

La medida del campo eléctrico durante el vuelo

Por JOAQUIN CATALA DE ALEMANY

Meteorólogo.

En un artículo anterior, aparecido en esta misma Revista (x), exponíamos el riesgo que corre un avión cuando vuela a través de lluvia, nieve o proximidad de nubes tormentosas, debido a la carga eléctrica que adquiere, carga que, por otra parte, puede también producirse por simple efecto electrostático de rozamiento con el aire y partículas que éste tiene en suspensión; a veces esta carga es tan considerable que puede dar lugar a una descarga en corona, la cual, a su vez, produce serias interferencias en el aparato de radiocomunicación ("precipitación estática"), en forma de ruidos capaces de hacer difícil, o del todo imposible, la recepción. Siendo este riesgo tan digno de ser tenido en cuenta, el fenómeno ha sido ampliamente investigado, y en el artículo a que nos referimos mencionábamos algunos de los artificios, modernamente empleados, para anular ó reducir al mínimo dichos ruidos, gracias a la eliminación rápida de dicha carga por el avión; los citados dispositivos pueden verse adoptados ya por algunos aparatos en nuestros aeropuertos.

Queremos hoy exponer cómo se consigue determinar directamente, desde el mismo avión en vuelo, el campo eléctrico existente alrededor de la aeronave, ya que dicho dato constituye un poderoso complemento para el piloto, quien procurará evitar los valores demasiado elevados del campo citado, para los cuales, a pesar de todas las precauciones que se tomen, empleando suficiente número de descargadores estáticos, no es posible evitar los nocivos efectos de la descarga en corona sobre el aparato receptor.

Con este objeto resumiremos los resultados obtenidos en los trabajos llevados a cabo, conjuntamente, por los Laboratorios de Investigación de diversas Fuerzas Militares norteamericanas, que culminaron en la construcción de un aparato capaz de medir la magnitud y polaridad del campo eléctrico en las distintas regiones, des-

de un aparato en vuelo, dentro de un amplio margen, que se extiende desde los 5 a los 4.000 voltios/cm., mediante el empleo de un simple generador de corriente continua de unos 30 voltios. El aparato resulta doblemente interesante por cuanto contribuirá, no tan sólo a aumentar la seguridad de la aeronave, sino que también puede resultar de gran utilidad para el conocimiento del estado eléctrico de la atmósfera en condiciones en que aquél está profundamente alterado, a causa de los fenómenos tormentosos, conocimiento que hasta el presente, y que nosotros sepamos, debía obtenerse por simples medidas, más o menos indirectas, realizadas desde tierra.

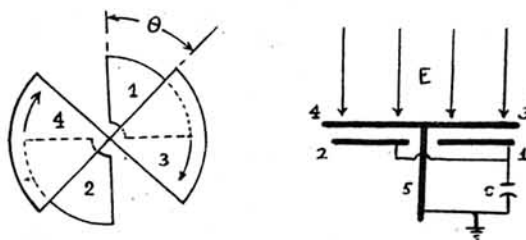


Fig. 1.

He aquí el principio básico del funcionamiento del aparato, cuya parte esencial esquematizamos en la figura 1 (xx), parte que es precisamente la que se sitúa en el punto donde el campo eléctrico desea conocerse: Las placas 1 y 2, aisladas, ocupan los dos cuadrantes opuestos de una corona circular, cuyos radios son R_1 y R_2 , y forman lo que podemos llamar el estator; sobre ellas, y a una distancia muy pequeña, existe otra pareja de placas, 3 y 4, que forman el rotor, unidas a un eje o árbol, que puede girar sobre cojinetes, y que se mantienen a potencial cero.

(xx) Esta figura y algunas otras de las que ilustran el presente artículo se reproducen de un trabajo de R. C. Waddel aparecido en *The Rev. of Scient. Inst.*, enero de 1948.

(x) Núm. 84, noviembre 1947.

