

Determinación de la distancia óptima entre la antena del radiofaro GP ILS y su antena de control exterior

Optimum distance determination between the ILS glide path antenna and his outside control antenna

Luis Valdés Sanregre¹, Eduardo Tomás González Hernández¹, Ronny Díaz Martínez¹

Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba
Correo electrónico: tomas@tele.cujae.edu.cu

Este documento posee una licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional 

Recibido: 26 de septiembre de 2018 Aprobado: 9 de enero de 2019

Resumen

En el presente trabajo se demuestra que con el emplazamiento de la antena de control exterior (CE) del radiofaro trayectoria de planeo (GP) de los sistemas de aterrizaje por instrumentos (ILS) en el campo lejano (Fraunhofer), la influencia de los factores desestabilizadores es menor que el en campo cercano, pudiéndose de esa manera mejorar la veracidad y la efectividad de este control. Además, se deduce la expresión final para el cálculo teórico del parámetro informativo diferencia de profundidad de modulación (DDM) y se compara con los valores obtenidos en las mediciones reales de la DDM en la trayectoria de planeo del ILS como función de la distancia para determinar la distancia óptima entre el GP y su CE.

Palabras claves: DDM vs distancia (m), veracidad del CE, efectividad del CE

Abstract

In this work paper, the influence of destabilizing factors, of exterior checking antenna (EC) (as part of glide path *Radiobeacon*, GP) in the Instrument Landing System (ILS) placed at far field, is demonstrated to be lower than that for EC placed at near field. This leads to an improvement of the reliability and effectiveness of this control. Moreover, the final expression for theoretical calculus of the informative parameter named as Modulation-Depth Difference (DDM) is obtained and compared with the values achieved by real DDM measures carried out at ILS glide path as a function of distance, in order to determine the optimal distance between the GP and its CE.

Word key: DDM Vs Distancia (m), Accuracy and Effectiveness off the CE

INTRODUCCIÓN

Según datos estadísticos de la Aviación Civil Internacional tomados durante muchos años, la aproximación final y el aterrizaje de las aeronaves constituye la etapa más crítica del vuelo, siendo por ello que los principales aeropuertos a nivel mundial están equipados con sistemas de aterrizaje por instrumentos (ILS) para garantizar la seguridad durante esa etapa del vuelo, así como para incrementar la seguridad de estos. Con la ayuda del ILS

se puede realizar el aterrizaje de las aeronaves tanto en régimen automático, como semiautomático o manual, lo cual requiere del control confiable de los parámetros de salida de los radiofaros del ILS [1].

El principal control y el más confiable se realiza periódicamente con ayuda de un avión-laboratorio pero este tipo de control encarece sustancialmente la explotación de los ILS, siendo por ello que resulta de relativa importancia el control en tierra de los parámetros de salida del ILS.

El ILS está compuesto por un radiofaro localizador (LOC), el cual brinda las señales información sobre el eje de la pista, un radiofaro trayectoria de planeo (GP) que brinda las señales con la información sobre la trayectoria de planeo y dos o tres radiobalizas de marcación, ubicadas en la prolongación del eje de la pista a distancias fijas del umbral que con ayuda de estos últimos se puede determinar la distancia entre la aeronave y el umbral de la pista; aunque para este fin también se pueden utilizar equipos de medición de distancia (DME) asociados al ILS, los cuales brindan de manera ininterrumpida la distancia entre la aeronave y la pista.

