

# LINEAS ELECTRICAS AEREAS. ESTUDIO ESTADISTICO DE LA ALTURA DE LOS CONDUCTORES SOBRE EL TERRENO

Por JOSE CARRASCO TUTON  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

*Uno de los fenómenos físicos conocidos, excluido en los cálculos de las líneas eléctricas aéreas, es el debido a la fluencia de sus conductores ("creep" en inglés, "fluage" en francés), es decir, a los alargamientos no elásticos que éste experimenta en su vida, y que se manifiestan por adquirir mayor flecha que la de cálculo, comprometiendo con ello las alturas libres reglamentarias. En general, este efecto, no previsto en ninguna Reglamentación Administrativa, solía preverse aumentando las alturas libres durante la construcción, originándose por ello un encarecimiento en la subcuenta de torres. Siendo cada vez mayor la capacidad de transporte de energía eléctrica de las líneas aéreas, existe en la actualidad una emulación en todos los países para estudiarlas en sus menores detalles, con la finalidad de reducir su coste sin detrimento de su calidad, pues la primera condición que se exige a una línea eléctrica aérea es continuidad en el suministro. Debido a este afán de ahorro, en todos los países se analizan, tanto los cálculos de gabinete como las operaciones de montaje de los conductores, con objeto de ajustar unos a otros, pues se ha puesto de manifiesto la existencia de errores fortuitos, que en buena técnica deberían recibir la debida consideración dentro de las bases de cálculo. Iberduero, percatado de la importancia de esta realidad, y no pudiendo por el momento disponer del laboratorio de ensayos adecuado para enfrentarse con el problema de la fluencia, intenta contribuir a estos estudios por medios simples, que son objeto de este artículo.*

## Planteamiento del problema.

Como puede apreciarse, hablamos de aumentos en la flecha, por ser esta magnitud el parámetro cuya consideración encarece la obra si queremos mantener la separación al terreno; sin embargo, si examinamos una línea aérea, puede observarse que también se encuentran valores de las flechas inferiores a los teóricos. A primera vista, podríamos achacar estas diferencias a los errores fortuitos y, por tanto, su número debía presentar tantos positivos como negativos, pero esto no es así, porque hay que considerar que, como existen ciertas diferencias que las podemos clasificar como errores sistemáticos, como es la fluencia, que siempre origina flechas mayores, se origina el que haya más positivos que negativos. Entre los errores fortuitos más importantes, podemos citar los derivados del levantamiento topográfico del perfil longitudinal de la línea, del estaquillado de torres en el replanteo, así como errores en el regulado, debidos a diferencias en la apreciación de la temperatura del conductor en su despliegue o tendido, y en la medición de las flechas en el regulado (1).

A este fenómeno de fluencia debe atribuirse en buena lógica, el que las diferencias observadas entre las flechas medidas en el campo y las teóricas no tengan una media  $m = 0$ , como normalmente debía ocurrir.

---

(1) Véase "Le réglage des conducteurs des lignes électriques aériennes", de M. H. CARPENTIER, *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, septiembre de 1949.

## Determinación práctica de la fluencia en las líneas aéreas, donde se efectuaron medidas de flechas.

Para valorar la importancia de estas diferencias hemos efectuado una serie de medidas de flechas de líneas aéreas en servicio desde hace años. Por dificultades de orden práctico estos datos no se han recogido de una sola línea, sino de tres distintas, pero construídas con idéntico método y, por tanto, con idéntica precisión, y que todas tenían conductores de gran diámetro con proporciones de aluminio-acero iguales o similares. Esta última condición tiene importancia fundamental para valorar la fluencia, porque ésta es la misma en conductores de idéntica composición y regulados con tracciones similares. Para simplificar el estudio, y además porque se han facilitado instrucciones pertinentes a los topógrafos, podemos considerar que esta medida de flechas se ha obtenido con precisión, es decir, con un error despreciable.

También se ha procurado, siempre que fuese posible, que las flechas se midiesen en vanos, que por su longitud podemos considerar normales o medios, con objeto de evitar cualquier correlación que pueda existir entre los errores y las longitudes de los vanos. Se ha calculado, además, el calentamiento de los conductores debido a la intensidad que pasaba por los mismos, así como también se ha tenido en cuenta la diferencia entre la temperatura ambiente en el suelo, que es donde se efectúan las mediciones con el termómetro, y la real del conductor, que por estar a determinada altura, viene a ser del orden de 5 a 10° C. más baja, con lo que prácticamente se compensaban ambos efectos.

Presentamos la tabla I, en la que figuran las flechas medidas, los valores que para la misma temperatura figuran en la tabla de montaje y una tercera columna en la que figuran las diferencias entre ambos valores; también en la tabla I, en otra columna, aparecen estas diferencias expresadas en tanto por ciento sobre los valores teóricos de la flecha, con objeto de reducir todas las diferencias a un mismo concepto, para su comparación. Como ya hemos indicado, siendo los vanos elegidos vanos medios, podemos permitirnos el suponer que no existe correlación entre los valores de las diferencias entre las flechas medidas y teóricas, y la longitud del vano. Para ratificarnos, hemos subrayado en la relación los valores extremos, y podemos apreciar que no existe la citada correlación.

Aparece también en la tabla I otra columna situada a la derecha con valores idénticos a los de la cuarta columna, pero en ésta hemos ordenado las diferencias, es decir, las hemos puesto en orden decreciente respecto a su valor absoluto en las negativas y en orden creciente en las positivas. Estos valores, naturalmente, no tienen nada que ver con los de la misma fila. Si examinamos esta columna, se desprende:

- Que su valor medio no es cero, porque la suma de positivos es bastante mayor que la de negativos.
- Que también el número de positivos es superior al de negativos.

