

# Determinación de pistas en un proyecto de aeropuerto

Por L. VALENZUELA

Teniente Alumno de la Academia Militar  
de Ingenieros Aeronáuticos.

Una vez fijado el lugar en que debe ser construido un aeropuerto, uno de los problemas más importantes que se le presentan al ingeniero al comenzar el proyecto es fijar el número de pistas que deben construirse y la orientación que deben tener las mismas para obtener el rendimiento deseado para el aeropuerto que se proyecta, y dentro de éste, el máximo posible para el mínimo número de pistas que se juzgue necesario.

A continuación damos un método que conduce a ambos resultados de una manera sistemática y con relativa facilidad.

Vamos a empezar por analizar el problema teniendo en cuenta únicamente la influencia de los vientos que se presentan en el lugar elegido. Después haremos intervenir las limitaciones que se presenten por la topografía del terreno u otras consideraciones, del tipo que sean.

El Servicio Meteorológico, después de observaciones de muchos años, deduce las frecuencias con que se presentan los vientos en cada dirección, y para los vientos de una misma dirección, las frecuencias con que se presentan los vientos de las distintas intensidades. Una manera práctica de presentar estos datos es la del cuadro siguiente (1):

En el cuadro anterior los vientos están clasificados por intensidades, según la escala de Beaufort.

ESCALA DE BEAUFORT.

Número de la escala	Velocidad del viento
0	De 0 a 1 kms/h.
1	» 2 » 6 »
2	» 7 » 12 »
3	» 13 » 18 »
4	» 19 » 26 »
5	» 27 » 35 »
6	» 36 » 44 »
7	» 45 » 54 »
8	» 55 » 65 »
9	Más de 66 »

Según esto, el número 15, por ejemplo, que aparece en la intersección de la columna de vientos de intensidad 2 con la fila que indica la dirección Norte, es la frecuencia en tantos por mil con que se presentan vientos de velocidad comprendida entre 7 y 12 kms/h., y cuya dirección está comprendida en el ángulo que forman las direcciones  $N - \pi/16$  y  $N + \pi/16$ .

Frecuencias de vientos en tantos por mil para cada dirección e intensidad.

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
1	71	49	90	5	34		3	1	3		9	15	75	26	47	6
2	15	11	40	1	11	1	1	1	7	3	9	10	23	14	14	2
3	3	1	7		1						2	3	24	2	3	
4			3	1					3	2	4	4	14	1	2	
5										1	4		12		1	
6			2										3	1		
7													4			
8																
9																
0	295 total en todas direcciones.															

(1) Estos números están sacados de las observaciones hechas en Salamanca durante el año 1944.

$\alpha$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
N		71	15	3							N $\cdot\pi/16$
S		3	7		3						
		74	22	3	3						N $\cdot\pi/16$
NNE		19	11	1							
SSW			3		2	1					
		123	36	4	5	1					NNE $\cdot\pi/16$
NE		90	40	7	3		2				
SW		9	9	2		4					
		222	85	13	8	5	2				NE $\cdot\pi/16$
ENE		5	1		1						
WSW		15	10	3	4						
		242	96	16	13	5	2				ENE $\cdot\pi/16$
E		34	11	1							
W		75	23	24	4	12	3	4			
		351	130	41	17	17	5	4			E $\cdot\pi/16$
ESE			1								
WWW		26	14	2	14		1				
		377	145	43	31	17	6				ESE $\cdot\pi/16$
SE		3	1								
NW		47	14	3	1	1					
		427	160	46	32	18	6				SE $\cdot\pi/16$
SSE		1	1								
NNW		6	2		2						
		295	434	163	46	34	18	6	4		SSE $\cdot\pi/16$
$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$		

Cuadro 1.

Para los cálculos sucesivos supondremos que los vientos que se presentan tienen siempre la velocidad máxima que les corresponda según el número de la escala a que pertenecen. Los de intensidad 2, por ejemplo, 12 kms/., de intensidad, 3,18 kms/h., etc.

Por consiguiente, si fijamos el origen de ángulos en la dirección N —  $\pi/16$ , la frecuencia con que se presentan vientos de 12 kms/h. de dirección comprendida entre  $0^\circ$  y  $\pi/8$  será del 15 por 1.000.

