

## VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO ACÚSTICO DE AERONAVES

Francés Monllor, Jorge <sup>1</sup>; Vera Guarinos, Jenaro <sup>1</sup>; Yebra Calleja, Marisol <sup>1</sup>, Van Oosten, Nico <sup>2</sup>,  
Lillo Cuadrado Alejandra <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal  
Universidad de Alicante  
Escuela Politécnica Superior de Alicante

<sup>2</sup> ANOTEC Consulting S. L

Email: [jfmonllor@ua.es](mailto:jfmonllor@ua.es); [jenaro@disc.ua.es](mailto:jenaro@disc.ua.es); [myebra@dfists.ua.es](mailto:myebra@dfists.ua.es); [nico@anotecc.com](mailto:nico@anotecc.com); [alc17@alu.ua.es](mailto:alc17@alu.ua.es)

### Resumen

En este trabajo se pretende validar el posicionamiento y la localización de aeronaves durante las maniobras de aterrizaje y despegue, para ello se tienen en cuenta la metodología empleada en un trabajo previo donde se determinaron los parámetros geométricos y cinemáticos de la trayectoria de aeronaves a partir de los registros de niveles de presión sonora.

La validación del método se lleva a cabo a partir de medidas “in situ” monitorizadas con un GPS diferencial en tiempo real, y su comparación con la información que extraemos de los registros sonoros realizados en un punto de tierra durante las citadas maniobras.

**Palabras-clave:** localización, Doppler, aviones

### Abstract

This paper aims to validate the aircraft positioning and location during landing and take off maneuvers, the methodology used in a previous work is taken into account to identify the geometry and cinematic parameters of the path of aircraft from records sound pressure levels.

The method validation is carried out from measures in situ with a real time differential GPS, and their comparison with results extracted from sound recordings obtained in a point of land during those maneuvers.

**Keywords:** positioning, Doppler, aircraft

## 1 Introducción

La aviación es el medio de transporte que genera mayor cantidad de energía acústica, asimismo, su dependencia de los aeropuertos, hace que las molestias que se ocasionan en las localidades situadas en las inmediaciones de éstos sean realmente importantes. La percepción del nivel de ruido se relaciona directamente con el modelo de aeronave, la distancia y altura a la que ésta sobrevuela las zonas afectadas. Desde hace dos décadas, varios métodos han sido propuestos para resolver los problemas de localización de fuentes acústicas, muchos de ellos son de gran complejidad computacional y además, arduos y caros de realizar en tiempo real.

## 2 Objetivos

Calcular a partir de los niveles de presión medidos en campo la geometría descriptiva de la trayectoria de sobrevuelo de la aeronave basados en métodos acústicos indirectos como el “Filtro Peine” y el “Efecto Doppler”, explicados en [1]-[2].

Comprobar la fiabilidad de las técnicas de cálculo anteriores, comparando las medidas obtenidas en tiempo real por los ingenieros de la empresa Anotec Consulting.

## 3 Metodología

Para validar el posicionamiento y la localización de aeronaves durante las maniobras de aterrizaje y despegue se ha recurrido a una primera fase de experimentos donde se han registrado las grabaciones de presión en campo sonoro. Al mismo tiempo se monitrozaba en tiempo real la posición real de la aeronave mediante el sistema GPS diferencial instalado en el interior de la misma. En un segundo estadio de este trabajo, los registros de audio han sido analizados y procesados para obtener los parámetros geométricos deseados y poder se contrastados con los valores reales medidos.

### 3.1 Configuración de medida.

Los experimentos se llevaron a cabo en el aeropuerto de Ocaña, situado aproximadamente a 80km al sur de Madrid, éste se caracteriza por el fácil acceso a los puntos de medida, y por no existir área residencial cercana durante este tipo de maniobras. Las distintas operaciones de vuelo fueron realizadas mediante el modelo de aeronave Cessna Citation PH-LAB.