Esto nos hace pensar existe, como preveíamos al principio, un error sistemático, o sea, una influencia positiva, que por ahora sólo podemos atribuir a la fluencia. Es preciso, en consecuencia, hacer una traslación de origen para que la media de los errores resulte cero, y con esta operación creemos que aislamos en el valor de

TABLA I.

Línea a 220 kV. Esla-Valladolid núm. I.

(Conductor CONDOR de 455,1 mm.<sup>2</sup> de sec. y 27,72 mm. de  $\phi$ , instalado en 1960).

Valores de la flecha de la tabla de montaje en metros	Valores de la flecha comprobada en metros	Diferencias en metros	Diferencias en por ciento	Diferencias en por ciento ordenadas
5,34	5,33	- 0,01	- 0,19	- 17,74
3,44	3,69	+ 0,25	+ 7,27	- 16,70
6,69	6,92	+ 0,23	+ 3,44	- 15,10
3,81	4,06	+ 0,25	+ 6,56	- 13,05
5,24	5,70	+ 0,46	+ 8,78	- 12,35
5,65	6,29	+ 0,64	+ 11,32	- 11,70
4,82	5,25	+ 0,43	+ 8,90	- 10,67
4,66	5,25	+ 0,59	+ 12,68	- 9,36
4,49	5,00	- 0,51	+ 11,37	- 9,34
4,92	5,30	+ 0,38	+ 7,73	- 9,30
4,49	5,25	+ 0,76	+ 16,94	- 9,19
4,75	5,25	+ 0,50	+ 10,53	- 9,05
4,32	4,27	- 0,05	- 1,15	- 8,69
5,26	5,15	- 0,11	- 2,09	- 8,35
4,96	5,15	+ 0,19	+ 3,84	- 7,60
4,43	4,91	+ 0,48	+ 10,85	- 6,43
5,64	6,52	- 0,12	- 2,13	- 5,82
3,42	3,89	+ 0,47	+ 13,75	- 5,57
4,00	4,83	+ 0,83	+ 20,75	- 4,99
4,73	5,15	+ 0,42	+ 8,89	- 4,95
7,10	7,91	+ 0,81	+ 11,40	- 4,46
2,05	2,05	0,00	0,00	- 4,28
5,34	5,33	- 0,01	- 0,19	- 4,08
3,25	3,69	+ 0,44	+ 13,56	- 3,94
6,65	6,92	+ 0,27	+ 4,10	- 3,89
3,77	4,06	+ 0,29	+ 7,69	- 3,86
5,26	5,70	+ 0,34	+ 6,47	- 3,85
5,66	6,28	+ 0,62	+ 10,96	- 3,68
6,28	7,24	+ 0,96	+ 15,30	- 3,51
4,97	6,21	+ 0,24	+ 4,83	- 2,97
8,86	8,03	- 0,83	- 9,36	- 2,74
10,78	8,87	- 1,91	- 17,74	- 2,56
6,07	6,82	+ 0,75	+ 12,35	- 2,48
10,31	11,53	+ 1,22	+ 11,83	- 2,44
4,63	4,45	- 0,18	- 3,89	- 2,19
4,46	4,32	+ 0,14	+ 3,14	- 2,16
5,67	5,18	- 0,49	- 8,64	- 2,13
5,70	4,75	- 0,95	- 16,70	- 2,11
6,07	6,73	+ 0,66	+ 10,88	- 2,09
9,80	10,02	+ 0,72	+ 7,75	- 1,85
5,90	6,63	+ 0,73	+ 12,38	- 1,68
11,39	13,25	+ 1,86	+ 16,35	- 1,67
3,17	4,01	+ 0,84	+ 26,50	- 1,53
5,97	6,63	+ 0,66	+ 11,05	- 1,57
6,12	6,90	+ 0,78	+ 12,72	- 1,21
4,40	5,05	+ 0,55	+ 12,50	- 1,16
4,77	5,57	+ 0,80	+ 16,75	- 1,11
4,59	5,03	+ 0,44	+ 9,60	- 0,82

Línea a 220 kV. Esla-Valladolid núm. II

(Conductor CONDOR de 455,1 mm.<sup>2</sup> de sec. y 27,72 mm. de  $\phi$ , instalado en 1959).

6,58	6,40	- 0,18	- 2,74	- 0,72
4,57	5,40	+ 0,83	+ 18,18	- 0,22
5,05	4,90	- 0,15	- 2,97	- 0,19

(Continuación tabla 1.)

Valores de la flecha de la tabla de montaje en metros	Valores de la flecha comprobada en metros	Diferencias en metros	Diferencias en por ciento	Diferencias en por ciento ordenadas
4,62	5,00	+ 0,38	+ 8,22	- 0,19
4,70	4,85	+ 0,15	+ 3,20	- 0,05
4,62	4,65	+ 0,03	+ 0,65	0,00
6,18	6,75	+ 0,57	+ 9,22	0,00
5,00	5,55	+ 0,55	+ 11,00	+ 0,09
7,24	7,75	+ 0,51	+ 7,05	+ 0,16
5,24	5,80	+ 0,56	+ 10,68	+ 0,19
5,24	5,80	+ 0,56	+ 10,68	+ 0,39
5,19	6,10	+ 0,89	+ 17,20	+ 0,52
4,57	5,55	+ 0,98	+ 21,40	+ 0,65

Línea a 220 kV. Aldeadávila-Villalbilla

(Conductor HAWK de 281,1 mm.<sup>2</sup> de sec. y 21,8 mm. de  $\phi$ , instalado en 1960).

