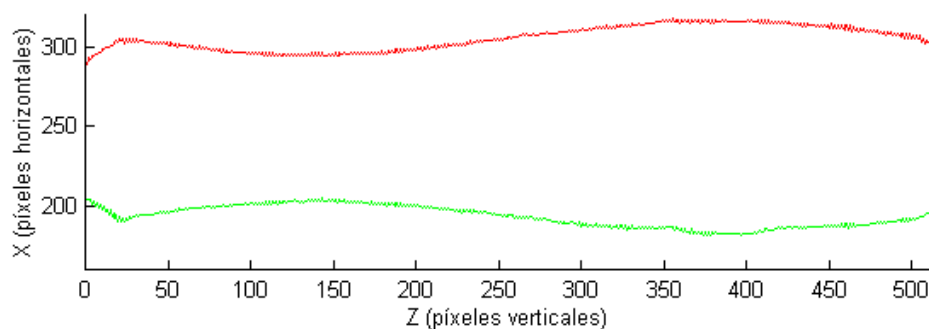


Fig. 3. Extracción del contorno del puente líquido (girado 90° respecto a las Figs. 1 y 2, no isotrópico) realizada mediante el programa *Videodaq*. Esto es sólo el primer paso, ya que esta información (512 parejas de puntos) es posteriormente procesada, como se indicará más adelante, logrando una definición mucho mejor del contorno (expresión analítica sencilla).

El hardware necesario para la utilización de *Videodaq* en el análisis de videocasetes de experimentos consiste en un reproductor de vídeo, un monitor de vídeo, una tarjeta digitalizadora de Data Translation (la DT-2851) y un PC. La pieza más cara es la tarjeta (300 000 Pta.), a pesar de ser de la gama más baja del fabricante.

Por otro lado el software necesario es el VIDEODAQ.EXE aquí desarrollado (el cuál crea si no existen los subdirectorios para guardar las secuencias de líneas horizontales \HLINES, verticales \VLINES, los contornos \SHAPES y las imágenes completas originales \IMAGES), la subrutina de control de la tarjeta DT-2851, IDRVS1.SYS, que debe habilitarse en el CONFIG.SYS, y el traductor de formato FTU.EXE que convierte los ficheros de imágenes de formato .IMG al formato .TFG, para poder hacerlas compatibles con el software estándar en Windows. El software especializado para análisis de imágenes es muy caro (400 000 Pta. la licencia mono-usuario del mismo fabricante).

La programación de *Videodaq* se ha realizado en lenguaje C (Microsoft 6.0), debido a la necesidad de una gran velocidad de proceso de la información almacenada en la memoria del ordenador procedente de la tarjeta digitalizadora, que convierte cada imagen de vídeo en una matriz de 512x512 píxeles de 8 bits de resolución de niveles de gris. Es cierto también que la elección del lenguaje viene forzada en gran parte por el fabricante de la tarjeta digitalizadora, puesto que los comandos de control de la misma sólo eran compatibles con C o Fortran.

3. DIFICULTADES

En el análisis de un experimento de carácter único como éste, debido a su elevadísimo coste, a su brevedad (6 minutos como máximo para preparación y ejecución), a su largo periodo de gestación (más de cuatro años), a la posibilidad de un único intento (por el tiempo, el coste y la larga cola de espera), a la utilización de aparatos de calidad espacial y uso único (sin posibilidad de pruebas en vuelo y de ensayos previos), etc., aparecen determinadas dificultades que en el trabajo de laboratorio en tierra se suelen solventar mediante ensayo y error, perfeccionando cada vez más los procesos en un modo iterativo.

El primer bloque de dificultades surge de la toma de imágenes *in situ*; p.e. debido a las reducidas dimensiones del módulo de experimentación, la cámara no se encuentra alineada respecto del puente líquido, sino que la imagen que es grabada está reflejada mediante espejos intermedios, lo que introduce una deformación romboidal en la imagen del puente líquido, factor que hay que tener en cuenta en el posterior análisis de la misma. Por otra parte hay que tener en cuenta la perspectiva cónica (cámara a 420 mm de la columna, que es de 85 mm de larga), que introduce deformaciones en la escala y el efecto de paralaje, Fig. 4, así como el desenfoque de la rejilla, que está 48 mm detrás de la columna (la profundidad de foco con la óptica usada, 16 mm de foco y una apertura de 11, era de ± 12 mm sobre el plano meridiano).

Otras deformaciones que se deben tener en cuenta son el desplazamiento y giro de la cámara respecto al eje del puente, que hacen muy molesto el análisis del vídeo. El zoom de la cámara sólo cambia la escala y no es una dificultad si no se cambia (durante el zoom no es posible analizar el experimento con la versión actual del *Videodaq*). La iluminación del objeto es otro factor con el que se debe de contar en el análisis de las imágenes, debido a las sombras y variaciones de nivel de gris a los que da lugar.

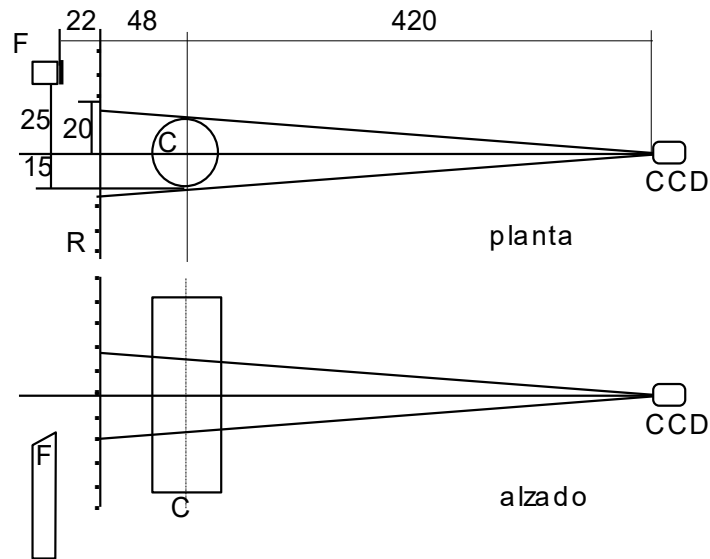


Fig. 4. Esquema óptico (desarrollado) del experimento TEXUS-33. Se muestra la cámara CCD, la columna líquida C, la rejilla R, y la referencia fija F, fija al cohete, pues todo lo demás se desplaza axial y sinusoidalmente. Medidas en mm.

