

5. Protección externa contra rayos

5.1 Instalación captadora

La instalación captadora de un sistema de protección contra rayos tiene la misión de impedir las descargas directas de rayo en el volumen a proteger. Debe diseñarse para prevenir descargas incontroladas de rayo en la estructura objeto de protección.

Mediante una instalación captadora correctamente dimensionada se reducen, de manera controlada, las consecuencias de una descarga de rayo en el edificio.

La instalación captadora puede conformarse en base a los elementos siguientes, que pueden combinarse discrecionalmente entre sí:

- ⇒ Puntas captadoras.
- ⇒ Cables captadores.
- ⇒ Mallas captadoras.

Al fijar el emplazamiento y posición de los dispositivos captadores del sistema de protección contra rayos, hay que prestar especial atención y cuidado a la protección de las esquinas de la instalación que se desea proteger. Esto tiene especial relevancia para dispositivos captadores situados sobre tejados planos o en la parte superior de las fachadas.

Los dispositivos captadores deben instalarse, sobre todo, en las esquinas.

Para determinar la posición de los dispositivos captadores necesarios pueden utilizarse tres procedimientos:

- ⇒ Método de la esfera rodante.
- ⇒ Método de la malla captadora.
- ⇒ Método del ángulo de protección.

El de la esfera rodante es el método de planificación más universal y el que se recomienda utilizar para casos complicados debido a la geometría de la edificación.

A continuación se exponen los tres procedimientos.

5.1.1 Métodos de diseño y tipos de dispositivos captadores

Método de la esfera rodante – “Modelo geométrico – eléctrico”

En el caso de los rayos nube-tierra, la descarga descendente de rayo va creciendo, escalonadamente desde la nube en dirección a la tierra. Cuando la descarga descendente se ha aproximado entre 10 y 100 metros a tierra, se sobrepasa la capacidad de aislamiento eléctrico del aire próximo a la misma. En ese momento empieza a crecer otra descarga similar a la descendente en dirección a ésta: la descarga ascen-

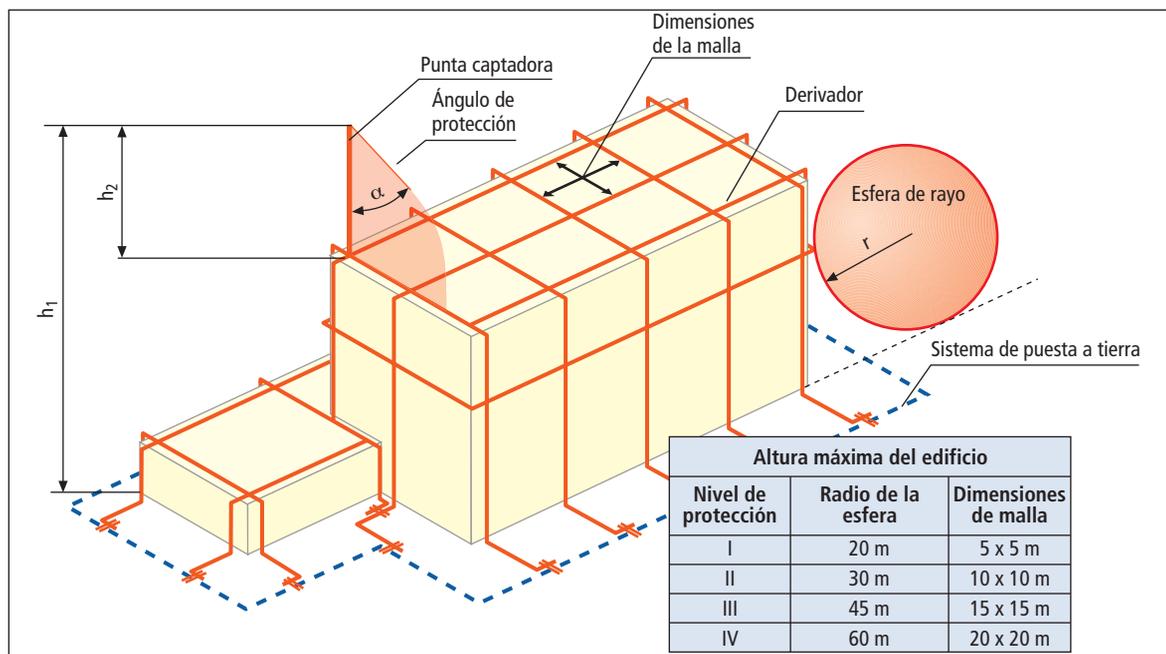


Fig. 5.1.1: Procedimientos para el diseño de la instalación captadora en edificios de gran altura.