Cabe mencionar que las maniobras realizadas por el piloto no se ajustaron de una manera fiel a lo que se conoce como una maniobra típica de aterrizaje y despegue, ya que la aeronave, en el momento de aterrizar volvía a tomar altura para iniciar un despegue. Para que las técnicas de análisis y procesado sean lo más precisas posibles se ha intentado que el sistema de adquisición se encuentre lo más alineado posible con las trayectorias de acercamiento y alejamiento de la aeronave, durante las grabaciones. Un ejemplo de las desviaciones realizadas durante la maniobra se muestra en la Figura 1.

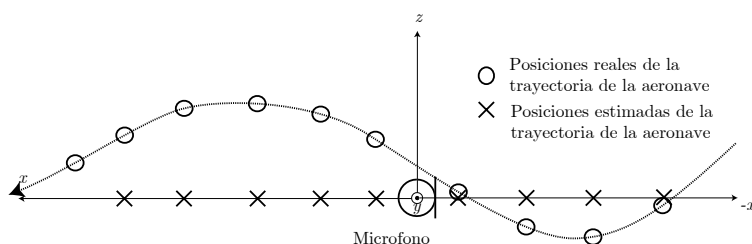


Figura 1: Ejemplo de las desviaciones en la trayectoria durante las maniobras de la aeronave.

La altura del micrófono para la captación de los aterrizajes se situó a 1.5 metros y para los despegues sobre los 5 metros.

A partir de las grabaciones de audio procedentes de las maniobras realizadas por la aeronave Cessna Citation, se analizan las señales para obtener resultados, y así, comprobar la fiabilidad de los resultados obtenidos comparándolos con los obtenidos en tiempo real con el GPS diferencial instalado en el interior de la aeronave.

### 3.2 Caracterización física y acústica de las aeronaves.

El método desarrollado en el Laboratorio de Acústica de la Universidad de Alicante, consiste en determinar por métodos acústicos indirectos, la geometría descriptiva de la trayectoria de sobrevuelo de las aeronaves. A partir del análisis del espectrograma de los registros tomados durante las maniobras (véase Figura 2), se obtienen la velocidad de la aeronave y distintos parámetros geométricos que detallan la trayectoria de vuelo, posición en el suelo, altura sobre el terreno y distancias al micrófono.

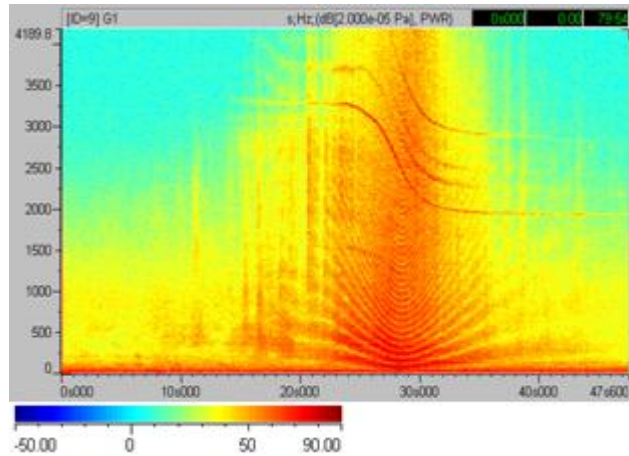


Figura 2: Espectrograma originado por la grabación de un aterrizaje de la aeronave Cessna Citation.

El efecto Doppler, permite estimar la velocidad de aproximación y alejamiento de la aeronave, dada la configuración mostrada en la Figura 3.

Para determinar la velocidad, se seleccionan dos condiciones:  $x$  muy grande y positivo y  $x$  muy grande y negativo, lo cual permite que  $\beta$  se aproxime a 0 y  $\pi$  respectivamente. De esta forma se obtienen dos ecuaciones de las que puede eliminarse una de las incógnitas,  $f$ , y despejarse  $v$ , suponiéndola aproximadamente constante:

$$v = \frac{c - v_w}{\cos \alpha} \frac{f_{-\infty} - f'_{+\infty}}{f_{-\infty} \frac{c - v_w}{c + v_w} + f'_{+\infty}} \quad (1)$$

donde  $c$  es la velocidad del sonido,  $v_w$  es la velocidad del viento,  $f_{-\infty}$  es la frecuencia detectada por el observador cuando el avión se acerca y está todavía lejos y  $f'_{+\infty}$  cuando ya ha pasado y se ha alejado considerablemente. En los aterrizajes, el ángulo de aproximación  $\alpha$  es aproximadamente  $3^\circ$  y en los despegues,  $\alpha$  es aproximadamente  $7.5^\circ$ . En la Figura 4 se muestran las frecuencias anteriormente mencionadas.