18,71	18,30	- 0,41	- 2,19	+ 0,67
11,53	11,39	- 0,14	- 1,21	+ 0,73
50,26	42,67	- 7,59	- 15,10	+ 1,15
13,43	12,90	- 0,53	- 3,94	+ 1,19
18,34	16,81	- 1,53	- 8,35	+ 1,34
8,28	8,21	- 0,07	- 0,85	+ 1,91
47,60	49,35	+ 1,75	+ 3,67	+ 1,94
50,80	57,87	+ 7,07	+ 13,90	+ 2,12
20,91	20,95	+ 0,04	+ 0,19	+ 2,24
33,16	31,02	- 2,14	- 6,43	+ 2,46
22,16	20,87	- 1,29	- 5,82	+ 3,10
13,23	12,72	- 0,51	- 3,85	+ 3,12
14,93	16,13	+ 1,20	+ 8,05	+ 3,14
24,64	26,22	+ 1,58	+ 6,40	+ 3,20
24,07	23,69	- 0,38	- 1,58	+ 3,32
9,73	9,55	- 0,18	- 1,85	+ 3,44
49,63	49,71	+ 0,08	+ 0,16	+ 3,44
9,43	9,61	+ 0,18	+ 1,91	+ 3,67
13,66	12,39	- 1,27	- 9,30	+ 3,68
10,46	10,82	+ 0,36	+ 3,44	+ 3,84
19,12	18,80	- 0,32	- 1,67	+ 4,16
43,97	39,93	- 4,04	- 9,19	+ 4,43
30,30	31,24	+ 0,94	+ 3,10	+ 4,47
44,30	42,59	- 1,71	- 3,86	+ 4,51
33,09	31,45	- 1,64	- 4,95	+ 4,83
51,26	50,40	- 0,86	- 1,68	+ 4,90
18,39	19,00	+ 0,61	+ 3,32	+ 4,91
23,28	24,48	+ 1,20	+ 5,15	+ 4,94
65,35	56,81	- 8,54	- 13,05	+ 4,96
11,75	11,45	- 0,30	- 2,56	+ 5,15
11,94	11,50	- 0,44	- 3,68	+ 5,49
8,98	9,10	+ 0,12	+ 1,34	+ 5,84
8,28	8,65	+ 0,37	+ 4,47	+ 6,06
7,67	7,70	+ 0,03	+ 0,39	+ 6,06
11,03	10,00	- 1,03	- 9,34	+ 6,19
13,94	13,45	- 0,49	- 3,51	+ 6,40
11,44	11,50	+ 0,06	+ 0,52	+ 6,47
11,27	10,25	- 1,02	- 9,05	+ 6,56
11,89	10,50	- 1,39	- 11,70	+ 6,78
8,14	8,50	+ 0,36	+ 4,43	+ 6,71
11,28	11,00	- 0,28	- 2,48	+ 6,93
13,28	13,00	- 0,28	- 2,11	+ 7,05

(Continuación tabla I.)

Valores de la flecha de la tabla de montaje en metros	Valores de la flecha comprobada en metros	Diferencias en metros	Diferencias en por ciento	Diferencias en por ciento ordenadas
14,80	14,80	0,00	0,00	+ 7,07
18,05	17,15	- 0,90	- 4,99	+ 7,15
12,14	13,00	+ 0,86	+ 7,07	+ 7,27
8,97	8,95	- 0,02	- 0,22	+ 7,69
9,07	8,70	- 0,37	- 4,08	+ 7,73
11,83	12,20	+ 0,37	+ 3,13	+ 7,75
6,56	6,40	- 0,16	- 2,44	+ 7,77
8,09	8,00	- 0,09	- 1,11	+ 7,79
16,88	15,94	- 0,94	- 5,57	+ 8,05
7,85	9,62	+ 1,77	+ 22,55	+ 8,22
18,00	17,61	- 0,39	- 2,16	+ 8,27
11,40	11,41	+ 0,01	+ 0,09	+ 8,78
19,60	20,04	+ 0,44	+ 2,24	+ 8,82
14,91	15,20	+ 0,29	+ 1,94	+ 8,89
40,25	42,22	+ 1,97	+ 4,90	+ 8,90
27,12	25,06	- 2,06	- 7,60	+ 8,91
25,36	25,53	+ 0,17	+ 0,67	+ 9,20

*Líneas a 220 kV. Villalcampo-Villalbilla I y II*

(Conductor GULL de 381,5 mm.<sup>2</sup> de sec. y 25,38 mm. de  $\phi$ , instalado en 1957).

7,10	7,25	+ 0,15	+ 2,12	+ 9,22
7,91	8,40	+ 0,49	+ 6,19	+ 9,60
7,81	8,90	+ 0,09	+ 1,15	+ 9,90
7,05	7,40	+ 0,35	+ 4,96	+ 9,94
8,01	9,20	+ 1,19	+ 14,88	+ 10,10
9,76	10,90	+ 1,14	+ 11,68	+ 10,12
8,48	9,05	+ 0,57	+ 6,71	+ 10,40
7,12	7,90	+ 0,78	+ 10,93	+ 10,53
8,22	8,70	+ 0,48	+ 5,84	+ 10,68
7,64	8,25	+ 0,51	+ 6,68	+ 10,68
7,62	8,25	+ 0,63	+ 8,27	+ 10,85
8,88	8,50	- 0,38	- 4,28	+ 10,88
9,88	10,75	+ 0,87	+ 8,82	+ 10,93
7,05	7,75	+ 0,70	+ 9,94	+ 10,96
7,34	8,60	+ 1,26	+ 17,18	+ 10,97
7,78	8,25	+ 0,47	+ 6,06	+ 11,00
7,78	8,25	+ 0,47	+ 6,06	+ 11,07
7,31	7,25	- 0,06	- 0,82	+ 11,13
4,86	5,10	+ 0,24	+ 4,94	+ 11,32
8,54	7,45	- 0,91	- 10,67	+ 11,37
5,59	4,90	- 0,69	- 12,35	+ 11,40
10,92	11,00	+ 0,08	+ 0,73	+ 11,68
12,75	13,45	+ 0,70	+ 5,49	+ 11,83
5,54	6,70	+ 1,16	+ 20,95	+ 12,35
6,54	7,20	+ 0,66	+ 10,10	+ 12,39
12,50	13,65	+ 1,15	+ 9,20	+ 12,50
7,33	8,50	+ 1,17	+ 15,98	+ 12,68
7,07	7,70	+ 0,63	+ 8,91	+ 12,72
9,33	9,75	+ 0,42	+ 4,51	+ 13,56
6,52	7,60	+ 1,08	+ 16,55	+ 13,75
11,43	11,25	- 0,18	- 1,57	+ 13,90
6,97	8,00	+ 1,03	+ 14,80	+ 14,80
8,19	9,00	+ 0,81	+ 9,90	+ 14,88
9,77	9,70	- 0,07	- 0,72	+ 15,30
7,11	7,85	+ 0,74	+ 10,40	+ 15,42
8,97	9,30	+ 0,33	+ 3,68	+ 15,47