Al girar el rotor expone y cubre, alternativamente, el estator al campo eléctrico existente, que supondremos normal a las placas. Si el movimiento del rotor se determina por el ángulo θ , cuando θ sea igual a cero, el área A , del estator, expuesta al campo eléctrico E , es nula, y al aumentar θ , crece a su vez, linealmente, A , alcanzando su valor máximo, que designaremos por A_m , cuando θ sea igual a 90° , para decrecer nuevamente, hasta anularse cuando θ pasa de 90° a 180° , repitiéndose análoga variación al pasar este ángulo de 180° a 360° .

El valor máximo de A es:

$$A_m = \frac{\pi}{2} (R_2^2 - R_1^2) \quad [1]$$

El campo eléctrico existente, E , origina sobre el estator una carga superficial cuya densidad vale:

$$\sigma = E/4\pi \text{ (en el sistema } e \cdot e), \quad [2]$$

y la carga total inducida sobre el estator es:

$$Q = \sigma \cdot A, \quad [3]$$

que debido a las conexiones indicadas en la figura produce en el condensador fijo C , parte fundamental del aparato, una carga $Q_c = Q$, en el supuesto que el condensador estaba inicialmente (para $\theta = 0$) descargado.

Por otra parte, la diferencia de potencial, a través del condensador, vendrá dada por:

$$U = Q_c/C, \quad [4]$$

y en consecuencia:

$$U = \frac{\sigma \cdot A}{C} = \frac{E \cdot A}{4\pi C}; \quad [5]$$

de manera que para un determinado valor del campo eléctrico esta diferencia de potencial es proporcional al área A , que a su vez, recordémoslo, es proporcional a θ , como se indica en la figura 2.

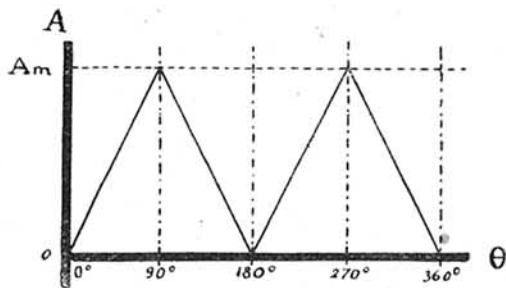


Fig. 2.

El valor máximo de U tendrá lugar cuando:

$$A = A_m = \pi/2 (R_2^2 - R_1^2),$$

y será en este caso:

$$U_m = \frac{E \cdot A_m}{4\pi C} \quad [6]$$

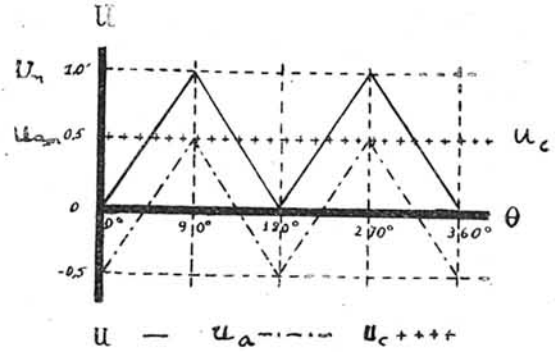


Fig. 3.

Todo ello en el supuesto que la capacidad del sistema, excluido el condensador, sea constante e independiente de θ , lo cual será cierto, con muy buena aproximación, si la del condensador es muy grande, relativamente a la del resto; además, se supone que la introducción del aparato en el campo eléctrico que va a medir no produce deformación en este último.

De acuerdo con [5], en la figura 3 hemos representado las variaciones de U . Como fácilmente puede verse en dicha figura, la onda triangular que da las variaciones de U puede considerarse como la suma de una diferencia de potencial constante U_c igual a $U_m/2$, y otra alterna U_a , cuya frecuencia fundamental es doble de la correspondiente a θ , con un valor máximo igual $U_m/2$, o sea que:

$$U_{am} = U_m/2 = \frac{E \cdot A_m}{8\pi C}; \quad [7]$$

y si se mide E en voltios/centímetros, C en micro-faradios y A en centímetros cuadrados:

$$U_{am} = 0,53 \times 10^{-7} \times \frac{E \cdot A_m}{C} \dots \text{ en voltios. } [8]$$

De modo que si, por ejemplo, $E = 100$ voltios/centímetro, $A_m = 26$ centímetros cuadrados, y $C = 0,001$ micro-faradios, resulta para U_{am} un valor de 0,14 voltios.