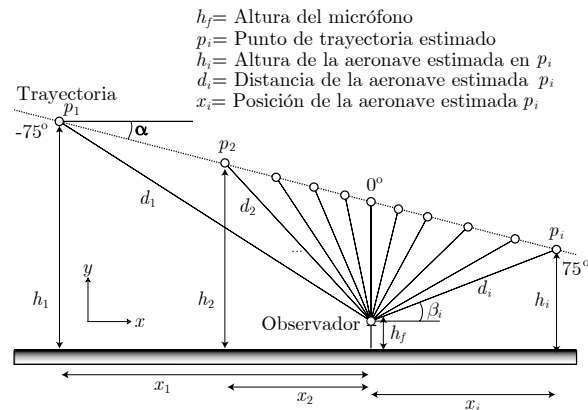


Figura 3: Geometría del sistema.

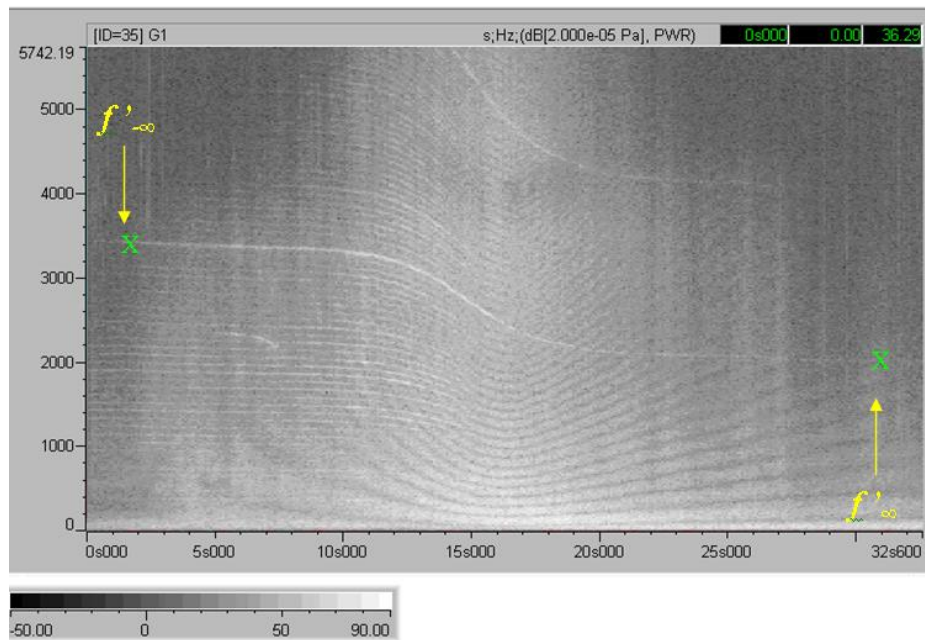


Figura 4: Espectrograma. Señalización de las frecuencias detectadas.

El filtro peine será aprovechado para estimar la altura de la aeronave unos segundos después de pasar por encima del micrófono, aplicando la siguiente ecuación obtenida del análisis del sistema mostrado en la Figura 5.

$$h_r = \sqrt{\frac{2(x^2 + h_f^2) \frac{c^2}{8f_1^2} - \left(\frac{c^2}{8f_1^2}\right)}{2\left(2h_1^2 - \frac{c^2}{8f_1^2}\right)}} \quad (2)$$

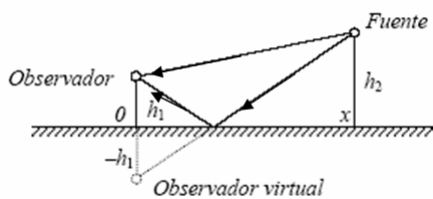


Figura 5: Interferencia entre el sonido directo de la fuente y el reflejado.