Los radiofaros GP disponen de un dispositivo de control exterior (CE), donde el emplazamiento de la antena monitora para dicho CE constituye el objeto de investigación en el presente trabajo con el fin de lograr un aumento de la veracidad y la efectividad de este control.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL RADIOFARO TRAYECTORIA DE PLANEO (GP)

Entre los bloques que conforman al transmisor está el GP terrestre, el cual genera y conforma las señales a transmitir que la entrega a través de cables coaxiales a un arreglo de antena tipo M (superior, media e inferior) conformando dos diagramas de radiación en la banda de UHF moduladas en amplitud con frecuencia de 90 Hz y 150 Hz respectivamente y con polarización vertical. Se diseña de tal forma que la zona de "X señal" en la intersección de los lóbulos en el espacio coincida con el valor donde la DDM sea igual a cero (determinando la trayectoria de planeo de $\theta_d = 3^\circ$) y fuera de este valor la suma de la profundidad de modulación estará en función del desplazamiento angular con respecto al eje de la pista. Es decir, la variación de la profundidad de modulación es función de la elevación (el ancho del sector es de $\pm 0,24 \theta_d$ equivalente a $\pm 17,5\%$ de la profundidad de modulación).

La señal en cuestión es recibida en el receptor de trayectoria de planeo de a bordo de la aeronave (figura 1), de donde es enviada al instrumento de pilotaje en la cabina del piloto o a la computadora de abordo (piloto automático) cuyo esquema en bloque del mismo se representa de forma simplificada a continuación [2,3].

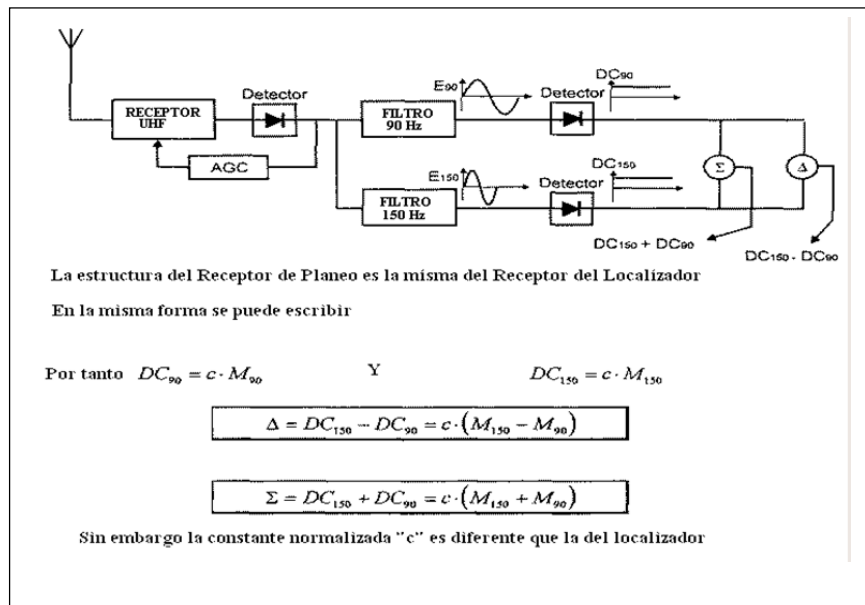


Fig. 1. Receptor de trayectoria de planeo del equipo de a bordo de la aeronave

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para valorar el grado de precisión del parámetro informativo del Radiofaro GP, resulta conveniente obtener una expresión sencilla que nos permita valorar el error permisible en la medición de la diferencia de profundidad de la modulación, DDM en función de la distancia en metros, $D(m)$.

Para ello se parte de la expresión de la intensidad del campo del canal Σ que se obtiene en el receptor del procesamiento de la señal UHF que garantiza el trabajo del canal de la GP (figura 1) que puede ser representada de la forma siguiente [4,5]:

$$\tilde{E}_{\Sigma} = 2\tilde{L}_m \cos \omega t + \frac{1}{2}\tilde{L}_m \cos(\omega - \Omega_1)t + \frac{1}{2}\tilde{L}_m \cos(\omega + \Omega_1)t + \frac{1}{2}\tilde{L}_m \cos(\omega - \Omega_2)t + \frac{1}{2}\tilde{L}_m \cos(\omega + \Omega_2)t \quad (1)$$

donde:

$$L = L_0 + L_1 + i L_2 \quad (2)$$

L_0 : Amplitud de la intensidad del campo de la onda monocromática del canal suma (Σ) en la zona lejana, en ausencia de modulación y estando desconectado uno de los canales de entrada del puente suma – diferencia del radiofaro GP.