Si la diferencia de potencial alterna existente a través del condensador se conecta a un dispositivo amplificador, éste acusará la onda trian-

gular correspondiente a U_a , cuyo valor máximo viene dado por la relación [7].

Ahora bien, la impedancia del amplificador conectado a C debe ser suficientemente grande, con objeto de que pueda considerarse despreciable su efecto de "shunt" sobre C . Esto se conseguirá cuando sea, en total, unas diez veces mayor que la reactancia de C , para la onda fundamental de U_a , y para la mínima velocidad de giro que puede tener el rotor; esta condición puede concretarse así:

$$Z \geq 10 \text{ capacitancia máxima} = 10 \times \frac{1}{4\pi f_{\min} C}; \quad [9]$$

donde f_{\min} es la velocidad mínima del rotor, expresada en vueltas por segundo.

Esta condición es la segunda a que debe satisfacer C , que, por otra parte, como ya se dijo, ha de ser bastante mayor que la capacidad del sistema rotor-estator, aunque, no obstante, tampoco conviene que sea demasiado elevada, pues U_{am} es inversamente proporcional a ella. Cuando el valor de C sea el conveniente para satisfacer a estas dos condiciones, los máximos de U_a serán prácticamente constantes, en magnitud y en fase, en relación con la del rotor, para un amplio margen de velocidades de aquél, lo cual es muy conveniente, ya que la velocidad del rotor, por muchas razones, no puede suponerse constante, máxime si, como sucede en algunos casos, funciona accionado por una turbina de propulsión gaseosa (la misma corriente de aire que produce el avión) o por un motor asincrónico.

Si el valor de C no es el apropiado, la onda triangular correspondiente a U_a denegera en otra, más o menos rectangular, cuya amplitud y fase dependen de la velocidad del rotor.

Como decíamos al principio, el aparato debe servir no tan sólo para determinar la magnitud del campo eléctrico, sino también su polaridad, y esto se consigue, para las bajas frecuencias que aquí tienen lugar, mediante un simple rectificador mecánico; éste puede consistir, sencillamente, en un interruptor accionado, gracias a una conexión conveniente, por el mismo eje del rotor, que elimine, abriendo y cerrando el circuito, las ondas triangulares de un sentido y deje pasar, en cambio, las de sentido opuesto; tal rectificador resulta sencillo, seguro y además lineal.

En el supuesto que el amplificador no introduzca cambio de fase, la onda amplificada esta-

rará en concordancia con la U_a (fig. 3), de manera que si, por ejemplo, queremos rectificar ésta de forma que no pase al amplificador la semionda negativa, el interruptor utilizado como rectificador mecánico debe cerrar para $\theta = 45^\circ$, abrir para $\theta = 35^\circ$, conectar de nuevo para $\theta = 225^\circ$, e interrumpir para $\theta = 315^\circ$. De modo que la biela que se emplee para actuar sobre el interruptor debe ser de tal forma, y de tal manera estar conectada al árbol del rotor, que obligue a la llave a actuar en la forma expuesta.

Las propiedades del conjunto rectificador-amplificador pueden expresarse mediante la introducción de un factor S definido como el cociente entre la intensidad media de la corriente rectificada I y el valor U_{am} de la onda alterna:

$$S = \frac{I}{U_{am}};$$

de forma que:

$$I = S \cdot U_{am} = \frac{E \cdot S \cdot A_m}{8\pi C};$$

y expresando I en μA , y las demás magnitudes en las unidades escogidas para obtener la relación (8), queda:

$$I = 0,53 \times 10^{-7} \frac{E \cdot S \cdot A}{C}. \quad [10]$$

Fórmula que si bien resulta de gran utilidad para el proyecto y cálculo del aparato destinado a la medida del campo eléctrico, no se utiliza en la práctica, pues en lugar de echar mano de ella se recurre a una calibración previa del aparato, sometiéndolo a campos conocidos y midiendo las intensidades suministradas por el amplificador.