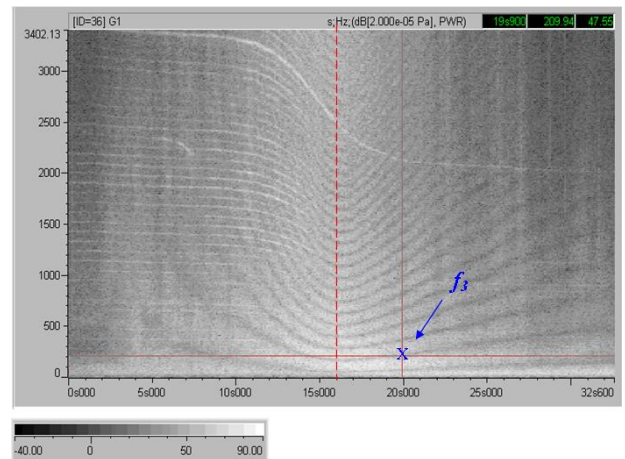


Figura 6: Señalización de la frecuencia  $f_3$

donde  $x$  es la posición de la aeronave en el suelo,  $h_1$  es la altura del micrófono a 1.5 metros y  $f_1 = f_3 / 3$ . Para ello se selecciona del espectrograma la tercera frecuencia cancelada  $f_3$  por se la más claramente visible (véase la Figura 6).

Para obtener la trayectoria de sobrevuelo, se calculan las distintas alturas, distancias y posiciones, tomando como referencia la posición del micrófono y, en instantes tales, que en los ángulos subtendidos por la línea que une la aeronave con el micrófono respecto a la vertical estén equiespaciados. En el presente caso se eligen múltiplos de  $15^\circ$  calculando 11 puntos en total. Debido a la inclinación de  $3^\circ$  que llevan las aeronaves en los aterrizajes, los puntos donde se calculan los parámetros deben corregirse. Para los despegues se realizará la misma corrección pero en  $7.5^\circ$ .

## 4 Resultados

En lo que sigue se va a mostrar los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas, para el modelo de aeronave analizado Cessna Citation PH-LAB, en las maniobras de aterrizaje y despegue.

Los parámetros geométricos se calculan en instantes tales, que los ángulos subtendidos por la línea que une la aeronave con el micrófono respecto a la vertical estén equiespaciados, como se explica en [2]. Se eligen múltiplos de  $15^\circ$ , obteniendo 11 parámetros corregidos en función del ángulo de aproximación. En los despegues el incremento será distinto por ser los ángulos de alejamiento más elevados.

### Aterrizaje nº 1

En la trayectoria analizada en esta maniobra se calcula un ángulo descendente de aproximadamente  $\alpha = 3.6^\circ$ . La desviación lateral que sufre en la alineación con el sistema de adquisición tiene un valor promedio  $D = 24\text{m}$  con  $\sigma_D = 19\text{m}$ , siendo la desviación de  $31 \pm 19\text{m}$  por la izquierda y de  $9 \pm 5\text{m}$  por la derecha del micrófono.

Tabla 1 : Parámetros geométricos obtenidos del aterrizaje nº1.