L_1 : Componente sinfásica de las desviaciones de la amplitud de la intensidad del campo.

L_2 : Desviación cuadrática de la onda monocromática.

La amplitud de la Intensidad del campo del canal diferencial puede ser escrita de la forma siguiente:

$$\tilde{E}_{\Delta} = \frac{1}{2}\tilde{M}_m \cos(\omega - \Omega_1)t + \frac{1}{2}\tilde{M}_m \cos(\omega + \Omega_1)t - \frac{1}{2}\tilde{M}_m \cos(\omega - \Omega_2)t - \frac{1}{2}\tilde{M}_m \cos(\omega + \Omega_2)t \quad (3)$$

donde:

$$\tilde{M}_m = M_0 + M_1 + i M_2 \quad (4)$$

M_0 : Amplitud de la intensidad del campo de la onda monocromática del canal diferencial (Δ) en la zona lejana, en ausencia de modulación y estando desconectado uno de los canales de entrada del puente “suma – diferencia” del radiofaro GP.

M_1 : Componente sinfásica de las desviaciones de la amplitud de las oscilaciones monocromáticas.

M_2 : Componente cuadrática del incremento de la amplitud de la oscilación monocromática.

Como resultado de la suma espacial de los campos de los dos canales se encuentra:

$$\tilde{E} = \tilde{E}_{\Sigma} + \tilde{E}_{\Delta} \quad (5)$$

Sumando las expresiones respectivas:

$$E = 2\tilde{L} \cos \omega t + \frac{1}{2}(\tilde{L} + \tilde{M})_m \cos(\omega - \Omega_1)t + \frac{1}{2}(\tilde{L} + \tilde{M})_m \cos(\omega + \Omega_1)t + \frac{1}{2}(\tilde{L} - \tilde{M})_m \cos(\omega - \Omega_1)t + \frac{1}{2}(\tilde{L} - \tilde{M})_m \cos(\omega + \Omega_1)t \quad (6)$$

En el receptor y en los filtros se separan las componentes espectrales y después de la detección se haya el módulo de sus amplitudes (diferencia de la profundidad de modulación, DDM). Obviamente que con la separación del valor duplicado de la amplitud de la frecuencia portadora, se obtiene:

$$DDM = \frac{m}{4} \left(\frac{|\tilde{L} + \tilde{M}|}{|\tilde{L}|} - \frac{|\tilde{L} - \tilde{M}|}{|\tilde{L}|} \right) \quad (7)$$

Utilizando las relaciones 2 y 4 se presenta la expresión 7 de la forma siguiente:

$$DDM = \frac{m}{4} DDM = \frac{m}{4} \left[\frac{\sqrt{\left(1 + \frac{L_1}{L_0} + \frac{M_0}{L_0} + \frac{M_1}{L_0}\right)^2 + \left(\frac{L_2}{L_0} - \frac{M_2}{L_0}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 + \frac{L_1}{L_0}\right)^2 + (L_2)^2}} - \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{L_1}{L_0} - \frac{M_0}{L_0} - \frac{M_1}{L_0}\right)^2 + \left(\frac{L_2}{L_0} - \frac{M_2}{L_0}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 + \frac{L_1}{L_0}\right)^2 + \left(\frac{L_1}{L_0}\right)^2}} \right] \quad (8)$$

Se introducen las representaciones siguientes:

$$N_1 = L_1 + M_1; \quad N_2 = L_2 + M_2; \quad N_3 = L_1 - M_1; \quad N_4 = L_2 - M_2 \quad (9)$$