El procesamiento de la grabación también introduce dificultades en el análisis, así la conversión de la señal de la CCD a sistema PAL (europeo), o la conversión adicional de sistema NTSC (americano) a sistema PAL en el caso del Spacelab, la transmisión radioeléctrica desde la plataforma a tierra, la grabación analógica en videocasete y la posterior reproducción, cada una en aparatos diferentes, etc., introducen ruido en la señal.

Otra dificultad añadida se produce en el mismo procesamiento de la imagen de vídeo mediante la tarjeta digitalizadora, puesto que recorta en parte los extremos de la imagen y la transforma en una matriz cuadrada de 512x512 píxeles, así que, como la imagen de vídeo es rectangular de relación 3/4, los píxeles no son cuadrados sino rectangulares, con una relación de tamaño horizontal-vertical es de 1,46 para la tarjeta usada.

El análisis detallado de las imágenes de vídeo requiere un conocimiento del estándar CCIR de señal de televisión para comprender los problemas de sincronía espacio-temporal en las imágenes. Para transmitir la imagen de televisión se hace recorrer al rayo luminoso la pantalla mediante un barrido en zig-zag que la cubre por completo por líneas sucesivas. La norma europea es de 625 líneas por pantalla que se recorren en dos semiimágenes de 312,5 líneas, correspondientes a las líneas pares e impares. Al final de cada línea se recibe una señal de sincronismo horizontal, que indica el final de una línea y el comienzo de la siguiente. Esta señal de sincronismo horizontal tiene una duración de unos 4,7 μ s. Al final de cada semiimagen se recibe una señal de sincronismo vertical, que indica que se ha barrido el total de la pantalla y debe iniciarse un nuevo barrido de paridad diferente. Este sincronismo tiene una duración sensiblemente mayor al sincronismo horizontal, 192 μ s; esta larga duración introduce mayor incertidumbre en un análisis completo de la imagen frente al análisis realizado solamente utilizando una semiimagen, se deberá pues elegir entre realizar el estudio utilizando sólo líneas pares o impares, opción que presenta el programa *Videodaq*. Debido a esta secuenciación de la señal de vídeo, la tarjeta digitalizadora tiene un acceso inmediato a las líneas horizontales de la imagen, mientras que es

muy difícil trabajar con líneas verticales, de ahí que en todos los experimentos se disponga el eje de la columna líquida verticalmente en la imagen, a pesar de que la imagen tendría mayor resolución con el eje horizontal.

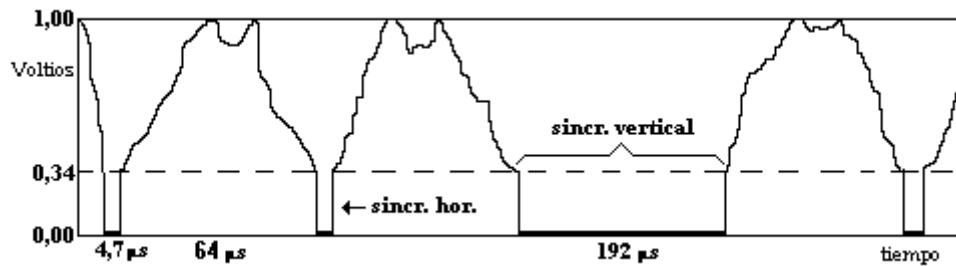


Fig.5. Esquema temporal de la señal de vídeo. Los valores comprendidos entre 0,00 V y 0,34 V se reservan para sincronismos, de esta manera no son visibles al estar por debajo del nivel de negro (0,34 V). La zona comprendida entre 0,34 V y 1,00 V corresponde a la franja reservada para la modulación de los niveles de gris.

4. ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE EN LA SEÑAL

Dejando aparte las deformaciones ópticas desde el objeto hasta la imagen, e incluso la influencia de la reflexión total en la localización de los bordes de la columna líquida, se va a analizar aquí con todo detalle la incertidumbre en la localización de bordes a partir de imágenes típicas (de 512x512 píxeles de 8 bits) de puentes líquidos.

Lo ideal sería obtener una grabación de un cilindro sólido y transparente (p.e. de metacrilato) de las mismas dimensiones del puente líquido y que se encontrase en las mismas condiciones de iluminación, tratamiento de la señal de vídeo, etc., para el que se cumpliría:

$$\left. \frac{\partial X}{\partial z} \right|_t = 0 \quad \left. \frac{\partial X}{\partial t} \right|_z = 0 \quad (1)$$

siendo $X=X(z,t)$ la ecuación de la forma del borde como función espacial (contorno) y temporal (secuencia de imágenes). Incluso este experimento ideal, debido al ruido en todo el proceso que sufre la señal, daría una $X(z,t)$ con un cierto nivel de ruido, cuantificable p.e. con la desviación típica de la serie de valores espaciales σ_z (todo el contorno en un instante) y temporales σ_t (la evolución de un punto del contorno).

Pero para reproducir todas las condiciones, se requeriría otro experimento espacial que, con los costes que esto conlleva, es irrealizable. Otra posibilidad sería la de introducir la columna patrón de metacrilato al lado de la de líquido y en la misma imagen, pero esto disminuiría mucho la resolución y complicaría el aparato.

Afortunadamente para este propósito, la grabación del experimento TEXUS-33 presenta un último minuto de casi completa quietud del líquido al parar las oscilaciones, que, si bien su finalidad era observar el amortiguamiento del movimiento residual del líquido, por una discrepancia en el diseño, el movimiento del puente se detuvo instantáneamente, con lo que resulta perfecto para este estudio de la incertidumbre. Con este fin se han extraído 10 imágenes del puente cubriendo un periodo (15 s) de la pequeña oscilación natural residual, la cual corresponde aproximadamente a una ley de contornos del puente dada por $X(z,t)=X_0+A$

$\cos(2\pi t/T) \sin(2\pi z/L)$, siendo A una pequeña amplitud (algunas décimas de mm), T el periodo (15 s) y L la longitud de la columna (85 mm).

Aunque de la Fig. 6 pudiera concluirse que la columna líquida está suficientemente quieta para considerarla un cilindro patrón, para el fino análisis que aquí se persigue hay que tener en cuenta el pequeño movimiento residual y elegir una región y un instante para los estudios tanto temporales como espaciales donde las condiciones sean lo más parecidas posible a la de un cilindro rígido. La Fig. 7, que muestra un detalle muy ampliado de la Fig. 6, sirve de ayuda en esta elección.