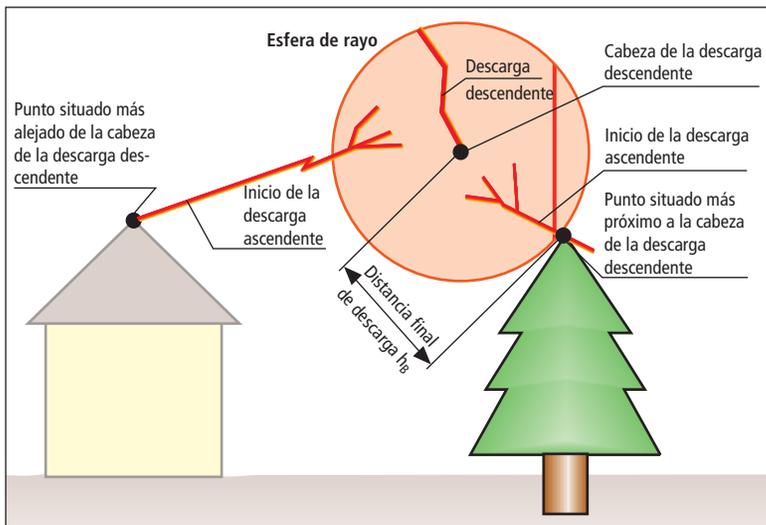


Fig. 5.1.1.1: Descarga inicial ascendente que determina el lugar en que va a caer el rayo.



Una esfera de rayo, como se expone en este ejemplo, puede tocar en varios puntos, no sólo la punta de la torre sino también la nave de la iglesia. En todos los puntos de contacto es posible que se produzca una descarga de rayo.

Fig. 5.1.1.2: Modelo de la esfera rodante
Fuente: Prof. Dr. A. Kern, Aachen (Aquisgrán).

dente de rayo. Con ello se determina el lugar de descarga del rayo (Figura 5.1.1.1).

El punto de inicio de la descarga ascendente y, con ello, el punto posterior de descarga del rayo, lo determina, sobre todo, la cabeza de la descarga descendente. Ésta sólo puede aproximarse a tierra hasta una distancia concreta que viene determinada por la intensidad de campo eléctrico del suelo, creciente continuamente, durante la aproximación de la cabeza de la descarga descendente. La distancia más pequeña entre la cabeza de la descarga descendente y el punto de inicio de la descarga captadora se denomina tramo final de descarga h_B (se corresponde con el radio de la esfera de rayo).

Inmediatamente después de que se sobrepasa la capacidad de aislamiento en un punto, se origina la descarga ascendente que lleva a la descarga final y que se superpone al trayecto de la descarga final. Basándose en las observaciones sobre el efecto de protección de cables de guarda y de torres de alta tensión se ha realizado el denominado "modelo geométrico-eléctrico".

Este modelo está basado en la hipótesis de que la cabeza de la descarga descendente se aproxima a los objetos situados en tierra, sin verse afectada por nada, hasta que alcanza la distancia final de descarga.

El lugar o punto de descarga viene determinado por el objeto que esté a menor distancia de la cabeza de

la descarga descendente. La descarga ascendente que allí se inicia "se impone" finalmente (Figura 5.1.1.2)

Clasificación de los sistemas de protección y radio de la esfera rodante

En una primera aproximación existe una proporcionalidad entre el valor cresta de la corriente de rayo y la carga eléctrica acumulada en la descarga descendente. Asimismo, también el campo eléctrico del suelo, al aproximarse la descarga descendente creciente, en un primer momento, depende linealmente de la carga acumulada en la misma.

De este modo, existe una proporcionalidad entre el valor de cresta I de la corriente de rayo y la distancia final de descarga h_B (= radio de la esfera rodante):

$$r = 10 \cdot I^{0.65}$$

r en m

I en kA

La protección contra rayos en edificios está descrita en la norma UNE EN 62305-1 (IEC 62305-1). Esta norma define, entre otras cosas, la clasificación de los sistemas de protección y fija las medidas de protección contra rayos correspondientes a cada caso.