(Continuación tabla I.)

Valores de la flecha de la tabla de montaje en metros	Valores de la flecha comprobada en metros	Diferencias en metros	Diferencias en por ciento	Diferencias en por ciento ordenadas
8,40	8,50	+ 0,10	+ 1,19	+ 15,98
11,00	12,70	+ 1,70	+ 15,47	+ 16,35
8,52	9,20	+ 0,68	+ 7,99	+ 16,55
6,31	6,80	+ 0,49	+ 7,77	+ 16,71
6,41	7,40	+ 0,99	+ 15,42	+ 16,75
7,96	9,30	+ 1,34	+ 16,85	+ 16,85
6,94	8,10	+ 1,16	+ 16,71	+ 16,94
6,93	7,10	+ 0,17	+ 2,46	+ 17,18
6,07	8,12	+ 0,38	+ 4,91	+ 17,20
7,74	5,80	- 0,27	- 4,46	+ 18,18
7,83	8,70	- 0,87	+ 11,13	+ 20,75
7,30	8,10	+ 0,80	+ 10,97	+ 20,95
5,18	5,55	+ 0,37	+ 7,15	+ 21,40
6,38	7,75	+ 1,37	+ 21,50	+ 21,50
8,23	8,80	+ 0,57	+ 6,93	+ 22,55
7,31	8,05	+ 0,74	+ 10,12	+ 26,50

la traslación un número representativo de valoración de la fluencia, que desde su instalación ha experimentado el conductor.

Efectuadas estas operaciones hemos obtenido que la traslación necesaria corresponde a un valor de + 4,55. Trasladando el origen a este valor, obtenemos una nueva ordenación de diferencias, señalada en la tabla II del anejo, en la cual la media aritmética es cero, y que tiene, además, igual número de diferencias positivas y negativas, condiciones necesarias para una distribución normal. Es decir, en estas líneas aéreas el valor de la fluencia es de + 4,55 por 100 sobre el valor teórico de la flecha calculada en gabinete y facilitada a las brigadas de campo en la tabla de montaje que se utiliza en el regulado de este tipo de conductores.

Vamos a comprobar si el valor deducido como representativo de la fluencia es o no razonable. Para ello, lo aplicamos a un vano medio de 350 m., en el cual el conductor GULL (1) está tendido, ajustando su forma a una parábola de ecuación

$y = \frac{x^2}{3.000}$  resulta que, siendo su flecha de  $\frac{175^2}{3.000} = 10,20$  m., la fluencia será de:

$$\frac{10,20 \times 4,55}{100} = 0,47 \text{ m.}$$

Convencionalmente suele referirse la fluencia a un valor en °C de temperatura, cuya consideración en las ecuaciones de cambio de condiciones produciría el mismo aumento de flecha.

La magnitud de 0,47 m. viene a corresponder a la diferencia en las flechas para el vano indicado, vano de 350 m., cuando se produce una variación de temperatura entre 35° C. y 50° C. aproximadamente, es decir, 15° C. Este valor es razonable, por

(1) GULL corresponde a la denominación americana; en la norma UNE 21.016 le corresponde la denominación  $\pi$  de 381,5 mm.<sup>2</sup> de sección y 25,38 mm.  $\phi$ .

TABLA II

- 22.29	- 8.49	- 5.66	- 2.31	+ 1.29	+ 4.27	+ 6.77	+ 12.30
- 21.25	- 8.44	- 5.37	- 2.09	+ 1.51	+ 4.34	+ 6.82	+ 12.39
- 19.65	- 8.41	- 5.27	- 1.45	+ 1.51	+ 4.35	+ 6.85	+ 12.63
- 17.60	- 8.40	- 4.77	- 1.42	+ 1.64	+ 4.36	+ 7.13	+ 12.65
- 16.90	- 8.23	- 4.74	- 1.41	+ 1.85	+ 4.65	+ 7.28	+ 13.63
- 16.25	- 8.06	- 4.74	- 1.35	+ 1.92	+ 4.67	+ 7.80	+ 16.20
- 15.22	- 7.52	- 4.55	- 1.23	+ 2.01	+ 5.05	+ 7.83	+ 16.40
- 13.91	- 7.29	- 4.55	- 1.11	+ 2.13	+ 5.35	+ 7.95	+ 16.85
- 13.89	- 7.11	- 4.50	- 1.11	+ 2.16	+ 5.39	+ 8.13	+ 16.95
- 13.85	- 7.03	- 4.46	- 0.88	+ 2.38	+ 5.55	+ 8.17	+ 18.00
- 13.74	- 6.99	- 4.39	- 0.87	+ 2.50	+ 5.57	+ 9.01	+ 21.95
- 13.60	- 6.74	- 4.36	- 0.71	+ 2.52	+ 5.85	+ 9.20	
- 13.19	- 6.71	- 4.16	- 0.39	+ 2.60	+ 5.98	+ 9.35	
- 12.90	- 6.68	- 4.03	- 0.12	+ 2.72	+ 6.13	+ 10.25	
- 12.15	- 6.66	- 3.90	- 0.08	+ 3.14	+ 6.13	+ 10.33	
- 10.98	- 6.64	- 3.88	- 0.04	+ 3.18	+ 6.30	+ 10.75	
- 10.37	- 6.40	- 3.82	+ 0.28	+ 3.20	+ 6.33	+ 10.87	
- 10.12	- 6.23	- 3.40	+ 0.35	+ 3.22	+ 6.38	+ 10.92	
- 9.54	- 6.22	- 3.36	+ 0.36	+ 3.24	+ 6.41	+ 11.43	
- 9.50	- 6.13	- 3.21	+ 0.39	+ 3.50	+ 6.42	+ 11.80	
- 9.01	- 6.12	- 2.64	+ 0.41	+ 3.67	+ 6.45	+ 12.00	
- 8.83	- 5.76	- 2.61	+ 0.60	+ 3.72	+ 6.50	+ 12.16	
- 8.63	- 5.71	- 2.43	+ 0.94	+ 4.43	+ 6.58	+ 12.20	