Ángulo	Altura (m)	Distancia (m)	Posición (m)	Tiempo (s)
<b>-75°+ <math>\alpha</math></b>	110.18	339.18	-321.46	-3.61
<b>-60°+ <math>\alpha</math></b>	99.16	175.57	-146.24	-1.64
<b>-45°+ <math>\alpha</math></b>	95.12	124.15	-82.10	-0.92
<b>-30°+ <math>\alpha</math></b>	92.79	101.37	-45.07	-0.51
<b>-15°+ <math>\alpha</math></b>	91.09	90.88	-17.96	-0.20
<b>0°+ <math>\alpha</math></b>	<b>89.61</b>	<b>87.79</b>	<b>5.51</b>	<b>0.06</b>
<b>15°+ <math>\alpha</math></b>	88.13	90.88	28.99	0.33
<b>30°+ <math>\alpha</math></b>	86.43	101.37	56.09	0.63
<b>45°+ <math>\alpha</math></b>	84.10	124.15	93.12	1.05
<b>60°+ <math>\alpha</math></b>	80.06	175.57	157.26	1.77
<b>75°+ <math>\alpha</math></b>	69.04	339.18	332.48	3.73

A continuación se representan las trayectorias obtenidas con los parámetros calculados para compararlas con las que se obtienen en tiempo real. De forma visual se puede comprobar mejor la precisión de los resultados.

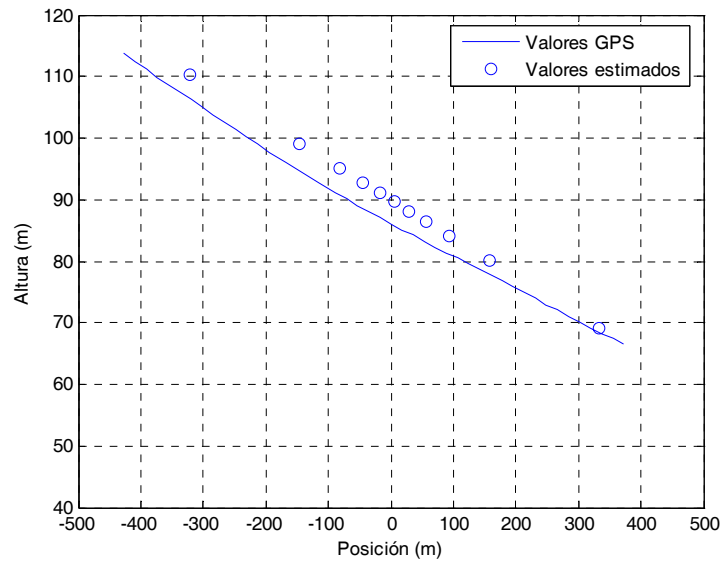


Figura 7: Trayectorias del aterrizaje n°1.

### Aterrizaje n° 2

Se calcula un ángulo descendente de aproximadamente  $\alpha = 4.4^\circ$ . La desviación lateral que sufre en la alineación con el sistema de adquisición es de un valor promedio de  $12.9\text{m} \pm 1\text{m}$  siendo este valor la desviación existente por la izquierda del micrófono.

Tabla 2: Parámetros geométricos obtenidos del aterrizaje n°2.

Ángulo	Altura (m)	Distancia (m)	Posición (m)	Tiempo (s)
$-75^\circ + \alpha$	196.21	584.69	-551.50	-6.24
$-60^\circ + \alpha$	172.99	302.66	-249.73	-2.83
$-45^\circ + \alpha$	164.49	214.01	-139.27	-1.58
$-30^\circ + \alpha$	159.59	174.74	-75.50	-0.85
$-15^\circ + \alpha$	155.99	156.67	-28.82	-0.33
$0^\circ + \alpha$	<b>152.88</b>	<b>151.33</b>	<b>11.61</b>	<b>0.13</b>
$15^\circ + \alpha$	149.77	156.67	52.04	0.59
$30^\circ + \alpha$	146.18	174.74	98.72	1.12
$45^\circ + \alpha$	141.27	214.01	162.49	1.84
$60^\circ + \alpha$	132.77	302.66	272.95	3.09
$75^\circ + \alpha$	109.56	584.69	574.72	6.51

La representación de las trayectorias obtenidas se muestra a continuación.