Las observaciones oscilográficas de la onda de potencial, existente en el condensador C , demuestran la realidad de la onda triangular, teóricamente predicha, salvo por lo que a los valores extremos se refiere, ya que éstos resultan algo mayores de los que se obtienen de la expresión [8], y ello se debe a que existe una pequeña distorsión del campo. Esto, sin embargo, no es causa de error apreciable, en las medidas que se realicen con el aparato, puesto que, según acabamos de decir, el instrumento es calibrado, colocándolo precisamente en el lugar del avión en que va a ser utilizado. La parte fundamental del aparato, llamada cabezal, se monta sobre la superficie del avión; es de tamaño muy pequeño, con objeto de reducir al mínimo

la distorsión, y va conectada a la caja de control, en la cual se aloja el amplificador, mediante un cable de unos 15 metros.

Finalmente, el aparato de medida, en el que se realizan las lecturas, proporciona indicaciones

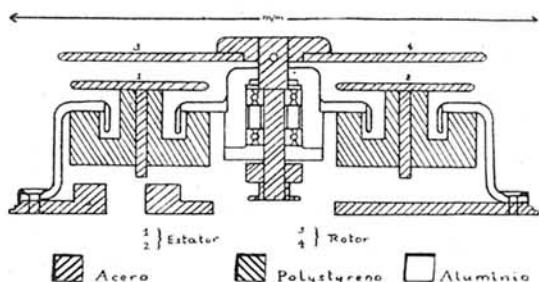


Fig. 4.

acerca de la magnitud y polaridad del campo, entre límites que se extienden desde ± 5 voltios/centímetro hasta 4.000 voltios/centímetro, gracias a una llave que permite variar convenientemente la sensibilidad.

En la figura 4 presentamos un corte transversal del cabezal, con indicación del material constituyente de sus distintas partes: su peso total es de unos 800 gramos, mientras que la caja de control pesa, aproximadamente, 4 kilogramos. Tanto una como otra parte del aparato van provistos de soportes antivibrantes, que les hacen menos sensibles a las perturbaciones mecánicas, ya sean debidas a la toma de tierra como a bruscos movimientos de turbulencia durante el vuelo. La figura 5 da una ligera idea del aparato en conjunto.

Todo el instrumento debe ofrecer la seguridad de que funcione dentro de un amplio margen de temperaturas, presión y humedad, y de un modo especial es necesario que el cabezal siga en funciones, sean cualesquiera las condiciones físicas del medio, tanto en lluvia como en nieve o engelamiento. En plan experimental

ha volado en "B-17" y "B-25", convertidos en verdaderos laboratorios volantes, y en diversas condiciones meteorológicas, sobre gran parte de Norteamérica e Islandia, con resultados francamente satisfactorios, sin que fallara la cuestión más delicada, que es el aislamiento de las placas que constituyen la parte esencial del cabezal.

Volando entre nieve se han registrado campos negativos de varios centenares de voltios por centímetro, que dan lugar a notable precipitación estática, caso de no tomarse las medidas oportunas, de que ya hablamos, para evitarla. Al volar en la proximidad, o dentro, de nubes tormentosas, se acusan campos de millares de voltios por centímetro, de modo que con vistas a la investigación directa del estado eléctrico, en estas condiciones atmosféricas, hay que pensar en disminuir la sensibilidad del aparato, reduciéndola a la décima parte, aumentando para ello la capacidad del condensador C hasta

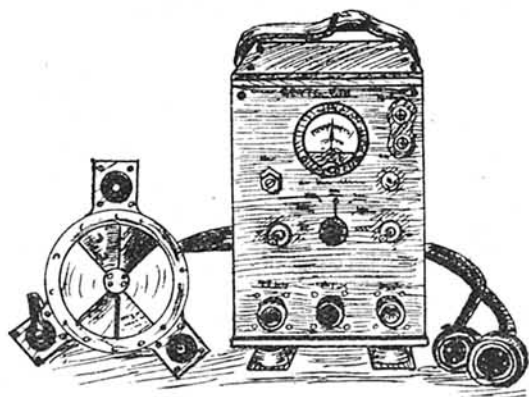


Fig. 5.

0,01 micro-faradios; de esta forma podrá ampliarse la escala del aparato, haciéndole capaz de medir campos de cerca de 40.000 voltios/centímetro, valor bastante superior al que las medidas indirectas asignan como máximo.