que coincide con el señalado por Imatram Voima Osakeyhtio (Transmission Line Division) en un artículo presentado en la CIGRE (Conferencia Internacional Grandes Redes Eléctricas) en 1958 con el título "The Creep of ACSR and practical attringing accuracy".

### Determinación de los errores fortuitos.

En la figura 1.<sup>a</sup> representamos los valores que reflejan los errores fortuitos de la tabla II del anexo después de eliminar el sistemático de la fluencia en forma normal y en su transformación logarítmica. Sin embargo, debemos advertir que esta figura se ha dibujado después de agrupar los valores en determinado número de intervalos de clase para facilitar los cálculos, sobre todo el de la desviación típica y el de la probabilidad, que vamos a utilizar para deducir consecuencias que, a nuestro modo de ver, pueden ser interesantes para que las consideren los proyectistas de líneas aéreas, para desarrollar el proyecto de las mismas de acuerdo con las modernas tendencias que empiezan a imponerse en Europa, basadas en los conceptos que expone Alfredo Páez Balaca en "La determinación del coeficiente de seguridad en las distintas obras", texto publicado bajo la dirección del Sr. E. Torroja, muy conocido en los ambientes científicos internacionales.

Para el cálculo de la desviación típica de los valores de las diferencias de flechas, utilizamos un formato para relacionarlas de manera sistemática, utilizando la terminología de J. Mothes, en su obra "Estadística aplicada a la ingeniería".

Con los valores anteriores vamos a determinar para la nuestra la media aritmética  $m$  y la desviación típica  $\sigma$ , para lo que haremos uso de la corrección de Sheppard, por obtener estos parámetros de la distribución agrupada.