Los vientos que se presentan, también comprendidos en ese ángulo, pero de sentido opuesto a los anteriores, tienen una frecuencia que se encuentra en la intersección de la columna 2 con la fila S, que vale 7. El total de los vientos de dirección comprendida entre  $0^\circ$  y  $\pi/8$  tendrán, pues, una frecuencia  $15 + 7 = 22$ . El total de frecuencias de los vientos de intensidad 2 de dirección comprendida entre  $0^\circ$  y  $2\pi/8$  se obtiene sumando a la frecuencia anterior los números que aparecen en la intersección de la columna 2 con las filas que corresponden a las direcciones NNE. y SSE., que será  $22 + 11 + 3 = 36$ .

De esta manera podemos dibujar por puntos una curva  $P_2$ , que da para cada valor de  $\alpha$  la frecuencia de los vientos de intensidad 2 cuya dirección está comprendida entre 0 y  $\alpha$  y de uno y otro sentido.

La diferencia de los valores que toma dicha función entre dos valores de  $\alpha$ ,

$$P_2(\alpha_2) - P_2(\alpha_1) = \left| P_2 \right|_{\alpha_1}^{\alpha_2}$$

representa la frecuencia en tantos por mil con que se presentan vientos de intensidad 2 y cuya dirección está comprendida entre  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  y de uno y otro sentido.

De la misma manera pueden construirse, para cada intensidad de viento  $i$ , la curva correspondiente  $P_i$ , con idénticas propiedades que la anterior.

La manera más práctica de hallar los valores de las funciones  $P_i$  en los puntos que se determinan es disponer los datos como están en el cuadro 1 e ir sumando por columnas, como puede verse.

De esta manera se obtienen los valores de  $P_i$  para los puntos que se indican en la columna de la derecha del cuadro. Las curvas  $P_i(\alpha)$  están dibujadas en la figura 1.

Con estas curvas estamos ya en condiciones de hallar la pista de máxima utilización.

Supongamos que se impone al aeropuerto la condición de que en más de  $M = 900$  por 1.000 de los casos se pueda tomar tierra en alguna

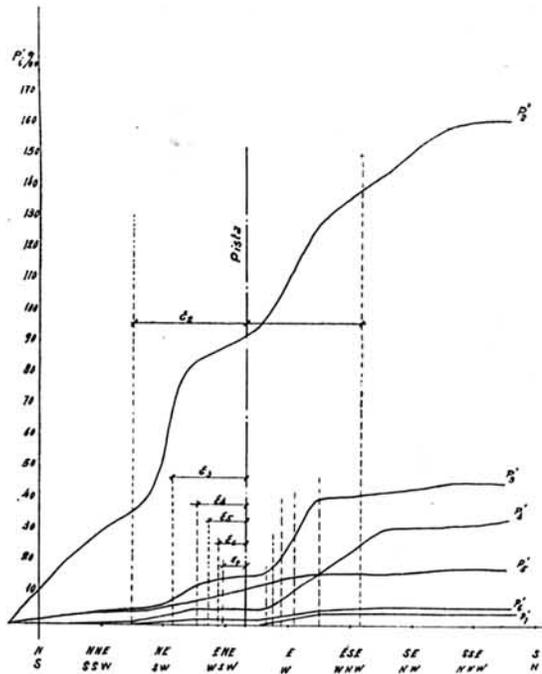


Figura 1.

de sus pistas con un viento de costado no mayor de 8 kms/h.

Si una pista tuviera una orientación cualquiera  $\alpha_0$ , se podría tomar tierra en ella siempre que el viento que hubiere en ese momento tuviera una componente normal a la pista:

$$v_h = v \text{ sen } (\alpha - \alpha_0) \leq 8 \text{ kms/h.}$$

$v$  — velocidad del viento.  
 $\alpha$  — dirección del viento.