Además, se nota que el caso en que el punto de observación se encuentra en el plano de la trayectoria de planeo entonces se asume que $M_0 = 0$ y la expresión (9) quedaría de la forma siguiente:

$$DDM = \frac{m}{4} \left[\frac{\sqrt{\left(1 + \frac{N_1}{L_0}\right)^2 + \left(\frac{N_2}{L_0}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 + \frac{L_1}{L_0}\right)^2 + \left(\frac{L_2}{L_0}\right)^2}} - \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{N_3}{L_0}\right)^2 + \left(\frac{N_4}{L_0}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 + \frac{L_1}{L_0}\right)^2 + \left(\frac{L_2}{L_0}\right)^2}} \right] \quad (10)$$

Con el aumento de la distancia entre las antenas del radiofaro GP y la de su control exterior, los valores de N_1, N_2, N_3, N_4, L_1 y L_2 disminuyen, tendiendo a cero. Es por esto que para distancias superiores a la distancia en que se instala la antena de control exterior de acuerdo con las condiciones técnicas para los ILS se satisface la desigualdad:

$N_i \ll L_0$ y $L_j \ll L_0$ donde: $i = 1, 4$ y $j = 1, 2$. De esta manera la expresión (10) se simplifica y quedaría de la forma siguiente:

$$DDM = \frac{m}{4} \left[\frac{1 + \frac{N_1}{L_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{N_1}{L_0}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{N_2}{L_0}\right)^2 - 1 - \left(\frac{N_3}{L_0}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{N_3}{L_0}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{N_4}{L_0}\right)^2}{1 + \frac{L_1}{L_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{L_1}{L_0}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{L_2}{L_0}\right)^2} \right] \approx$$

$$DDM \approx \frac{m}{4} \left(\frac{2M_1}{L_0} + \frac{2M_1L_1}{L_0^2} + \frac{2M_1L_2}{L_0^2} \right) \left(1 - \frac{L_1}{L_0} \right) \approx$$

$$\approx \frac{m}{2} \frac{M_1}{L_0} + \frac{M_2L_2}{L_0^2} \quad (11)$$

De esta manera se hallaron los valores de M_1, M_2, L_2 , y L_0 , los cuales se determinan con las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} \dot{E}_\Sigma &= E_m^\Sigma [F_{\Sigma(\Delta)} - \rho_R^\Sigma - i \rho_I^\Sigma] \\ \dot{E}_\Delta &= E_m^\Delta [F_{\Delta(\Delta)} - \rho_R^\Delta - i \rho_I^\Delta] \end{aligned}$$

donde:

$F_{\Sigma(\Delta)}$: Factor de atenuación del medio de la señal recibida la entrada del canal receptor Σ .

$F_{\Delta(\Delta)}$: Factor de atenuación del medio de la señal recibida la entrada del canal receptor Δ .

ρ_R^Σ : Coeficiente de pérdida por concepto de la onda reflejada en terreno del canal receptor Σ .

ρ_R^Δ : Coeficiente de pérdida por concepto de la onda reflejada en terreno del canal receptor Δ .

$i \rho_I^\Sigma$: Coeficiente de pérdida durante el procesamiento señal recibida a través de los componentes reactivos del canal receptor Σ .

$i \rho_R^\Delta$: Coeficiente de pérdida durante el procesamiento señal recibida a través de los componentes reactivos del canal receptor Δ .

E_m^Σ, E_m^Δ : Intensidad máxima del campo en los radiofaros GP con antena tipo M .

Y :

Como L_0 representa la amplitud de las oscilaciones de la frecuencia portadora entonces:

$$L_0 = E_m^\Sigma F_{\Sigma(\Delta_0)} = 2a_1^\Sigma A_0 \quad (12)$$

La amplitud de la desviación cuadrática de la señal será:

$$L_2 = -4E_m^\Sigma a_1^\Sigma A_0 \rho_I^\Sigma \quad (13)$$

De forma análoga para el canal diferencial se tiene:

$$M_1 = -8a_1^\Delta A_0 \rho_R^\Delta \quad (14)$$

$$M_2 = -8a_1^\Delta A_0 \rho_I^\Delta \quad (15)$$

donde:

a , (independiente del superíndice o subíndice) coeficiente menor que la unidad.