Esta norma diferencia entre cuatro niveles de protección. El nivel de protección I ofrece la máxima protección y el nivel de protección IV la menor. Unida a la

Nivel de riesgo LPL	Probabilidades para los valores límite de la corriente de rayo		Radio de la esfera rodante (Distancia final de descarga h_B) – r en m	Valor cresta mínimo de la corriente – I en kA
	<Valores máximos según tabla 5 UNE EN 62305-1	>Valores mínimos según tabla 6 UNE EN 62305-1		
IV	0.84	0.97	60	16
III	0.91	0.97	45	10
II	0.97	0.98	30	5
I	0.99	0.99	20	3

Tabla 5.1.1.1.: Relaciones entre niveles de riesgo, efectividad E_p , distancia final de descarga h_B y mínimo valor cresta de la corriente I.
Fuente: Tablas 5, 6 y 7 de la norma UNE EN 62305-1 (IEC 62305-1).

clase de protección está la eficacia de la instalación captadora E_p , es decir, qué porcentaje de las descargas de rayo esperadas pueden ser controladas de forma segura por la instalación captadora. Después, se determina la distancia final de descarga, y con ello el radio de la "esfera de rayo". En la **tabla 5.1.1.1** se recoge la relación existente entre clase de protección, eficacia de la instalación captadora E_p , distancia final de descarga/radio de la "esfera rodante" y valor cresta de la corriente.

Basado en la hipótesis del "modelo geométrico – eléctrico", según la cuál la cabeza de la descarga descendente se aproxima arbitrariamente, sin influencia alguna, a los objetos situados sobre la tierra, hasta llegar a la distancia final de descarga, se puede derivar un procedimiento general que permite comprobar la eficacia del sistema definido respecto del edificio a proteger. Para la ejecución del método de la esfera rodante se precisa un modelo a escala del edificio/estructura a proteger (p. ej. a una escala de 1:100), en el que se reproducen los contornos externos que lo delimitan y la instalación captadora correspondiente. Dependiendo del lugar de emplazamiento del edificio que se pretende estudiar, es necesario asimismo incluir los edificios y objetos circundantes, ya que éstos pueden actuar eficazmente como "medidas naturales de protección".

Además, en función del nivel de protección, la esfera del rayo tendrá un radio distinto que se corresponde con la distancia final de descarga (el radio r de la "esfera rodante", dependiendo de la clase de protección, será de 20, 30, 45 o 60 m). El centro de la "esfera rodante" utilizada se corresponde con la cabeza de la descarga descendente respecto a la cuál se forman las correspondientes descargas ascendentes.

La esfera rodante se acerca al edificio objeto de estudio, y se señalan los puntos de contacto de la esfera

con el mismo. Dichos puntos de contacto representan los posibles puntos de descarga del rayo. A continuación, se hace rodar la esfera sobre el edificio en todas las direcciones, y de nuevo se procederá a marcar todos los puntos de contacto. De este modo, se localizan sobre el modelo todos los puntos posibles de descarga de rayo, y además se pueden establecer también todas las zonas de posibles descargas laterales. Las zonas de protección naturales resultantes de la geometría del edificio que se pretende proteger y de su entorno, resultan ahora claramente perceptibles. Por tanto, en estos puntos puede, prescindirse de la instalación de pararrayos (**Figura 5.1.1.3**).

Hay que tener muy en cuenta, sin embargo, que se han constatado huellas de rayos en algunos puntos que no habían sido tocados directamente por la "esfera rodante". Se presume que esto se debe, entre otras cosas, a que en caso de descargas múltiples de rayo, el punto de base del rayo ha cambiado de posición a consecuencia de la acción del viento. En consecuencia, alrededor de los puntos de descarga de rayo

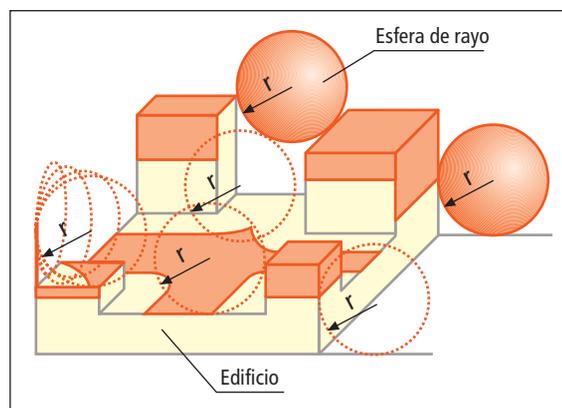


Fig.5.1.1.3: Aplicación esquemática del método de la "esfera rodante" en un edificio con superficie muy irregular.

debemos considerar un área de aproximadamente un metro, en la que es posible que se produzcan impactos.