Por consiguiente, si el viento fuera de intensidad  $i$ , su dirección debería estar comprendida en el ángulo

$$\alpha_0 - \varepsilon_i < \alpha < \alpha_0 + \varepsilon_i,$$

siendo

$$\text{sen } \varepsilon_i = \frac{8}{v_i}.$$

$\alpha$	0	$90^\circ$	$180^\circ$	$270^\circ$	$360^\circ$	$450^\circ$	$540^\circ$	$630^\circ$	$720^\circ$
$\alpha$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_0$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_1$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_2$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_3$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_4$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_5$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_6$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_7$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_8$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_9$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{10}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{11}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{12}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{13}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{14}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{15}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{16}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{17}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{18}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{19}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{20}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{21}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{22}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{23}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{24}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{25}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{26}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{27}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{28}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{29}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{30}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{31}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{32}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{33}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{34}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{35}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{36}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{37}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{38}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{39}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{40}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{41}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{42}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{43}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{44}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{45}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{46}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{47}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{48}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{49}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{50}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{51}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{52}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{53}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{54}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{55}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{56}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{57}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{58}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{59}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{60}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{61}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{62}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{63}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{64}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{65}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{66}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{67}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{68}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{69}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{70}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{71}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{72}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{73}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{74}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{75}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{76}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{77}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{78}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{79}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{80}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{81}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{82}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{83}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{84}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{85}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{86}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{87}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{88}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{89}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{90}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720

Cuadro 2.

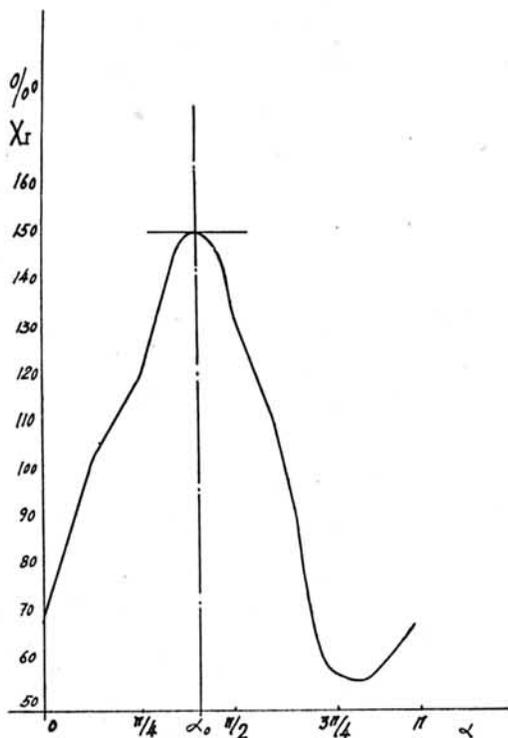


Figura 2.

$\alpha$	0	$90^\circ$	$180^\circ$	$270^\circ$	$360^\circ$	$450^\circ$	$540^\circ$	$630^\circ$	$720^\circ$
$\alpha$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_1$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_2$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_3$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_4$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_5$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_6$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_7$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_8$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_9$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{10}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{11}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{12}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{13}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{14}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{15}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{16}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{17}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{18}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{19}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{20}$	0	90	180	270	360	450	540	630	720
$\alpha_{21}$	0	90	180	270					

Para hallarlo se hace variar  $\alpha_0$  de 0 a  $\pi$ , y se construye la curva  $X_I(\alpha)$ , que da la frecuencia con que se puede tomar tierra en una pista de orientación  $\alpha$  cualquiera con viento superior al de fuerza 1 y componente normal no superior a 8 kms/h.

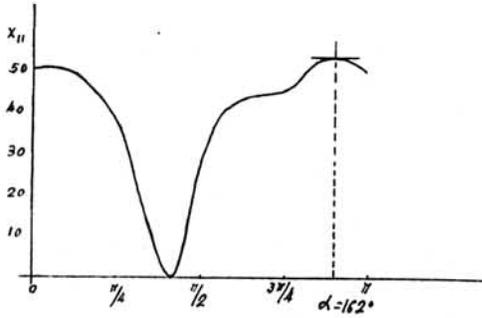


Figura 4.

Para dibujar esta curva por puntos se traza en un papel transparente un eje, y a ambos lados paralelas que disten de él  $\varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \dots, \varepsilon_9$ . Se hace coincidir este eje con una abscisa  $\alpha$  cualquiera en la figura 1. Esas rectas paralelas al eje cortarían a las curvas correspondientes  $P_i$  en dos puntos, cuya diferencia de valores es:

$$P_i(\alpha + \varepsilon_i) - P_i(\alpha - \varepsilon_i),$$

y la suma de todos ellos es:

$$\sum_{i=2}^{i=9} (P_i(\alpha + \varepsilon_i) - P_i(\alpha - \varepsilon_i)) = \sum_{i=1}^{i=9} \left| P_i(\alpha) \right|_{\alpha - \varepsilon_i}^{\alpha + \varepsilon_i} = X_I(\alpha)$$

Una manera práctica de disponer estos cálculos es como está en el cuadro 2.