Sustituyendo 12 y 13 en 11, puede encontrarse el error en los valores del parámetro informativo, condicionado por la distancia entre el punto de observación y el centro de fase de las antenas del radiofaro GP, así por la calidad de la superficie del terreno.

$$\Delta DDM = -2m \frac{a_1^\Delta}{a_1^\Sigma} (\rho_R^\Delta - \rho_I^\Sigma \rho_I^\Delta) \quad (16)$$

En el caso de la antena tipo "0", se tiene que:

$$L_0 = a_1 A_0; L_2 = -a_1 A_0 \rho_{11}; M_1 = -a_2 A_0 \rho_{11}; M_2 = -a_2 A_0 \rho_{21}$$

Por lo que:

$$\Delta DDM = -\frac{m}{2} (a_2/a_1) \rho_{2R} - \rho_{11} \rho_{2I} \quad (17)$$

Las expresiones 16 y 17 dan la posibilidad de valorar el error metodológico del control exterior, teniendo en cuenta la selección del lugar para el emplazamiento de su antena. El valor DDM depende no solo de la correspondencia entre la ubicación de las antenas del radiofaro GP y la de su control exterior, sino que también depende del estado de la superficie del terreno.

Para que se tenga una idea de cómo pudiera influir las condiciones del terreno a la hora de calibrar la trayectoria de planeo en la trayectoria de descenso óptima mostramos la variación de la permitividad relativa (ϵ_r) y la conductividad (σ) para diferentes tipos de suelo la tabla 1.

Tabla 1. Permitividad relativa (ϵ_r) y Conductividad (σ) para diferentes tipos de suelo

Tipo de suelo	ϵ_r	σ (mS/m)
Agua de mar	80	4000
Agua dulce	80	5
Tierra húmeda	15 – 30	5 - 20
Suelo rocoso	7	1 - 5
Tierra seca	4	1 - 10

El receptor GP de a bordo de la aeronave, también constituye un dispositivo de medición. Por esta razón, las características técnicas de la precisión del receptor GP de a bordo puede ser el criterio con el cual se determinará la distancia óptima entre las antenas del radiofaro GP y el control exterior (CE).

Es obvio que la precisión en la medición de la situación del plano de trayectoria de planeo con el control exterior debe ser superior a la precisión en la medición con el receptor de a bordo. Si se toma que el error metodológico del control exterior debe tener un valor ϵ , donde se encuentre como:

$$\epsilon = a_m \Delta DDM \partial_A \quad (18)$$

donde:

a_m : Algún coeficiente menor que la unidad. Resulta suficiente tomar por ejemplo, que $a_m = 1/13$;

ΔDDM : Error permisible en la medición de la diferencia de profundidad de la modulación con el receptor de abordo.

Entonces la expresión:

$$\epsilon = \Delta DDM \quad (19)$$

Donde su parte derecha se determina con las expresiones 16 y 17, pudiéndose hallar la distancia óptima R_{optima} , entre las antenas del radiofaro GP y su control exterior por el criterio de precisión.

Para la solución de la igualdad 19, corresponde la utilización de métodos numéricos, tal como se presenta en los gráficos con la relación entre DDM y la distancia considerando diferentes parámetros eléctricos del terreno, para determinar la distancia óptima entre la antena del radiofaro GP y su control exterior R_{optima} .

INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DEL CONTROL EXTERIOR LEJANO DEL RADIOFARO GP

La investigación experimental del control exterior lejano del radiofaro GP fue realizado según los requerimientos estandarizados por los anexos de la OACI [6 - 9].