Ejemplo 1: Nuevo edificio de la Administración en Munich

En la fase de proyecto del nuevo edificio de la Administración, a causa de la compleja geometría del edificio, se decidió utilizar el procedimiento de la esfera rodante para identificar las zonas expuestas al riesgo de descargas de rayo.

Esto fue posible ya que se disponía de una maqueta de la nueva construcción a escala 1:100. Se determinó el nivel de protección I como exigencia al sistema de protección contra rayos. Es decir, que el radio de la esfera rodante fuera de 20 cm (Figura 5.1.1.4).

En los lugares en los que "la esfera de rayo" toca partes del edificio puede producirse una descarga directa de rayo con el correspondiente valor mínimo de corriente de cresta de 3 kA (Figura 5.1.1.5). En consecuencia, en dichos puntos es necesario instalar dispositivos captadores. Si, además de lo indicado, en dichos puntos o en sus inmediaciones, existen equipos eléctricos (p.ej. en la cubierta del edificio), es necesario adoptar medidas adicionales de protección.

Con la aplicación del procedimiento de la esfera de rayo se evitó tener que instalar dispositivos captadores en aquellos lugares en los que no eran necesarios desde el punto de vista de protección. Por otra parte, se consiguió mejorar la protección contra descargas directas en aquellos lugares en los que dicha protección era necesaria.

Ejemplo 2: Catedral de Aquisgrán (Aachen)

La catedral se encuentra situada en el casco antiguo de la ciudad de Aquisgrán y está rodeada de edificios altos.

Junto a la catedral hay una maqueta a escala 1:100 con la que se pretende hacer fácilmente comprensible a los visitantes la geometría de la edificación.

Los edificios situados alrededor de la catedral aportan una protección natural a la misma contra descargas de rayo.

Además y para poder exponer mejor la eficacia de las medidas de protección contra rayos, se han reproducido los edificios colindantes con sus elementos más representativos a la misma escala (1:100) (Figura 5.1.1.6).



Fig. 5.1.1.4: Edificio administrativo de nueva construcción: Modelo con "esfera rodante" nivel de protección I.
Fuente: WBG Wiesinger.



Fig. 5.1.1.5: Edificio administrativo de nueva construcción DAS: Vista aérea de las zonas expuestas a descargas de rayo para el nivel de protección I.
Fuente: WBG Wiesinger.



Fig. 5.1.1.6: Catedral de Aquisgrán (Aachen): Modelo con entorno y "esferas de rayo" para los niveles de protección II y III.
Fuente: Prof. Dr. A. Kern, Aquisgrán.

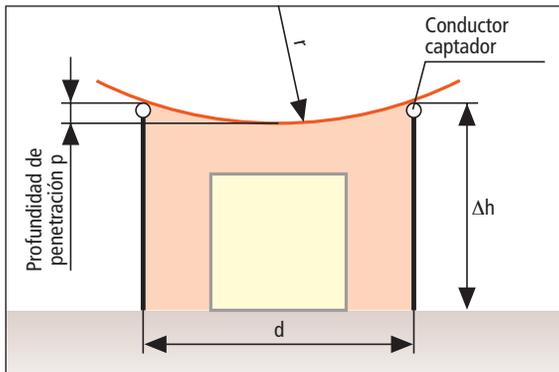


Fig. 5.1.1.7: Profundidad de penetración p de la esfera rodante.

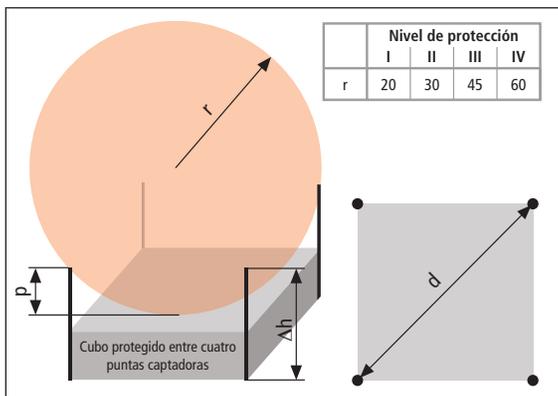


Fig. 5.1.18: Dispositivos captadores para estructuras en cubierta con su correspondiente espacio protegido.