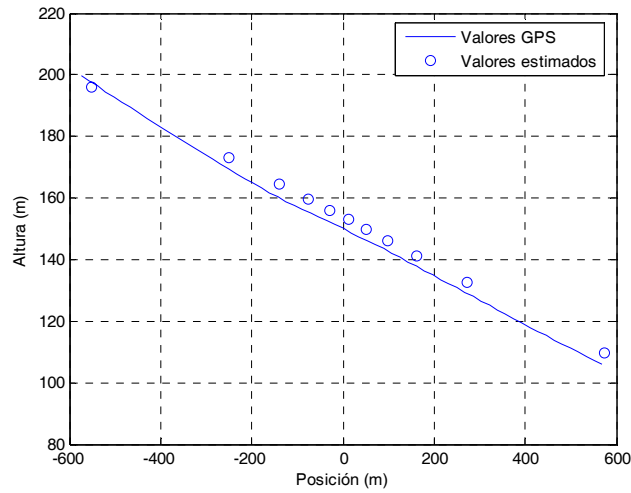


Figura 8: Trayectorias del aterrizaje n°2.

### Despegue n°1

En la trayectoria analizada en esta maniobra se calcula un ángulo ascendente de aproximadamente  $\alpha = 7^\circ$ . La desviación lateral es de un valor promedio de  $14.4\text{m} \pm 4.8\text{m}$  siendo este valor la desviación existente por la derecha del micrófono.

Tabla 3: Parámetros geométricos obtenidos del despegue n°1.

Ángulo	Altura (m)	Distancia (m)	Posición (m)	Tiempo (s)
-67°- $\alpha$	211.89	750.58	-721.50	-10.79
-60°- $\alpha$	234.19	586.55	-539.92	-8.08
-45°- $\alpha$	260.35	414.75	-326.83	-4.89
-30°- $\alpha$	275.45	338.64	-203.80	-3.05
-15°- $\alpha$	286.51	303.62	-113.74	-1.70
<b>0°- <math>\alpha</math></b>	<b>296.09</b>	<b>293.27</b>	<b>-35.74</b>	<b>-0.53</b>
15°- $\alpha$	306.35	303.62	37.01	0.55
30°- $\alpha$	318.99	338.64	126.85	1.90
45°- $\alpha$	336.23	414.75	249.60	3.73
60°- $\alpha$	366.12	586.55	462.20	6.92
67°- $\alpha$	380.29	750.85	650.02	9.73

La representación de las trayectorias obtenidas es la que se muestra a continuación.

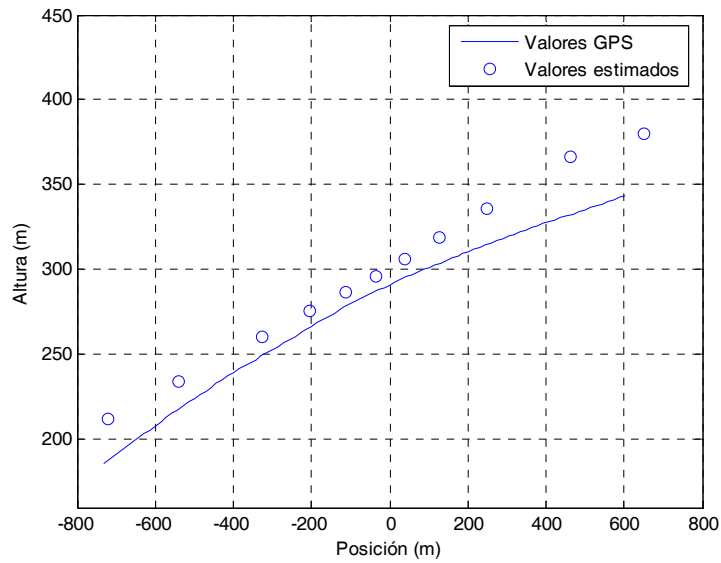


Figura 9: Trayectorias del despegue nº1.

### Despegue nº2

En la trayectoria analizada en esta maniobra se calcula un ángulo ascendente de aproximadamente  $\alpha = 9.5^\circ$ . La desviación lateral tiene un valor promedio  $3.9\text{m} \pm 2.3\text{m}$ , siendo la desviación de  $0.6\text{m} \pm 0.4\text{m}$  por la izquierda y de  $4.3\text{m} \pm 2\text{m}$  por la derecha del micrófono. .