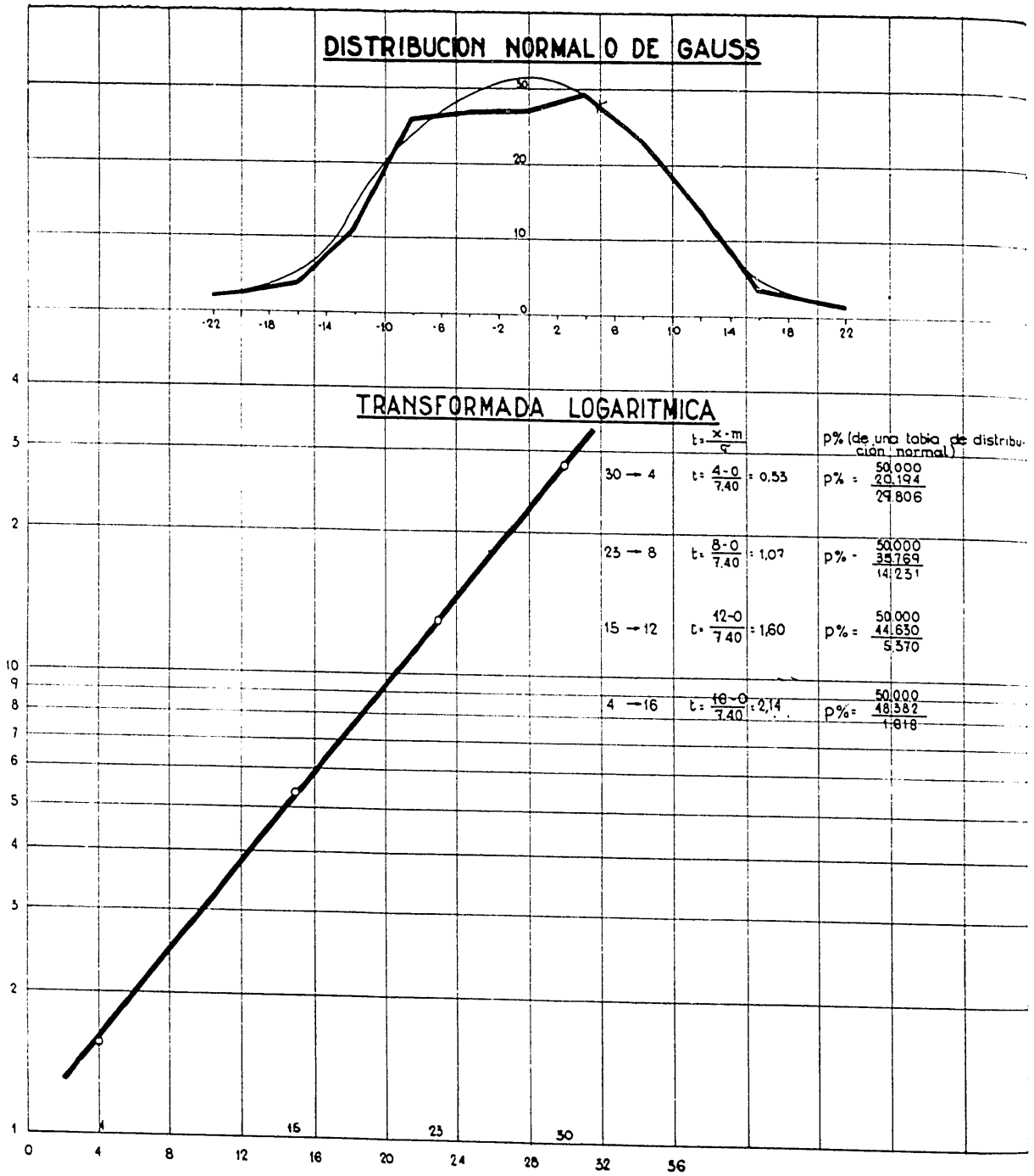


Figura 1.

Puesto que en este caso situamos el origen en la media de la distribución, tendremos  $m = m = 0$  y para la varianza  $S_2 = S_2 - \frac{h^2}{12}$ , es decir:

$$\text{Varianza} = S = h^2 \left( \frac{\sum n_i t_i^2}{n} - \left( \frac{\sum n_i t_i}{n} \right)^2 \right) = 4^2 \left[ \frac{604}{172} - \left( \frac{6}{172} \right)^2 \right] = 56,16;$$

$$\text{Varianza} = S = 56,16 - \frac{4^2}{12} = 54,83;$$

$$\text{Desviación típica} = \sigma = \sqrt{54,83} = 7,40.$$

TABLA III

	Intervalos de clase	$n_i$	$x_i$	$t_i$	$n_i t_i$	$n_i t_i^2$
1	$\leq -10$	18	-12	-3	-54	162
2	-10 a -6	26	-8	-2	-52	104
3	-6 a -2	27	-4	-1	-27	27
4	2 a 2	27	0	0	-133	0
5	2 a 6	30	4	1	139	30
6	6 a 10	23	8	2	30	92
7	$\geq 10$	21	12	3	46	189
	$h = 4$	$\Sigma n_i = 172$			$\Sigma n_i t_i = 6$	$\Sigma n_i t_i^2 = 604$

Aunque parece lógico aceptar la suposición de que las diferencias que figuran en el formato anterior, siguen una distribución normal o de Gauss, sobre todo, considerando su representación en la figura 1.<sup>a</sup>, parece necesario su comprobación, utilizando para ello el criterio de Pearson o del  $\chi^2$ , mediante el desarrollo tabular, de todos conocido, siguiente (1):

TABLA IV

Valor de la clase	Números observados $v$	Números teóricos $np$	Diferencias $v - np$	$(v - np)^2$
-12	18	$172 \times \frac{9,17}{100} = 15,75$	2,25	5,06
-8	26	$\times 12,01 = 20,70$	5,30	28,09
-4	27	$\times 18,18 = 31,20$	4,20	17,64
0	27	$\times 21,28 = 36,70$	9,70	94,09
4	30	$\times 18,18 = 31,20$	1,20	1,44
8	23	$\times 12,01 = 20,70$	2,30	5,29
12	21	$\times 9,17 = 15,75$	5,25	27,56
	$\Sigma v = 172$	$\Sigma np = 172$		

$$\chi^2 = \Sigma \frac{(v - np)^2}{np} = 6,85;$$

que corresponde en la tabla III de Cramer para un grado de libertad de  $7 - 2 - 1 = 4$ , a un valor por bajo del 5 por 100 de  $\chi^2$ , que es 9,488. Es totalmente aceptable la hipótesis de distribución normal.

Aplicando los valores hallados para la media y desviación típica a una tabla de probabilidades para distribución normal, como, por ejemplo, la que figura en la

(1) Las notaciones son las utilizadas por H. CRAMER en su obra *Métodos matemáticos de estadística*.

obra "Curso de estadística", tomo I, de Enrique Chacón, podemos obtener la probabilidad para los casos que nos interesen, que es lo que vamos a hacer a continuación.

**Probabilidad de los errores posibles en la flecha del cable Gull, regulado según las tablas de montaje de Iberduero y los pliegos de condiciones para su instalación.**

Hemos hallado que en el cable GULL, regulado de acuerdo con la tabla de montaje de Iberduero, la fluencia representa un aumento de + 4,55 por 100 en el valor de la flecha (vamos a efectuar los estudios posteriores con este conductor, y a considerar el mismo valor de la fluencia de los tres conductores medidos, por las razones adelantadas al principio del artículo), y también hemos conseguido conocer que la distribución del total de los errores en la misma, con los métodos de cálculo y los de montaje de Iberduero, es una distribución normal caracterizada por su media y su desviación típica.

A continuación vamos a aplicar este resultado al cálculo de la probabilidad de que se presenten errores en las condiciones indicadas en las flechas, de valor absoluto 0,20 — 0,40 — ... — 2,00 m. en el vano medio supuesto de 350 m. y en el citado conductor GULL, regulado para que su ecuación para la condición de máxima flecha (+ 50° C sin sobrecarga) sea  $y = \frac{x^2}{3.000}$ , magnitud que reglamentariamente corresponde al estado tensional preciso para determinar las alturas libres.

Los 0,20 m. de error representan:  $\frac{0,20}{10,20} = 1,96$  por 100 de la flecha teórica que referidos a la media adoptada de cero la transforma en  $\pm 1,96$ . Haciendo idénticas operaciones para el resto de los valores, obtenemos la tabla V.