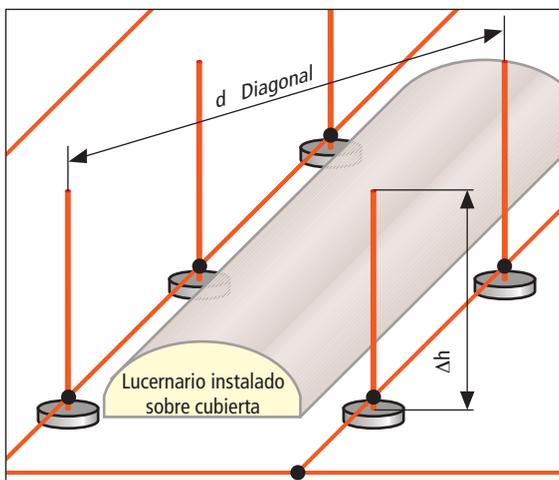


Fig. 5.1.1.9: Cálculo de Δh, por el método de la esfera rodante, para el caso de varias puntas captadoras.

La **figura 5.1.1.6** muestra además “esferas rodantes de rayo” de los niveles de protección II y III (es decir con radios de 30 y 45 cm) aplicadas sobre la maqueta.

El objetivo buscado era mostrar el incremento de las exigencias a la instalación captadora al disminuir el radio de la esfera rodante. Es decir, mostrar qué zonas de la catedral de Aquisgrán debían considerarse como expuestas al riesgo de descargas de rayo al usar un sistema de protección contra rayo nivel II que exige un mayor grado de protección.

La “esfera rodante” más pequeña (es decir con el nivel de protección más elevado) naturalmente toca a la maqueta no sólo en todos los puntos en los que la “esfera rodante” con el radio más grande ha tocado.

La profundidad de penetración de la esfera rodante es determinante en el dimensionado de los dispositivos captadores para un edificio o para una instalación dispuesta sobre la cubierta.

Con la fórmula siguiente se puede calcular la profundidad de penetración p de la esfera rodante, cuando la esfera rueda sobre “raíles”. Esto se da, por ejemplo, en el caso de dos cables tensados.

$$p = r - \left[r^2 - (d / 2)^2 \right]^{1/2}$$

Siendo:

r Radio de la esfera rodante.

d Distancia entre dos puntas captadoras o entre dos conductores paralelos.

En la **figura 5.1.1.7** se expone detalladamente esta consideración.

Cuando se pretende proteger la superficie de la cubierta o estructuras montadas sobre la misma contra descargas directas de rayo, suelen utilizarse normalmente puntas captadoras. Con la disposición en forma de cuadrado de las puntas captadoras que, por lo general no están unidas mediante cables tensados, la esfera no se desliza “sobre raíles” sino que “penetra más profundamente” (**Figura 5.1.1.8**).

La altura de las puntas captadoras Δh debe ser superior a la profundidad de penetración p y por tanto mayor que la penetración de la esfera de rayo. Con esta altura complementaria de las puntas captadoras se garantiza que la esfera rodante no llegue a tocar el objeto que se pretende proteger.

d	Penetración de la esfera rodante (m) (redondeada)			
	Nivel de protección con radio de la esfera rodante en metros			
Distancia entre puntas captadoras	I (20 m)	II (30 m)	III (45 m)	IV (60 m)
2	0.03	0.02	0.01	0.01
4	0.10	0.07	0.04	0.03
6	0.23	0.15	0.10	0.08
8	0.40	0.27	0.18	0.13
10	0.64	0.42	0.28	0.21
12	0.92	0.61	0.40	0.30
14	1.27	0.83	0.55	0.41
16	1.67	1.09	0.72	0.54
18	2.14	1.38	0.91	0.68
20	2.68	1.72	1.13	0.84
23	3.64	2.29	1.49	1.11
26	4.80	2.96	1.92	1.43
29	6.23	3.74	2.40	1.78
32	8.00	4.62	2.94	2.17
35	10.32	5.63	3.54	2.61

Tabla 5.1.1.2: Penetración de la esfera rodante en caso de dos puntas captadoras o dos conductores captadores paralelos.

Otra posibilidad para calcular la altura de las puntas captadoras se recoge en la **tabla 5.1.1.2**. La profundidad de penetración de la esfera rodante viene dada por la mayor distancia existente entre las puntas captadoras. Usando la distancia máxima, la profundidad de penetración p puede obtenerse de la tabla. Las puntas captadoras deben dimensionarse de acuerdo con la altura de la instalación a proteger (en relación con el lugar de emplazamiento de la punta captadora) y con la profundidad de penetración de la esfera rodante (**Figura 5.1.1.9**).

Si se obtiene, por ejemplo, una altura máxima para las puntas captadoras de 1,15 m (determinación efectuada por cálculo, o bien según la tabla), se aplicará, por lo regular, una medida convencional de 1,5 m para la punta captadora.