Tabla 4: Parámetros geométricos obtenidos del despegue nº2.

Ángulo	Altura (m)	Distancia (m)	Posición (m)	Tiempo (s)
-67°- $\alpha$	65.99	261.28	-254.06	-3.31
-60°- $\alpha$	76.51	204.18	-191.25	-2.49
-45°- $\alpha$	88.84	144.38	-117.54	-1.53
-30°- $\alpha$	95.96	117.88	-74.98	-0.98
-15°- $\alpha$	101.18	105.69	-43.83	-0.57
<b>0°- <math>\alpha</math></b>	<b>105.69</b>	<b>102.09</b>	<b>-16.85</b>	<b>-0.22</b>
15°- $\alpha$	109.24	105.69	17.44	0.23
30°- $\alpha$	112.27	117.88	48.89	0.64
45°- $\alpha$	116.41	144.38	91.84	1.20
60°- $\alpha$	123.57	204.18	166.23	2.17
67°- $\alpha$	145.40	261.28	220.36	2.87

La representación de las trayectorias obtenidas se muestra a continuación.



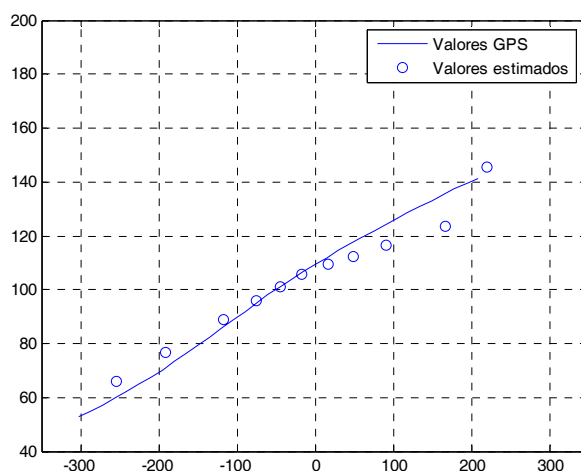


Figura 10: Trayectorias del despegue n°2.

## 5 Conclusiones

Se ha elaborado un método que permite estimar con bastante precisión la posición y localización de aeronaves, mediante el cálculo por métodos empíricos indirectos de los parámetros geométricos que describen la trayectoria, bajo los siguientes condicionantes:

- El rigor de los resultados aumenta cuanto más constante sea el ángulo de inclinación y menor sea la desviación lateral de la aeronave con el sistema de adquisición, lo que en nuestras medidas no ocurre totalmente por ser maniobras de vuelo especiales sometidas a pruebas.
- Los despegues son más inestables, los cambios de pendiente se traducen en pequeños errores en las trayectorias calculadas. Sin embargo, la diferencia de alturas entre los puntos reales y calculados son insignificantes si se consideran las grandes dimensiones de la aeronave.

## Referencias

- [1] Lillo Cuadrado, Alejandra. *Determinación la huella acústica de aeronaves en el entorno de un aeropuerto, mediante el cálculo por métodos empíricos indirectos de la potencia de radiación sonora de los sistemas de propulsión*. Proyecto Fin de Carrera ITTSI, Universidad de Alicante, Junio 2006.
- [2] Lillo Cuadrado, Alejandra; Vera Guarinos, Jenaro; Yebra Calleja, María Soledad. *Determinación de la huella acústica de aeronaves*. Tecniacústica Gandia octubre 2006.
- [3] Miyara, Federico; Cabanellas, Susana; Moscóni, Patricia; Pasch, Vivian, Yanitelli, Marta; Rall, Juan Carlos; Vazquez, Jorge. *“Manchas Acústicas: Ruido de aeropuertos”*. 4tas Jornadas Internacionales Multidisciplinarias sobre Violencia Acústica, realizada en Rosario, Argentina, del 22 al 24 de octubre de 2001.
- [4] Nico van Oosten, Anotec. *Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment*. IMAGINE septiembre 2006.