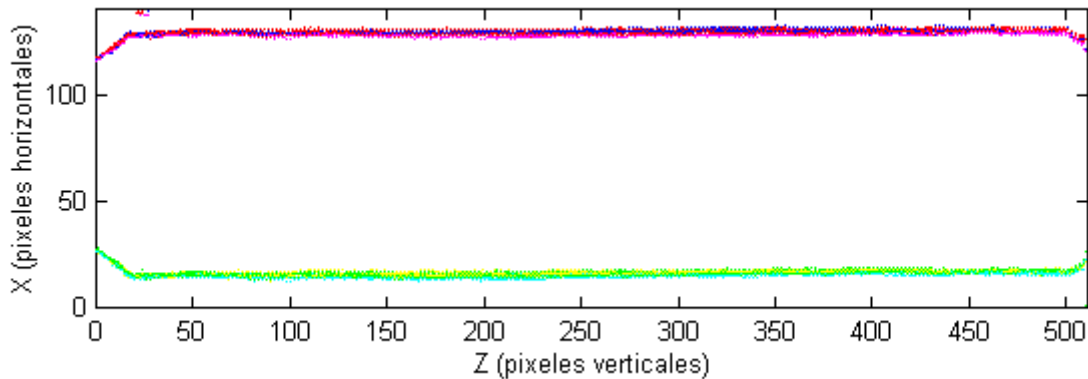


Fig.6. Evolución espacio-temporal del puente al final del experimento TEXUS-33. Superposición de los contornos de 10 imágenes durante un ciclo residual (15 s de periodo).

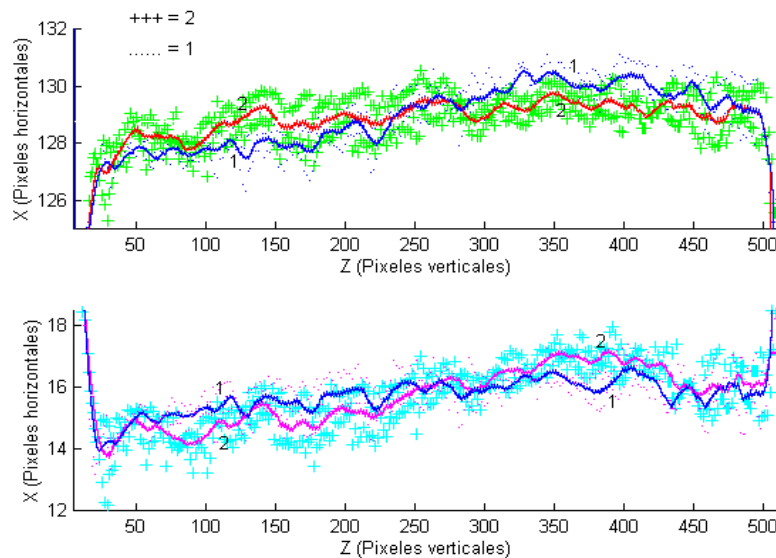


Fig.7. Misma evolución espacio-temporal de la Fig. 6, pero mostrando sólo dos instantes separados un semiperiodo. Las nubes de puntos son las posiciones de los bordes, cuya incertidumbre espacial es $\sigma_z = \pm 1$ píxel, y las líneas gruesas son un filtrado mediante una media de cinco puntos correlativos, para mostrar que entre ambos bordes hay una deformación de una amplitud cercana a 1 píxel.

Para el estudio de la incertidumbre temporal se deberá elegir por lo tanto una zona del puente donde la derivada parcial del borde X respecto del tiempo t sea nula, es decir, en las proximidades de un nodo, donde $2\pi z/L = n\pi$, eligiéndose el punto medio del puente. Sin embargo, al llevar a cabo el estudio de la incertidumbre temporal a lo largo de toda la parte superior del puente, se observó que en las proximidades del nodo la incertidumbre no era

la menor (Fig. 8a), debido a que la incertidumbre temporal en la determinación de un borde es del mismo orden de la amplitud del movimiento residual. En cambio, si lo que se estudia es la incertidumbre temporal de la diferencia de posiciones de los bordes, se comprueba que la incertidumbre disminuye al no depender del sincronismo horizontal, y que el planteamiento era correcto, puesto que se aprecia claramente un mínimo en las proximidades de los nodos (Fig. 8b), del orden de $\sigma_x = 0,2$ píxeles. Esta misma figura es muy representativa del movimiento residual del puente, observándose claramente la zona de vientres y nodos y el valor de la amplitud A antes mencionada.

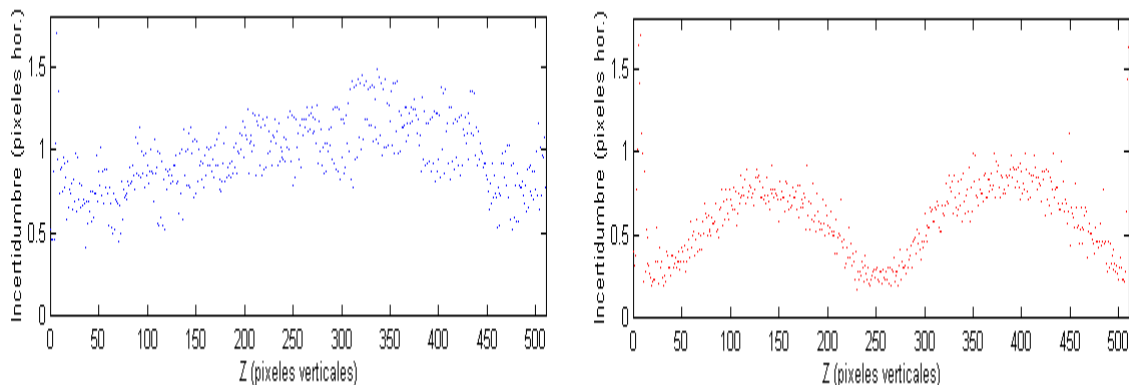


Fig.8. a) Incertidumbre temporal σ_t del borde superior del puente, b) Incertidumbre temporal σ_t de la diferencia entre bordes del puente

Si se quiere realizar un estudio fino de la incertidumbre espacial se deberá elegir también una zona del puente en la que se cumpla que derivada parcial del borde $X(z,t)$ respecto de z sea nula, es decir, donde $2\pi z/L = (2n-1)\pi/2$, habiéndose elegido $z=L/4$, en el instante en el que la velocidad fuese mínima, es decir la amplitud máxima.