Método de la malla

Una instalación captadora en forma de malla puede utilizarse de manera universal y con total independencia de la altura del edificio y de la forma de la cubierta. Sobre ésta se tiende una red captadora en forma de malla con un reticulado que se corresponde con el nivel de protección deseado (**Tabla 5.1.1.3**).

La penetración de la esfera de rayo, en el caso la instalación captadora constituida por mallas, se supone, simplificada, igual a cero.

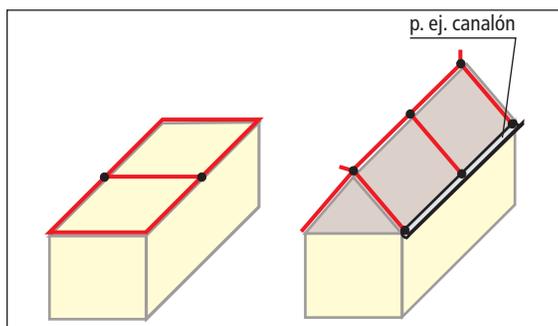


Fig. 5.1.1.10: Mallas captadoras.

Se elige libremente la posición de cada una de las mallas, usando el peto y los bordes exteriores del edificio, así como los componentes metálicos naturales que puedan utilizarse como parte integrante de la instalación captadora.

Los conductores captadores situados en los cantos exteriores de la edificación, tienen que colocarse lo más cerca posible a los bordes del edificio.

Un peto metálico puede utilizarse como dispositivo captador o derivador, si se cumplen las medidas mínimas exigidas para elementos naturales (**Figura 5.1.1.10**).

Método del ángulo de protección

El método del ángulo de protección se deriva del modelo de rayo eléctrico-geométrico. El ángulo de protección viene determinado por el radio de la esfera rodante. El ángulo de protección comparable con el radio de la esfera rodante se deduce cuando una línea inclinada corta a la esfera rodante de tal manera que las superficies resultantes son igual de grandes (**Figura 5.1.1.11**).

Este método debe aplicarse a los edificios con dimensiones simétricas (p. ej. cubierta inclinada) o para estructuras montadas sobre la cubierta (p. ej. antenas, tuberías de ventilación).

El ángulo de protección depende del nivel de protección y de la altura de los dispositivos captadores sobre la superficie de referencia (**Figura 5.1.1.12**).

Nivel de protección	Dimensiones de malla
I	5 x 5 m
II	10 x 10 m
III	15 x 15 m
IV	20 x 20 m

Tabla 5.1.1.3: Dimensiones de malla.

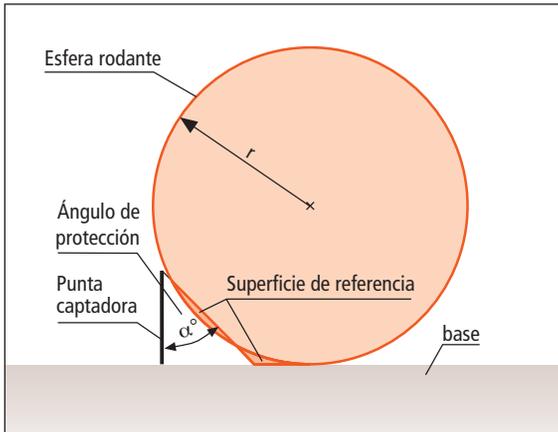


Fig. 5.1.1.11: Ángulo de protección y radio equivalente de la esfera rodante.

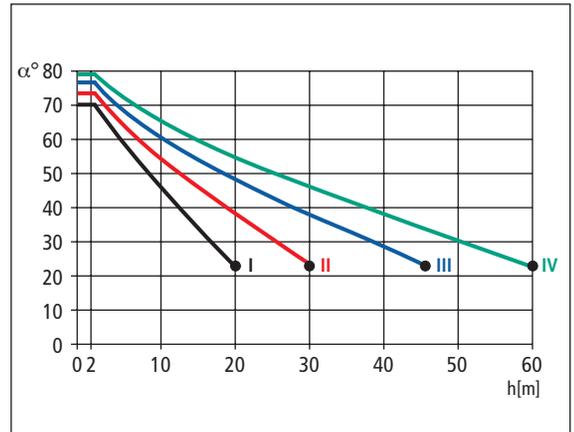


Fig. 5.1.1.12: Ángulo de protección "alfa" en función de la altura h y el nivel de protección.