T A B L A V

Error en la flecha	% sobre la flecha	X Valor referido a la media de 0
0,20	1,96	1,96
0,40	3,92	3,92
0,60	5,88	5,88
0,80	7,85	7,85
1,00	9,80	9,80
1,20	11,80	11,80
1,40	13,70	13,70
1,60	15,70	15,70
1,80	17,65	17,65
2,00	19,60	19,60

Aplicando la fórmula  $t = \frac{x - m}{s}$ , y entrando en la tabla de probabilidad mencionada, obtenemos las probabilidades:

$$t = \frac{1,96 - 0}{7,40} = 0,265 ;$$

para este valor de  $t$ , la superficie correspondiente al área rayada en la curva de probabilidades es de 0,10257, correspondiendo, por tanto, una probabilidad de

$$\frac{0,50 - 0,10257}{0,50} \times 100 = 80\% .$$

Pero como esta probabilidad corresponde a un error de  $\pm 0,20$  m., y como sólo nos interesan los errores que reduzcan la altura libre de nuestra línea aérea, la probabilidad se reduce a la mitad, es decir, al 40 por 100.

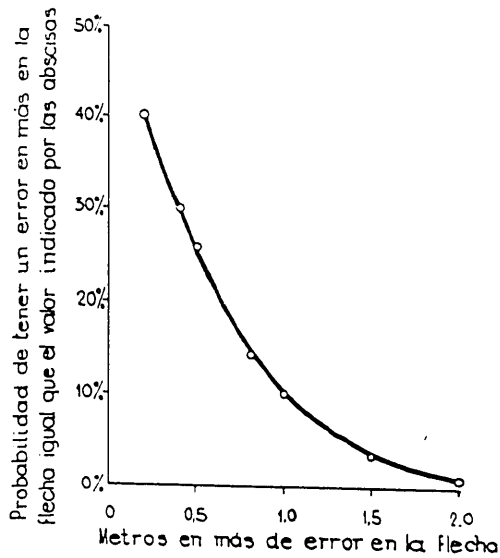


Figura 2.

Obrando de manera análoga, llegamos a obtener la figura 2.<sup>a</sup> que representa probabilidades en un tanto por ciento en función de los valores absolutos de los errores positivos en metros, para el conductor y vano a que hemos reducido nuestro estudio.

Analizando la figura 2.<sup>a</sup>, que servirá para calcular probabilidades *a priori*, podemos ver que la probabilidad de tener 1 m. más de flechas que la prevista es de 9,50 por 100, valor que se reduce al 3,50 por 100 si el error en la flecha es de 1,40 m.

### Aplicación práctica de los resultados obtenidos con el cálculo de probabilidades anterior.

Supongamos que ocurre cierto incidente porque la línea aérea no respeta la distancia reglamentaria, y el incidente es la descarga instantánea de un arco, que de 3 a 10 ciclos se despeja por intervención de un interruptor. Si se pudiese valorar el costo del incidente, es fácil encontrar un punto de equilibrio teórico económico entre dicho costo y el que se produciría por un realce de las alturas de las torres para que el citado incidente no se produjese. Ahora bien, este estudio presenta dificultades de orden práctico que por ahora no podemos resolver, pero que está planteado en un grupo de trabajo internacional de los Comités 6 y 7 de CIGRE.

Pero esperando este momento, podemos seguir nuestro razonamiento tratando de determinar una tolerancia lógica de reducida probabilidad de existencia que puede servirnos para fijar las separaciones o alturas libres al terreno del conductor, que pueda lógicamente reflejarse en la reglamentación de líneas eléctricas aéreas a efectos de la seguridad pública. Examinando la curva de distribución de errores de la figura 2.ª, parece razonable admitir para la línea aérea de Iberduero con cable GULL y para su vano medio de 3,50 m. citado, una tolerancia de 1 m., puesto que, además de corresponder a una probabilidad reducida del 9,50 por 100, está situada cerca del punto de inflexión, en el cual, pequeñas variaciones a uno y otro lado del mismo, suponen un aumento excesivo de probabilidad o de flecha.

Para, por otra parte, detallar más en qué se basa la seguridad pública, nos parece puede servir de base un incidente registrado en Iberduero del tipo señalado en el párrafo anterior. Se trata que en una zona montañosa, punto considerado como inaccesible, porque en el momento de construcción de la línea sólo era atravesado por carros de bueyes, resulta que con la industrialización de la región, la recogida de hierba se hace con camiones que, naturalmente tienen un gálibo muy superior al del medio primitivo. En el incidente, el conductor quedaba a 4,50 m. sobre el terreno, y la línea era de 138 kV. El camión alcanzaba con su carga de hierba 4,25 m., y de ésta sobresalía además un rastrillo que entró en contacto, o al menos incitó la descarga de la línea eléctrica. No hubo pérdidas de vidas humanas. Este dato nos parece sólido argumento para fijar la altura del gálibo del vehículo posible que pueda circular debajo de la línea aérea en cualquier terreno.

Con todas estas premisas, las alturas mínimas del conductor sobre el terreno para diferentes escalones de tensión que se utilizan o están previstos en España, son los que se deducen en el siguiente apartado.

#### Aplicación para la determinación de las alturas mínimas de los conductores sobre el terreno.

El diámetro de los conductores y la longitud de los vanos aumentan cuando lo hace la tensión de servicio de las líneas eléctricas aéreas. Por lo tanto, a escalón mayor de tensión de servicio corresponden mayores flechas.

Tensión de servicio en kV.	Vano medio en m.	Parábola de distribución de apoyos hip. + 50° C. sin sobrecarga.
138	300	$y = \frac{x^2}{2.000}$
220	350	$y = \frac{x^2}{3.000}$
380	400	$y = \frac{x^2}{3.000}$

Los apoyos se emplazan en el perfil longitudinal de la línea aérea asimilando las catenarias a parábolas con parámetro dependiente de la longitud del vano y del cociente entre su tracción total y el peso unitario del conductor empleado. En

general, podemos suponer que las parábolas que se utilizan se ajustan a las ecuaciones reseñadas en el cuadro de la página anterior.