El estudio de la incertidumbre espacial también mostró tres casos diferentes. Si se consideran todos los puntos de la parte superior (o inferior) del puente en un intervalo de la zona mencionada, resulta una incertidumbre del orden de 0,6 píxeles (Fig.9). Si sólo se analizan las líneas pares de ese mismo intervalo, para evitar así la incertidumbre introducida por el sincronismo vertical, se obtiene un valor de unos 0,4 píxeles, y si sólo se estudia la diferencia entre ambos bordes con el fin de evitar también la incertidumbre introducida por el sincronismo horizontal de la señal de vídeo, resulta una incertidumbre de unos 0,2 píxeles (Fig.9), como en el caso de la incertidumbre temporal (Fig. 8b).

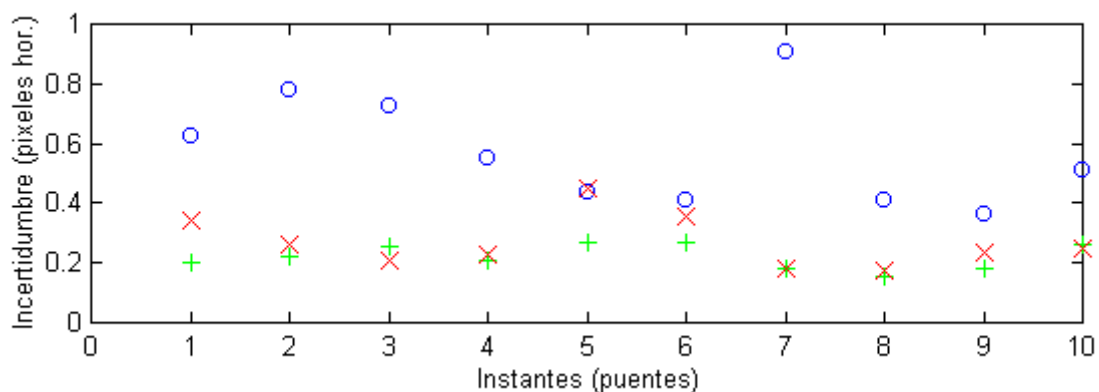


Fig. 9. Representación de la incertidumbre espacial, utilizando todas las líneas de la parte superior ('o'), las líneas pares de la parte superior ('x') o la diferencia de las líneas pares de ambos bordes ('+').

Por lo tanto la incertidumbre introducida por la señal de vídeo es mínima y de valor 0,2 píxel si se restringe el análisis a la diferencia entre los bordes (ley de radios), y se tienen en cuenta sólo las líneas de misma paridad (quedando algo menos de 256 puntos para el perfil de radios de la columna). Como muestra indiscutible de la finura de este análisis, en la Fig. 10 se representa la diferencia entre los dos bordes de las dos mismas imágenes de la Fig. 7, y lo que allí parecía ruido se aprecia aquí como una oscilación (dos instantes en contrafase) de amplitud $A=1,0\pm 0,2$ píxeles.

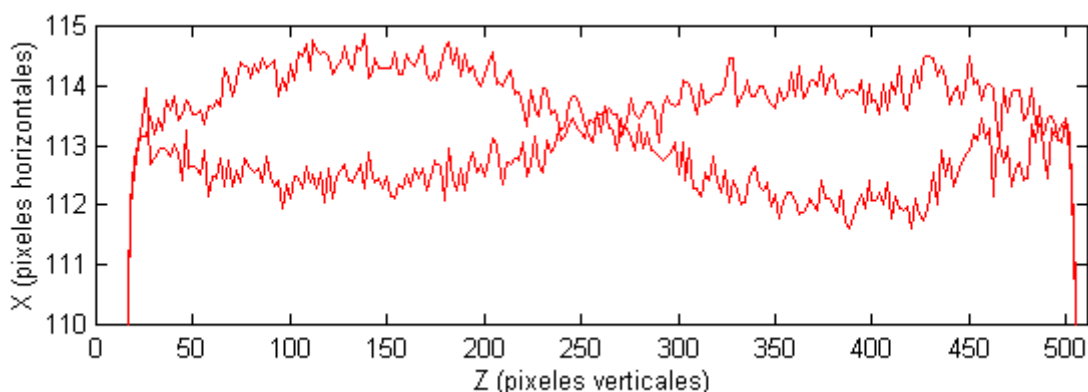


Fig.10. Representación de la evolución espacio-temporal de la diferencia entre los bordes utilizando líneas de idéntica paridad (los mismos 2 instantes representados en la Fig.7).

5. FUNCIONALIDADES DEL PROGRAMA VIDEODAQ

Antes de comenzar el análisis de una imagen, es necesario ajustar una ventana a aquella parte de la misma que interese, ya sea el contorno del puente líquido, o la cuadrícula de fondo, o la varilla de referencia del movimiento armónico al que esta sometido el puente, o en general a cualquier parte de la imagen de la que se desee extraer algún tipo de información. Esta ventana se fija de una manera sencilla, ajustando las esquinas superior izquierda (x_{ul}, y_{ul}) e inferior derecha (x_{dr}, y_{dr}), directamente por medio de un curso gráfico sobre el monitor en el que aparece la imagen que se desea analizar. Dentro de dicha ventana se pueden hacer análisis de líneas horizontales (que al coincidir con las líneas de vídeo son las más fáciles) y/o análisis de líneas verticales.

5.1. Análisis de una línea horizontal

Una vez fijada la ventana de tal forma que el objeto de estudio sea el contorno del puente líquido, el primer parámetro que utiliza el programa es el que fija el ancho de borde (w_border). Mediante este parámetro se define la zona de trabajo, que consiste en las franjas interiores a la ventana delimitadas por los límites laterales de la misma (x_{ul} y x_{dr}) y cuyo ancho es w_border (franjas comprendidas entre las líneas 1 y 3 de la fig. 11b), en el interior de estas franjas debe encontrarse el contorno del puente.