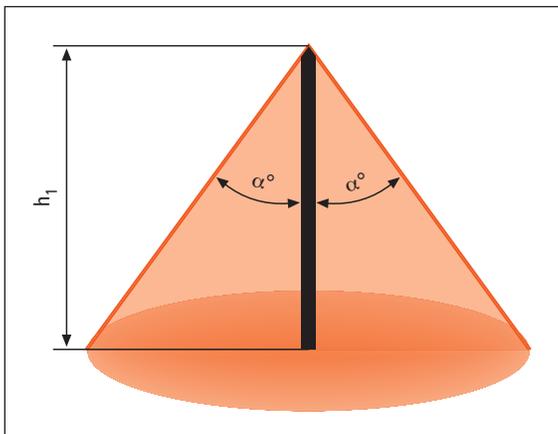


Fig. 5.1.1.13: Zona protegida cónica.

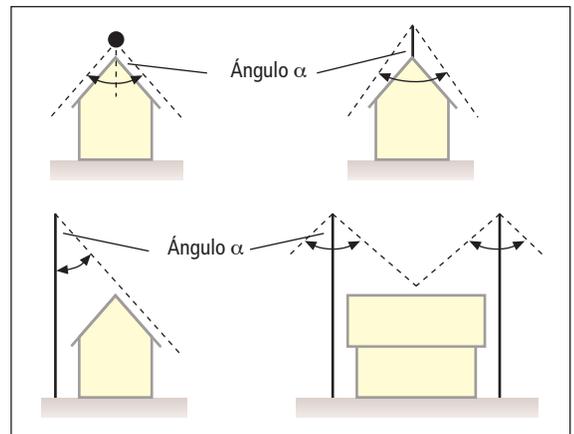


Fig. 5.1.1.14: Ejemplos de sistemas de protección con ángulo de protección α .

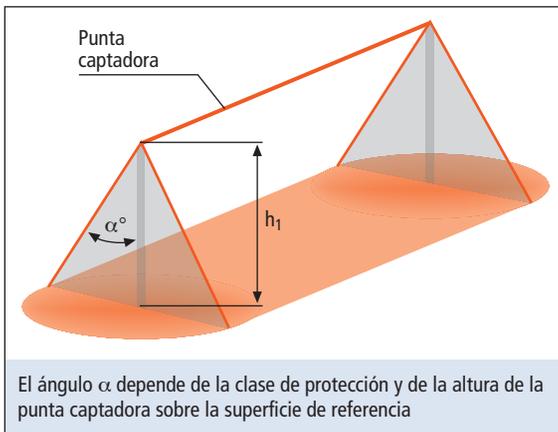


Fig. 5.1.1.15: Espacio protegido mediante un cable tendido.

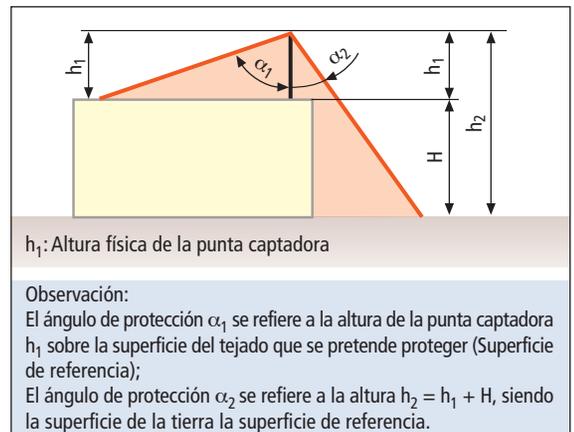


Fig. 5.1.1.16: Sistema de protección contra rayos, volumen protegido por una punta captadora vertical.