Las mediciones fueron realizadas en el Aeropuerto Internacional José Martí de La Habana. Aunque los datos obtenidos experimentales se obtuvieron con el ILS del tipo SP-70 (de fabricación Rusa, 1982) con posterioridad fue sucedido por otros ILS: del tipo THOMSON 381 (de fabricación francesa en 1995); posteriormente se emplaza el ILS (de fabricación noruega del tipo NORMAC 7000, y finalmente hasta el presente el ILS-512C (de fabricación francesa) hasta el presente, se debe significar que el arreglo de antenas en los radiofaros GP en todos estos sistemas es del tipo M (figura 2 a) y b) y que los resultados de las mediciones son compatibles en todos los casos, gracias a lo cual se logra las características que se muestra en la figura 2c).

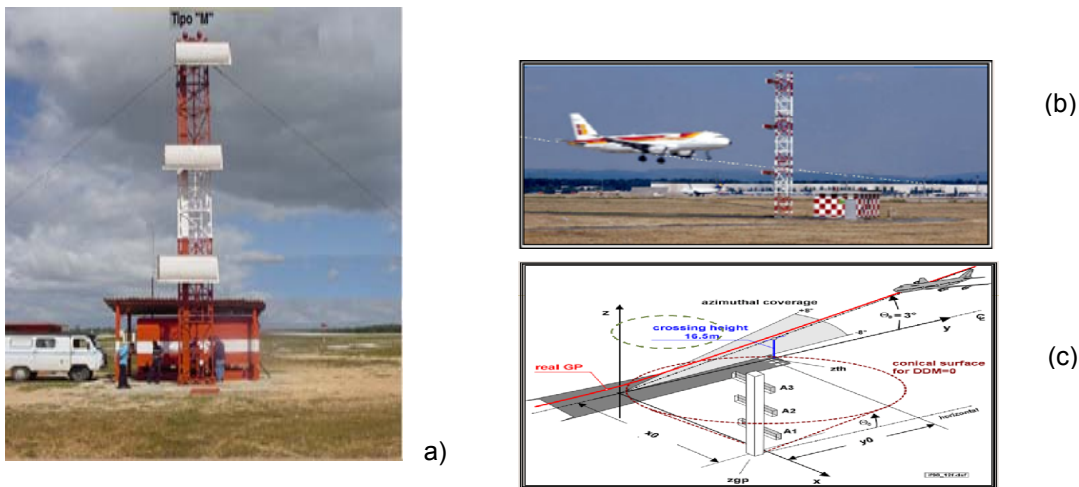


Fig. 2 a) y b) Arreglo de antenas tipo “M”; c) Características en su emplazamiento del GP

Es importante significar que el mástil de las antenas trayectoria de planeo se ubica hacia cualquiera de los dos laterales a una distancia longitudinal Y_0 de aproximadamente 300 metros de la cabecera en la dirección del aterrizaje y a unos 120-150 m (X_0) del eje de la pista, según se muestra en figura 2 (c).

Como se aprecia en la figura 2 a), b) y c), se cumple las normas con relación al área de emplazamiento de la antena plana y nivelada en ambos sentidos, así como completamente libre de obstáculos. El experimento consistió en medir el parámetro informativo DDM en diferentes puntos del plano de trayectoria a diferentes distancias de su sistema de antenas paralelo al eje de la pista con el objetivo de determinar el carácter de la variación del error en la medición considerando el aumento de la distancia.

En la realización del experimento fueron utilizados los medios siguientes:

- Receptor ILS (Calibrador de señales de aterrizaje).
- Antena de control del G.
- Cable coaxial PK-50 KB-2 con sus conectores (30 m).

Las mediciones realizadas determinaron los valores de variación del error en función de distintos puntos del plano de trayectoria a diferentes distancias en condiciones disímiles del terreno, siendo registradas en las tablas 2, 3 y 4 que a continuación se presentan.

Tabla 2 Terreno seco.