Para la extracción del contorno el programa sigue un procedimiento basado en el análisis del nivel de grises de las líneas horizontales, puesto que de este modo se puede determinar donde se encuentra el borde, por el cambio de blanco a negro o viceversa. Este análisis se lleva a cabo individualmente para cada línea horizontal de la siguiente forma:

1. Extracción del nivel de grises de la línea. Denominaremos para la simplificación de la notación en los apartados posteriores con la variable x_i la posición del píxel i siendo g_i el nivel de gris que le corresponda.
2. Derivación numérica de los valores discretos que proceden de la extracción anterior, mediante el algoritmo de la derivada centrada:

$$\left. \frac{dg}{dx} \right|_{x=x_i} = \frac{g_{i+1} - g_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (2)$$

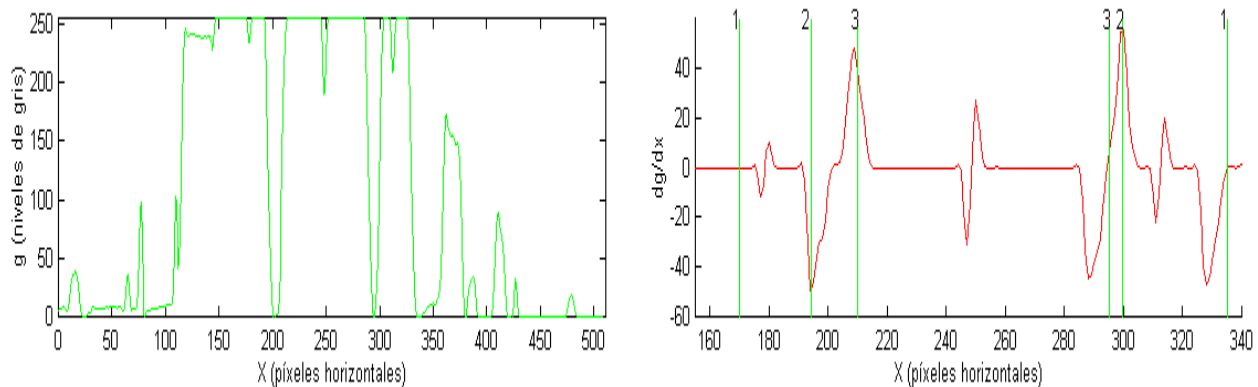


Fig. 11. a) Nivel de gris de una determinada línea horizontal procedente de una imagen de un puente líquido, b) Derivada primera del perfil de niveles de gris.

3. Para la localización del borde el programa utiliza un segundo y tercer parámetro ajustables, umbrales superior e inferior de derivadas, thr_r y thr_l (líneas horizontales situadas en 30 y -30 en la Fig. 11b). Estudiando la zona más cercana al límite de la ventana (líneas 1 de la fig. 11b), cuya derivada sea menor o mayor que dichos umbrales. Con esto queda muy reducido el intervalo de puntos donde se encuentra el borde. Para determinar la situación exacta del borde se localiza el valor mínimo de la derivada, x_o y sus cuatro puntos adyacentes, dos anteriores y dos posteriores, ajustándose los cinco puntos mediante una parábola de segundo grado:

$$g(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (3)$$

donde los coeficientes a_0 , a_1 y a_2 se obtienen mediante una aproximación polinómica por mínimos cuadrados.

Nótese que se localizan dos bordes del puente para cada línea horizontal k , uno al lado izquierdo (x_{p1}) y otro al derecho (x_{p2}), o uno superior y otro inferior si se considera girada 90° la imagen. Los puntos definidos como x_{p1} y como x_{p2} forman dos series de puntos discretos que se utilizan para definir las funciones discretas perfil-de-radios (R_k) y perfil-de-centros (C_k), para cada línea horizontal k tal que:

$$r(z_k) = \frac{x_{p1}(z_k) - x_{p2}(z_k)}{2} \quad \text{y} \quad c(z_k) = \frac{x_{p2}(z_k) + x_{p1}(z_k)}{2} \quad (4)$$

El programa presenta la opción de realizar un seguimiento temporal de las funciones anteriormente descritas, tanto para una única línea horizontal como para un conjunto de ellas, creando un fichero que contiene el tiempo, los radios y la posición de los centros, así como una representación gráfica de dicha evolución en tiempo real. Simplemente esta prestación de *Videodaq* de presentar en tiempo real y almacenar los radios 25 veces por segundo, probada por primera vez en el centro de control espacial europeo para el Spacelab-D2 en 1994, ha demostrado ser muy valiosa para el seguimiento de los experimentos en tiempo real por el investigador. El análisis de Fourier de estas series temporales se efectúa en diferido con un programa genérico de cálculo numérico y proceso de señales como *Matlab*.

5.2. Extracción del contorno

Si se hace variar el número de línea de vídeo k desde el límite superior de la ventana definida en un principio hasta el inferior de la misma se obtendrá el contorno limitado por esta ventana, es decir, para cada línea se obtendrán dos valores correspondientes a cada lado de la columna líquida y de los discos soporte en los extremos. Para realizar el análisis del contorno líquido primero hay que encontrar los bordes angulosos de los discos soporte y luego filtrar el ruido de la señal ajustando la serie de puntos (unos 200 o 250, al ser cada dos píxeles) por un desarrollo de Fourier, que será impar para evitar las discontinuidades. La función impar que se desarrollará contendrá al contorno en uno de sus semiperíodos.

El desarrollo de Fourier correspondiente a una función impar es:

$$f(z) = \sum_{j=1}^n B_j \sin\left(\frac{2\pi jz}{P}\right) \quad (5)$$

donde $P=2L$ y

$$B_j = \frac{4}{P} \sum_{z=1}^L R(z) \sin\left(\frac{2\pi jz}{P}\right) \quad (6)$$

Se deben tener en cuenta dos casos diferentes, ya sean los discos iguales o bien estos tengan diferentes radios (Fig. 12).

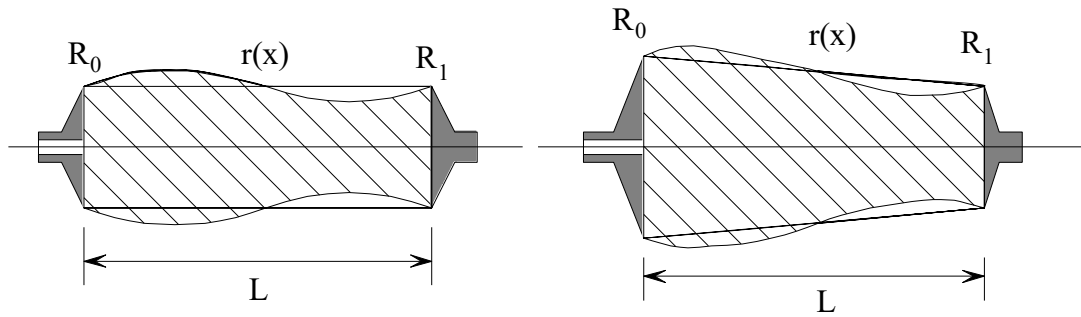


Fig. 12. Representación del puente líquido con radios de discos iguales y diferentes.