Advertimos que en el escalón correspondiente a la tensión de servicio de 380 kV., la parábola es idéntica a la del escalón 220 kV., porque suele utilizarse el mismo tipo de conductor, disponiendo en aquel caso los conductores en haz.

En estas condiciones, las flechas máximas del conductor en terreno horizontal valen:

138 kV.	11,25 m.
220 kV.	10,20 m.
380 kV.	13,35 m.

Para señalar el valor de las distancias disruptivas en el aire, suele en general admitirse, por convención, asemejar los electrodos reales a los correspondientes al explosor punta-plano infinito (1), y que las sobretensiones máximas están producidas por las derivadas de maniobras de servicio de la línea eléctrica y por estudio de las redes, suele admitirse que la onda de impulso creada, tiene una cresta que corresponde al extraordinario valor de 2,5 veces la tensión máxima de cresta de 50 Hz. Por estudios estadísticos de la distribución de estas sobretensiones, se ha visto que prácticamente nunca se alcanza este valor. Respecto al rayo, indicaremos que su circuito de descarga es independiente del que tratamos, y que existe una técnica muy detallada de protección de la línea aérea, que no es la que determina el aislamiento.

Previa estas consideraciones elementales de la técnica para el cálculo del aislamiento de líneas eléctricas, necesaria para las conclusiones que queremos alcanzar, podemos redactar el cuadro siguiente, en el cual hemos mayorado la distancia disruptiva correspondiente a la sobretensión de maniobra con un coeficiente de seguridad de 1,1, para tener en cuenta las condiciones atmosféricas adversas.

	138 kV. $\bar{m}$ .	220 kV. $\bar{m}$ .	380 kV. $\bar{m}$ .
Separación base mínima .....	4,25	4,25	4,25
Distancia disruptiva necesaria para preservarse de la descarga explosiva correspondiente a:			
$\frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 2,50 \times 1,1$ (de c/s) (2) que corresponde a ..	0,71	1,28	2,52
Asignación a la fluencia: $\frac{\text{flecha} \times 4,55}{100}$ .....	0,51	0,47	0,61
Tolerancia para un error fortuito (con probabilidad 9,50 por 100) .....	1,00	1,00	1,00
<i>Total</i> .....	6,47	7,00	8,38

(2)  $U$  representa la tensión máxima de la red entre fases en kV.

(1) Los valores se han tomado de la publicación de la Ohio-Brass de julio de 1962, volumen 31, número 7, y corresponden a condiciones normales de presión, temperatura y humedad.

Por lo que, redondeando estas magnitudes, se obtienen los valores siguientes:

Para 138 kV. ....	6,50 m.
" 220 kV. ....	7,00 m.
" 380 kV. ....	8,50 m.

Puede apreciarse la diferencia existente con la actual reglamentación al fijar la separación correspondiente a la tensión de 138 kV. (Distancia reglamentaria de 6 m.).

Podríamos, en este caso, prescindir de los 0,50 m., que aproximadamente supone la fluencia aumentando la tensión de regulado de los conductores, de tal manera que, inmediatamente después del engrapado, las separaciones al terreno fueran las indicadas, para que una vez transcurrido el tiempo que exige la fluencia para su desarrollo, alcanzase las alturas libres de 6, 6,50 y 8,00 m., pero obrando así no llegamos a una solución aconsejable, si se trata de nuevas construcciones, porque en tal caso ponemos los conductores en peligro de avería al regularlos a un estado tensional en el cual el EDS (Every Day Stress) sería superior al recomendado por el pertinente Comité Internacional de CIGRE. Esta limitación del EDS tiene por objeto evitar que los conductores vibren, fenómeno que en España se presenta y que será objeto de otro artículo que estamos redactando en amplia colaboración con otras empresas españolas.

Puede, por el contrario, resultar interesante si se trata de transformación de líneas aéreas, en las cuales ha transcurrido tiempo suficiente para que la fluencia se haya manifestado, e incluso considerar seriamente reducir el error fortuito a 0,50 m. siempre que se haya efectuado una revisión veraz de las alturas a que se encuentran los conductores sobre el terreno en todos los vanos de la línea aérea que pretendemos transformar.

En tal caso, las alturas libres de los conductores podrán reducirse a:

Para 138 kV. ....	5,50 m.
" 220 kV. ....	6,00 m.
" 380 kV. ....	7,50 m.

### Conclusión.

Buscando un número representativo para valorar el fenómeno de la fluencia resultante en las últimas líneas aéreas construídas por Iberduero, hemos llegado a conclusiones que creemos sirven para aclarar el oscuro concepto de las alturas mínimas sobre el terreno que figuran en los reglamentos de líneas eléctricas aéreas.

Si varias sociedades españolas propietarias de líneas aéreas se interesasen en estudiar las verdaderas alturas de sus conductores sobre el terreno, podrían confirmarse los valores anteriores y, en consecuencia, se mejorarían los cálculos de gabinete al estudiar las flechas y tracciones de los conductores, con lo que se perfeccionarían los métodos de despliegue, regulación y engrapado de los mismos.

De esta forma podría reducirse los errores fortuitos y considerar en su verdadero significado la parte que nos interesa del fenómeno de la fluencia, que como se sabe, se agudiza al aumentar la temperatura de los conductores, hecho este último que se está produciendo en nuestro país, debido a la sobrecarga que soportan los tendidos actuales al tener que atender, hasta tanto entren en servicio nuevas instalaciones, la espectacular demanda de energía eléctrica.

El autor agradece la colaboración por la aplicación de la estadística matemática, al alumno de quinto curso de la E. T. S. de Ingenieros Industriales de Bilbao don Fernando Verano Elvira.