Tabla 3 Terreno húmedo.

Tabla 4 Terreno húmedo en La Habana

N°. comprobación	TABLA 2 (CURVA 1)		TABLA 3 (CURVA 2)		TABLA 4 (CURVA 3)	
	X_1	Y_1	X_1	Y_1	X_1	Y_1
1	19,3878	0,23	22,449	0,125	85,102	0,415
2	21,8367	0,1	22,6531	-0,08	95,102	0,16
3	24,0816	-0,01	23,6735	-0,1	105,7143	-0,165
4	25,7143	-0,04	24,898	-0,085	109,3878	-0,34
5	27,3469	0	27,3469	0,175	151,2245	-1,76
6	29,5918	0,115	30,2041	0,38	161,4286	-1,91
7	32,2449	0,23	32,6531	0,415	171,4286	-1,84
8	34,0816	0,255	34,4898	0,35	200,8163	-1,385
9	35,5102	0,21	31,8367	-0,375	225,9184	-1,07
10	34,898	0,1	30,8163	-0,805	250,4082	-0,85
11	35,102	-0,07	29,5918	-1,15	295,3061	-0,58
12	34,2857	-0,25	28,7755	-1,65	330	-0,34
13	34,0816	-0,615	26,1224	-2,28	348,3673	-0,15
14	32,0408	-0,985	26,5306	-2,65	366,7347	-0,05
15	31,0204	-1,62	30,4082	-2,8	390,8163	0,1

16	30	-2,26	32,8571	-2,75	393,2653	0,1
17	32,0408	-2,765	36,1224	-2,5		
18	36,1224	-2,815	38,9796	-2,025		
19	39,1837	-2,745	42,2449	-1,745		
20	41,0204	-2,6	44,2857	-1,695		
21	42,0408	-2,195	46,3265	-1,75		
22	46,3265	-1,54	46,7347	-1,965		
23	48,5714	-1,445	51,0204	-2,53		
24	50,8163	-1,5	56,3265	-3,36		
25	53,8776	-1,8	58,3673	-3,42		
26	55,5102	-2,125	60,4082	-3,35		
27	55,3061	-2,45	64,898	-2,9		
28	58,9796	-3,6	66,5306	-2,59		
29	62,6531	-3,69	66,9388	-2,22		
30	66,3265	-3,625	69,7959	-1,75		
31	69,3878	-2,73	73,6735	-0,75		
32	72,449	-2,27	78,3673	-0,05		
33	73,4694	-1,875	81,0204	0,2		
34	76,3265	-1,25	85,7143	0,34		
35	76,9388	-0,64	89,1837	0,25		
36	78,9796	-0,22	92,6531	0,06		
37	81,8367	0,095	93,0612	0		
38	85,9184	0,18	118,9796	-1,525		
39	89,1837	0,11	124,898	-1,6		
40	90,4082	0	132,0408	-1,575		
41	93,2653	-0,275	187,9592	-1,035		
42	116,3265	-1,685	206,5306	-0,87		
43	123,2653	-1,785	238,1633	-0,6		
44	136,9388	-1,735	286,1224	-0,355		
45	181,0204	-1,3	293,2653	-0,35		
46	195,3061	-1,14	346,3265	-0,165		
47	227,9592	-0,86	358,1633	-0,155		
48	274,898	-0,54	366,7347	-0,15		
49	305,5102	-0,375	395,3061	-0,08		
50	346,3265	-0,235	398,9796	-0,075		
51	356,5306	-0,2	429,5918	0,03		
52	369,7959	-0,205	452,449	0,095		
53	414,6939	-0,09	454,4898	0,095		
54	423,0612	-0,065				
55	435,3061	-0,005				
56	444,2857	0,025				
57	455,102	0,05				
58						
59						

Los datos recogidos en las tablas permitieron elaborar las curvas del gráfico de DDM Vs D(m) de forma automatizada (figura 3).