- a) Los radios de los discos son iguales. Para poder incluir el contorno en una función impar deberemos colocar sus límites en el eje de abscisas, de esta forma el punto común a uno y otro semiperíodo coincidirán sin que exista por lo tanto un salto de valores. Para esto restaremos a la función la constante R_0 , como se aprecia en la Fig. 12. Por lo tanto para estudiar las variaciones relativas de la columna líquida respecto a la superficie cilíndrica se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{r(z)}{R_0} - 1 = \sum_{j=1}^n B_j \sin\left(\frac{2\pi j z}{P}\right) \quad (7)$$

- b) Si los radios de los discos son diferentes y las deformaciones pequeñas interesa estudiar las variaciones relativas del puente líquido respecto de la superficie cónica engendrada por la recta que une los extremos de los discos. Para adimensionalizar en este caso utilizaremos el radio medio R_0 , resultando ser las variaciones relativas las definidas por la expresión:

$$\frac{r(z)}{R_0} - \left(\frac{R_1 - R_2}{L}\right) \frac{z}{R_0} - \frac{R_2}{R_0} = \sum_{j=1}^n B_j \sin\left(\frac{2\pi j z}{P}\right) \quad (8)$$

El valor a elegir para n depende del número de términos que se supongan relevantes para el análisis. Así por ejemplo puede demostrarse [4] la relación que existe entre el primer coeficiente, B_1 y el volumen del puente líquido, V :

$$B_1 = \frac{3}{\pi R_0^2 L} V - 1 \quad (9)$$

siendo R_0 el radio medio de los discos. Análogamente, existe [4] una correspondencia entre el segundo coeficiente del desarrollo, B_2 y la aceleración axial, medida por el número de Bond, Bo :

$$B_2 = \frac{Bo}{\frac{\pi}{\Lambda} - \frac{\pi^3}{\Lambda^3}} \quad \text{con} \quad Bo \equiv \frac{\rho g R_0^2}{\sigma} \quad (10)$$

Es de interés observar cómo varían estas variables a lo largo del experimento, pues en ellas se condensa bastante información sobre el estado del puente líquido y de como es su evolución, para realizar este

seguimiento, y utilizando las correspondencias anteriormente expuestas, se estudian las evoluciones de los diferentes coeficientes del desarrollo de Fourier con el tiempo. Posteriormente la evolución temporal de estos coeficientes se analiza también mediante un nueva serie de Fourier para mejor detectar frecuencias propias o de excitación.

Hay que destacar la importancia que tiene localizar con precisión los puntos donde acaban los discos y comienza el puente líquido, ya que si la determinación de este punto no se logra con suficiente precisión toda la fineza de los cálculos anteriormente descritos se pierde, modificando a su vez los resultados posteriores. Con la simple extracción de los puntos del contorno del conjunto formado por puente y disco en su zona de contacto lo que se obtiene es una nube de puntos más o menos clarificadora de la situación de cada uno, pero si se desea obtener más precisión en la determinación puede lograrse, puesto que se cuenta con información redundante, de la forma que a continuación se describe.

Primero se busca el punto medio de la parte del disco con corte en forma de cola de milano estudiando la derivada y buscando su valor máximo, pues es ahí donde estará el punto medio que se desea determinar (Fig. 13a).

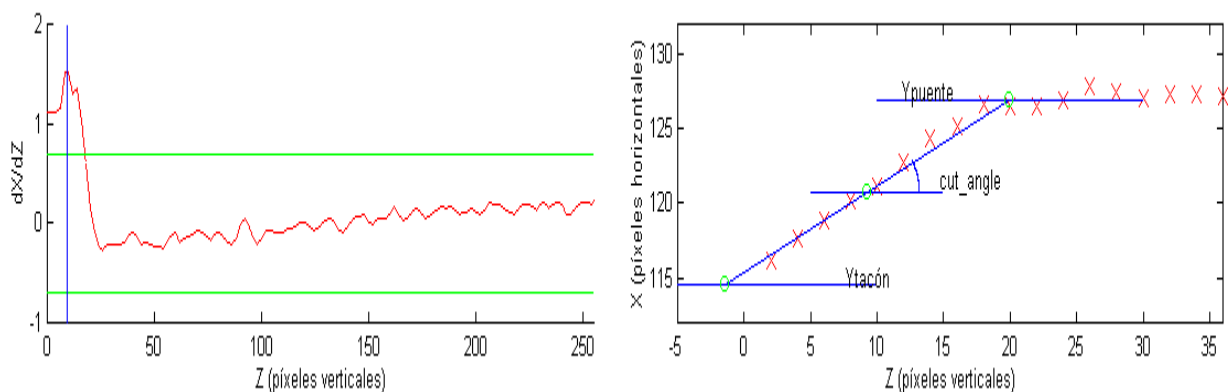


Fig. 13. a) Representación de la primera derivada de la función discreta radio a lo largo del contorno. Las líneas horizontales que se observan en la figura corresponden a los umbrales de derivada utilizados en la localización de los puntos medios de los discos que limitan el puente superior e inferiormente. b) Representación del proceso seguido para localizar el comienzo del puente líquido

A continuación se buscan los valores de las ordenadas del tacón del disco y del comienzo del puente (Fig. 13b), que teóricamente debería coincidir este última con el diámetro del disco. Una vez localizados todos estos elementos se puede proceder a la determinación del comienzo del puente puesto que se conoce el ángulo de corte de la cola de milano (Fig.13b).

La localización de los bordes se realiza mediante el parámetro *cut_angle*, que indica el ángulo de corte en cola de milano de los discos, dato que se conoce a priori, haciendo pasar la recta que forma el ángulo *cut_angle* con la horizontal por el punto medio anteriormente calculado y hallando la intersección con las rectas que representan el tacón del disco y el radio del disco exterior, se obtienen dos puntos que representan el comienzo del disco en forma de cola de milano y el comienzo del puente respectivamente (Fig. 14).