En la última fila de este cuadro están los valores de  $X_I$  para los valores de  $\alpha$  que aparecen en la primera.

En él se han hallado los valores de

$$\sum P_i(\alpha + \varepsilon_i) \quad \text{y} \quad \sum P_i(\alpha - \varepsilon_i),$$

sumando por columnas, y la diferencia de dichos valores es  $X_I(\alpha)$ .

Con estos puntos se ha dibujado la curva de la figura 2, el máximo de la cual corresponde a  $\alpha_0 = 74^\circ 15'$  y vale 151. Por tanto, si el aeropuerto tuviera esa sola pista, de 1.000 veces que un avión se dispusiera a tomar tierra podría hacerlo en esa pista  $729 + 151 = 880$  veces.

Para determinar una segunda pista se proce-

de exactamente igual que con la primera, pero teniendo en cuenta que las curvas  $P_i$  están modificadas de manera que no aparezcan en ellas los vientos que absorbe la primera. Las nuevas curvas  $P_i$ , que llamaremos en lo sucesivo  $P'_i$ , se obtienen, a partir de las primeras  $P_i$ , de la siguiente manera:  $P'_i$ , desde  $0^\circ$  a  $\alpha_0 - \varepsilon_i$ , toma los mismos valores que  $P_i$ ; desde  $\alpha_0 - \varepsilon_i$  a  $\alpha_0 + \varepsilon_i$  permanece constante e igual a  $P_i(\alpha_0 - \varepsilon_i)$ , y desde  $\alpha_0 + \varepsilon_i$  a  $\pi$  toma valores iguales a los de  $P_i$ , disminuídos en la cantidad constante  $P_i(\alpha_0 + \varepsilon_i) - P_i(\alpha_0 - \varepsilon_i)$ .

Estas curvas están dibujadas en la figura 3, y de ellas, por el mismo procedimiento que antes, se han obtenido los valores de una nueva función,  $X_{II}(\alpha)$ , que representa la frecuencia con que se puede tomar tierra en una pista orientada según una dirección cualquiera  $\alpha$ , siempre que no pueda hacerse en la primera.

Los valores de  $X_{II}(\alpha)$  para los correspondientes valores de  $\alpha$  están hallados en el cuadro 2. Y la función está representada en la figura 4.

El máximo de dicha función corresponde a  $\alpha = 162^\circ$  y vale 59.

Con las dos pistas ya determinadas, de cada 1.000 veces que un avión se dispusiera a tomar tierra en el campo, podría hacerlo, dentro de una cualquiera de ellas,  $880 + 59 = 939$  veces.

Para determinar una tercera pista podría hacerse exactamente igual que para la segunda.

Siempre interesa orientar una pista en la dirección de máxima utilización; por eso, una vez fijada la primera, si fuera preciso dotar al aeropuerto de tres pistas, pudiera suceder que no conviniera fijar la segunda en el máximo de  $X_{II}$ , porque la suma de los máximos de  $X_{II}$  y  $X_{III}$ , así hallados, fuera inferior al máximo de  $(X_{II} + X_{III})$  para otra orientación de la segunda pista. En ese caso se hallan los máximos de  $(X_{II} + X_{III})$  para cada orientación de la segunda pista, y el mayor de todos dará las orientaciones de la segunda y tercera pistas.

Esto puede hacerse por el mismo procedimiento seguido hasta ahora. Hay que determinar  $X_{II}(\alpha)$ , y para cada orientación  $\alpha_2$  de la segunda pista, el máximo de  $X_{III}$ . El mayor valor de  $(X_{II}(\alpha_2) + X_{III \text{ máx}})$  es la solución del problema.

Si por la topografía del terreno o cualquiera otra causa no fuera posible dar a una pista una orientación comprendida dentro de cierto ángulo, se suprimiría de las curvas dicho trozo, y se hallaría su valor máximo fuera de él.