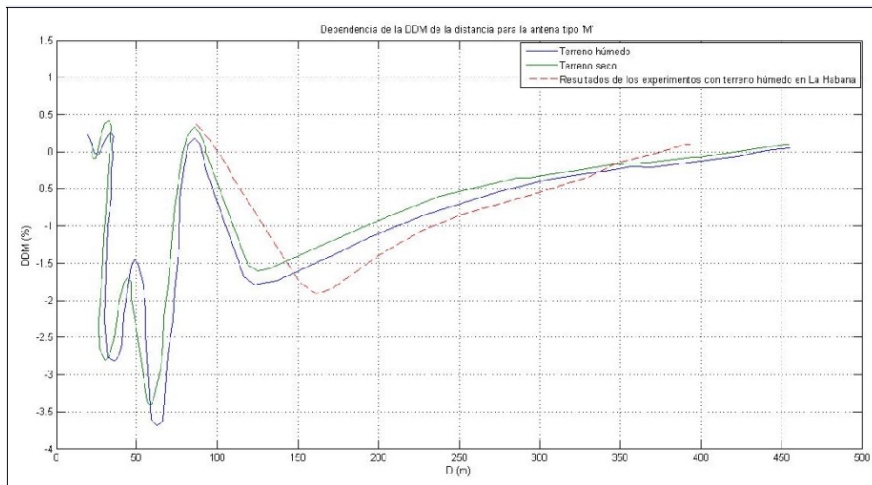


Fig. 3. Resultados teóricos y reales de mediciones en el terreno

Como se aprecia con respecto al origen del sistema de coordenada, con independencia de las condiciones del terreno la variación de la profundidad de modulación DDM para la parte superior en el peor de los casos no supera el valor de 0,5 %; para la parte inferior en el peor de los casos de acuerdo con las características del terreno no llega al -4 % de la profundidad de modulación, si se tiene en cuenta que los límites de $\pm 0,24 \theta_d$ el % de variación de la profundidad de modulación es de $\pm 17,5$ % respectivamente, por lo que se deduce que el error en este caso es insignificante.

CONCLUSIONES

La importancia del experimento permitió valorar el comportamiento del error de la variación de la DDM con relación a los valores permisibles y la distancia óptima para el emplazamiento de la antena del CE, lo cual permite afirmar que constituye una herramienta idónea y de gran importancia para garantizar la exactitud en el proceso de aterrizaje de la aeronave con los estándares internacionales. El experimento es posible realizarlo con modelos de Estaciones ILS terrestres de tecnologías de última generación u otras que se incorporen, por lo que se recomienda que se valoren las expresiones finales de este trabajo para la elaboración de las tablas y curvas según el caso.

REFERENCIAS

1. García Hernández R, González Hernández EM. VOR-ILS Formato digital. CAA, IACC. Cuba. 2013.
2. Hernández López IJ. Estrategia de modernización de la red de radioayudas a la navegación aérea en la FIR, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae. La Habana, Cuba. 2003.
3. Mola, R. History of Aircraft Landing Aids Available from: www.centennialofflight.net. 2012.
4. Makarov K, Ilnitski L, Valdés L. Sistema de radionavegación en los aeropuertos de la aviación civil, Ed. Machinostronie, Moscú, Rusia. 1988.
5. Miller SJ, The Method of the Least Squares. Mathematics of Brown U, 2010.
6. OACI. Anexo 10 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional. Telecomunicaciones Aeronáuticas, vol. I: Radioayudas para la navegación, Montreal, Canadá. 2006.
7. OACI. Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional. Aeródromos. Montreal, Canadá. 2006.
8. Xiao X. ILS Replacement Airports Council International, OACI, Montreal, Canada. 2008.
9. OACI. Guidelines for cost/benefit analysis of communications, navigation and surveillance traffic management (CNS/ATM) systems, OACI, Montreal, Canada. 1995.