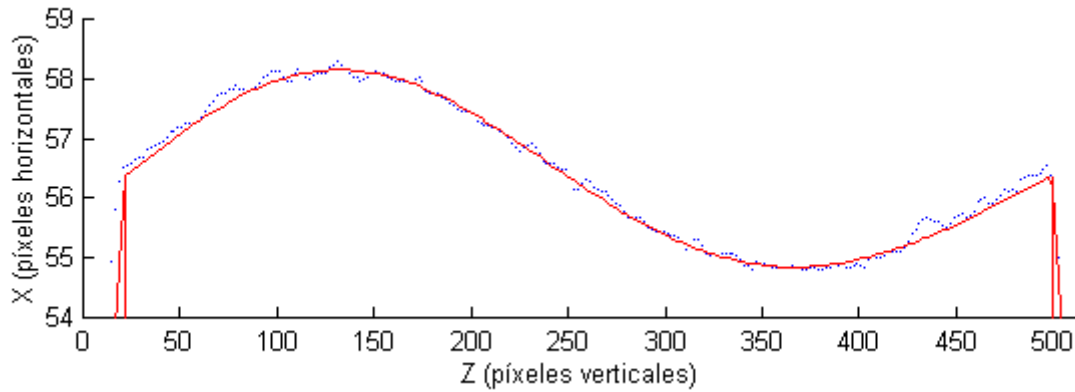


Fig. 14. Representación del radio del puente líquido como función analítica obtenida mediante los cinco primeros términos del desarrollo en serie de Fourier, junto con la nube de puntos original. Nótese la gran compresión de información lograda, pues se ha pasado de 512x512x8 bits de la imagen de la Fig. 1 a los cinco números que dan los coeficientes de Fourier y los dos números adicionales que marcan el comienzo y el final del líquido (7x64 bits).

El análisis temporal puede llevarse a cabo gracias a la capacidad que posee la tarjeta digitalizadora de vídeo de capturar gran cantidad de imágenes en tiempos muy pequeños. La configuración del sistema utilizado para realizar los análisis anteriormente citados es capaz de procesar el contorno de una imagen cada 0,5 segundos, que es almacenada en la memoria RAM del PC, y cuando la cantidad de imágenes excede la capacidad de esta memoria el programa vuelca esta información en el disco duro, si previamente no se ha interrumpido el proceso de almacenamiento.

5.3. Análisis de una línea vertical

Esta opción se creó con el objetivo de analizar la separación vertical entre las líneas de la retícula de fondo y luego se ha utilizado para el seguimiento de la varilla ligada al cohete y que sirve de referencia visual para observar en la imagen móvil el desplazamiento armónico al que se ha sometido el puente líquido en el TEXUS-33 (esta varilla se aprecia en la Fig. 1 y en el esquema de la Fig. 4).

En este análisis se presenta un problema debido a que el barrido de las líneas en vídeo es horizontal y por lo tanto para realizar un análisis vertical se deben leer varias líneas. Para optimizar en tiempo y en memoria este proceso se debe fijar la ventana de trabajo lo más ajustada posible al borde superior de la varilla. Debido a la amplitud del movimiento de la varilla, el programa presenta dos opciones, una de ellas mantiene la ventana fija y la otra opción desplaza automáticamente la ventana solidariamente al borde de la varilla.

La localización del borde se realiza mediante un análisis basado en el cambio de blanco a negro, mediante el estudio de los niveles de gris de forma análoga al realizada en el caso del análisis de una línea horizontal, aunque con menor resolución por las razones ya apuntadas. El programa crea un fichero donde se guarda la posición del borde de la varilla en función del tiempo, para su posterior análisis.

5.4. Parámetros ajustables.

El programa ofrece la opción de modificar ciertos parámetros de ajuste interno para adecuarlos de una forma óptima a la imagen o conjunto de imágenes que en ese momento se esté tratando. Estos parámetros son:

Paridad: Mediante este parámetro se trabaja con las líneas pares o impares, por los motivos anteriormente expuestos.

Umbrales de derivada para análisis horizontal: Definidos como thr_r y thr_l . Este parámetro ofrece la posibilidad de variar el umbral de derivada, consiguiendo con ello un análisis correcto, de otra forma no se lograría localizar los bordes. Este umbral debe modificarse de tal forma que sea superior a las derivadas de la función de niveles de gris en los puntos de límite del puente líquido (Fig.11b).

Ancho de borde: Definido como w_border , representa la distancia en píxeles que se analiza desde el borde de la ventana (Fig. 11b).

Coefficiente de derivada máxima: El producto de este coeficiente por el umbral de derivada, definen el valor máximo de derivada.

Test del borde del centro: Se utiliza para comprobar si el nivel de gris del centro de un borde es menor que el umbral fijado. Sólo puede utilizarse cuando se trabaja con líneas horizontales.

Número de líneas para promedio horizontal: Pueden utilizarse una o tres líneas para el análisis horizontal. Estas líneas se tomarán en las posiciones $n-2$, n y $n+2$, debido a la paridad. La línea en posición n será la que se esté analizando realmente.

Rectificación: Ajusta los niveles de grises, tanto horizontal como verticalmente, mediante la definición de una parábola que pase por cinco puntos logrando así mayor precisión.

Umbrales de derivada para análisis vertical: De forma análoga al del análisis horizontal.

Límites auto/manual: Como la ventana en el análisis vertical debe ser lo más pequeña posible, este parámetro permite seguir a la varilla en su movimiento.

Número de líneas para promedio vertical: Análogo al de promedio horizontal.

Umbral de derivada para el análisis de los discos: Definido como thr_edge . Es el umbral utilizado para la localización de los discos, como anteriormente se ha explicado (Fig.13b).

Ángulo de corte del disco: Definido como cut_angle . Es el ángulo de corte en forma de cola de milano de los discos que limitan el puente por su parte superior e inferior.

6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se trataba de desarrollar una herramienta para el análisis fino y automatizado de las imágenes de vídeo que constituyen la práctica totalidad de la información que proporcionan los escasos experimentos en el espacio que pueden realizarse hoy día.

Para no tener que entrar en detalles característicos del experimento TEXUS-33 (o de otros realizados en otros cohetes o en el Spacelab), se va a evaluar el resultado de este trabajo mediante dos tests: la cuantificación de la axilsimetría de la columna líquida y la cuantificación de la antisimetría de la deformación en el experimento TEXUS-33.

Axilsimetría del puente líquido

Si las fuerzas laterales son despreciables, es decir, si como en nuestro caso no se fuerza a propósito en esa dirección y no hay perturbaciones incontroladas, el puente líquido debería ser axilsimétrico, esto es, de contorna

simétrico respecto a su eje longitudinal. Pero en la realidad siempre hay perturbaciones laterales incontroladas (deriva del cohete, vibraciones de otros equipos), e incluso a veces se desea excitar una deformación no axilsimétrica, como en el TEXUS-29 donde se centrifugaba una columna excéntrica.

En cualquier caso, si se quiere cuantificar la desviación de la axilsimetría hay que conocer cuál es la resolución disponible en el análisis de imágenes para este propósito, por lo que hay que estudiar cómo evoluciona la línea central o eje aparente de la columna (semisuma de las posiciones de los bordes del puente líquido). Como ejemplo, se presenta en la Fig. 15 el contorno de la columna líquida en diferentes instantes de un periodo (45 s), el último de los cinco excitados a propósito durante el TEXUS-33, y las correspondientes líneas de centros, pudiéndose apreciar tanto la axilsimetría aquí aludida como la antisimetría de las deformaciones radiales.

Como ya se ha estudiado anteriormente, la incertidumbre en la semisuma de bordes (línea de centros) es la misma que la de un borde, $\sigma=0,8$ píxeles, no así la de la semidiferencia de bordes (línea de radios) en que la incertidumbre disminuye a $\sigma=0,2$ píxeles por desaparecer la contribución del sincronismo horizontal. Éstas son las incertidumbres asociadas a la localización de un punto; obviamente, si se ajustan los 200 o 250 puntos disponibles para cada perfil (de línea de centros o de línea de radios) por una función sencilla (una parábola para las deformaciones de la línea de centros o una senoide para las deformaciones de la línea de radios), la incertidumbre será más de un orden de magnitud menor por el efecto de la redundancia (inversamente proporcional a la raíz del número de puntos, aproximadamente).

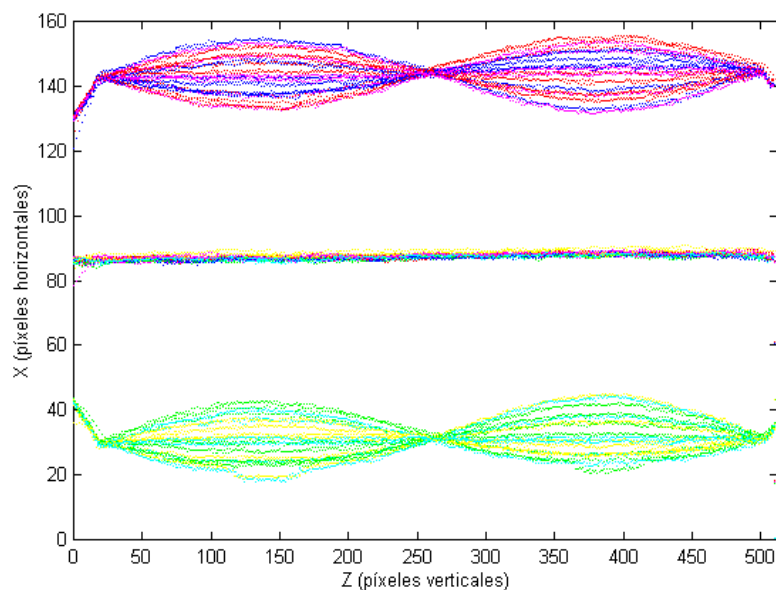


Fig.15. Representación de 18 instantes diferentes en la evolución cíclica del puente líquido durante un periodo (45 s) del movimiento armónico al que fue sometido en el TEXUS-33.

Esta axilsimetría era esperada antes del experimento, pues se sabía de la experiencia de vuelos anteriores que no había contribuciones laterales incontroladas de importancia. Sin embargo, del análisis pormenorizado de todos los datos disponibles del vuelo del TEXUS-33 surgió un interrogante: los microacelerómetros montados en el cohete (aunque lejos del experimento) indicaban que había existido una aceleración lateral muy importante, creciendo desde el principio hasta llegar a valores de $80 \mu g$, fácilmente detectables con nuestro sistema de alta precisión de análisis de imágenes ($80 \mu g$ hubieran dado lugar a una deformación parabólica de la línea de

centros de 2,5 píxeles de flecha central, siendo de 0,2 píxeles nuestra resolución). Tras varias comprobaciones con los responsables de los diferentes subsistemas y operaciones del TEXUS, resultó que en este vuelo la deriva principal del cohete tuvo lugar precisamente en la dirección lateral coincidente con la de visualización, por lo que esta deformación lateral no aparece directamente en la imagen, y la contribución de segundo orden transversal (en el plano de la imagen) debida a la deformación anteroposterior era demasiado pequeña para ser medible.

Antisimetría de la deformación radial

Para pequeñas deformaciones radiales (la máxima en el TEXUS-33 era del 9%, y el límite de estabilidad para esa configuración era del 18%), y debido a la necesaria conservación del volumen de líquido, la deformada del primer modo es prácticamente un periodo completo de la función seno. Las contribuciones de los modos superiores decaen rápidamente con el número de orden si no se excita en las proximidades de su frecuencia propia, así que basta considerar la del segundo modo, que es simétrica respecto al plano medio entre los discos.

Una manera de evaluar las contribuciones del segundo modo y de los efectos no lineales consiste en estudiar la desviación de la deformada respecto a la antisimetría, procediendo a localizar el nodo ((punto medio entre los discos) y a sumar las deformaciones respecto al cilindro de las dos mitades del puente líquido, con lo que en primera aproximación se anulan entre sí, dejando un ruido residual de unos 0,3 píxeles, que al ser del mismo orden de la máxima resolución, no permite dilucidar sobre las contribuciones de segundo orden antedichas. Sin embargo, convendría profundizar en este tipo de análisis, ya que esta incertidumbre puede deberse en parte a la dificultad en la localización del punto nodal del perfil del puente en cada instante, sujeto a la gran incertidumbre vertical, que es de 2 píxeles, como ya se ha mencionado antes.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis alumnos José Emilio Moreno, Juan Manuel Paíno y Manuel Ramos su imprescindible colaboración en el desarrollo y operación del programa *Videodaq*, a partir de elementos e ideas ya formuladas por mi co-investigador José Manuel Perales en su Tesis Doctoral. La financiación ha sido parcialmente con cargo al Proyecto ESP92-0001-CP.

REFERENCIAS

1. Martínez, I., Perales, J.M. y Meseguer, J., "Dynamic response of a liquid bridge to an acceleration varying sinusoidally with time", *Lecture Notes in Physics*. En prensa.
2. Martínez, I., Perales, J.M. y Meseguer, J., "Stability of long liquid columns", in *Scientific results of the German Spacelab mission D2*, Sahm, P.R., Jansen, R., Keller, M.H. (Eds.), DFVLR (FRG). En prensa.
3. Perales, J.M., Meseguer, J. & Martinez, I., 1991, Minimum Volume of Axisymmetric Liquid Bridges between Unequal Disks in an Axial Microgravity Field, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 110, pp. 855-861.
4. Martínez, I. & Sanz, A., Experiments with long liquid bridges under microgravity, in *Materials Science under Microgravity*, ESA SP-295, pp. 413-419, 1990.