Altura de la punta captadora en m	SK I		SKI II		SK III		SK IV	
	Ángulo α	Distancia a en m						
1	71	2,90	74	3,49	77	4,33	79	5,14
2	71	5,81	74	6,97	77	8,66	79	10,29
3	66	6,74	71	8,71	74	10,46	76	12,03
4	62	7,52	68	9,90	72	12,31	74	13,95
5	59	8,32	65	10,72	70	13,74	72	15,39
6	56	8,90	62	11,28	68	14,85	71	17,43
7	53	9,29	60	12,12	66	15,72	69	18,24
8	50	9,53	58	12,80	64	16,40	68	19,80
9	48	10,00	56	13,34	62	16,93	66	20,21
10	45	10,00	54	13,76	61	18,04	65	21,45
11	43	10,26	52	14,08	59	18,31	64	22,55
12	40	10,07	50	14,30	58	19,20	62	22,57
13	38	10,16	49	14,95	57	20,02	61	23,45
14	36	10,17	47	15,01	55	19,99	60	24,25
15	34	10,12	45	15,00	54	20,65	59	24,96
16	32	10,00	44	15,45	53	21,23	58	25,61
17	30	9,81	42	15,31	51	20,99	57	26,18
18	27	9,17	40	15,10	50	21,45	56	26,69
19	25	8,86	39	15,39	49	21,86	55	27,13
20	23	8,49	37	15,07	48	22,21	54	27,53
21			36	15,26	47	22,52	53	27,87
22			35	15,40	46	22,78	52	28,16
23			36	16,71	47	24,66	53	30,52
24			32	15,00	44	23,18	50	28,60
25			30	14,43	43	23,31	49	28,76
26			29	14,41	41	22,60	49	29,91
27			27	13,76	40	22,66	48	29,99
28			26	13,66	39	22,67	47	30,03
29			25	13,52	38	22,66	46	30,03
30			23	12,73	37	22,61	45	30,00
31					36	22,52	44	29,94
32					35	22,41	44	30,90
33					35	23,11	43	30,77
34					34	22,93	42	30,61
35					33	22,73	41	30,43
36					32	22,50	40	30,21
37					31	22,23	40	31,05
38					30	21,94	39	30,77
39					29	21,62	38	30,47
40					28	21,27	37	30,14
41					27	20,89	37	30,90
42					26	20,48	36	30,51
43					25	20,05	35	30,11
44					24	19,59	35	30,81
45					23	19,10	34	30,35
46							33	29,87
47							32	29,37
48							32	29,99
49							31	29,44
50							30	28,87
51							30	29,44
52							29	28,82
53							28	28,18
54							27	27,51
55							27	28,02
56							26	27,31
57							25	26,58
58							25	27,05
59							24	26,27
60							23	25,47

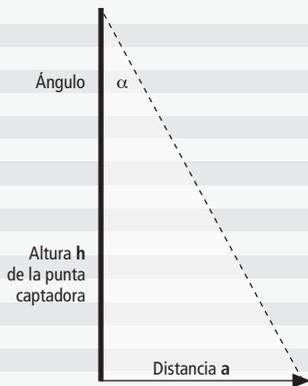


Tabla 5.1.1.4: Ángulo de protección α en función del nivel de protección.

Los conductores captadores, las puntas captadoras, los mástiles y los cables deben estar dispuestos de tal manera que todas las partes o piezas de la edificación que se pretende proteger se encuentren dentro del volumen de protección de la instalación captadora.

La zona protegida puede tener "forma de cono" o



Fig. 5.1.1.17: Protección contra descargas directas de rayo de estructuras pequeñas sobre cubierta mediante puntas captadoras.



Fig. 5.1.1.18: Tejado a dos aguas con soportes para conductor.



Fig. 5.1.1.19: Tejado plano con puntas captadoras y soportes de conductor: Protección de lucernarios.

bien "forma de tienda" al tender un cable (Figuras 5.1.1.13 hasta 5.1.1.15).

Si se instalan puntas captadoras sobre la superficie del tejado para protección de estructuras situadas sobre el mismo, el ángulo de protección "alfa" puede ser distinto. En la figura 5.1.1.16 la superficie de referencia para el ángulo de protección "alfa1" es la superficie del tejado. El ángulo de protección "alfa2" tiene como superficie de referencia el suelo, y de este modo el ángulo "alfa2" según figura 5.1.1.12 y según la tabla 5.1.1.4 es más pequeño que "alfa1".

En la tabla 5.1.1.4 puede consultarse el ángulo de protección para cada el nivel de protección y la distancia correspondiente (margen de protección).

Método del ángulo de protección para sistemas de protección aislados en estructuras sobre cubierta

Las estructuras que con frecuencia se construyen posteriormente sobre cubierta y sobresalen de las zonas de protección, pueden suponer un problema adicional.

Si en estas estructuras hay instalados, además, sistemas eléctricos o electrónicos, como p. ej. equipos de aire acondicionado, antenas, sistemas de medida o cámaras de televisión, es necesaria la adopción de medidas de protección complementarias.

Si este equipamiento se conectara directamente al sistema de protección contra rayos, en caso de una descarga directa, corrientes parciales de rayo penetrarían en el edificio. Esto puede producir la destrucción de equipamiento sensible a las sobretensiones. Mediante la instalación de sistemas de protección aislados se evitan las descargas directas de rayo en estas estructuras que sobresalen de la cubierta.

Las puntas captadoras de la figura 5.1.1.17 son adecuadas para la protección de estructuras de tejado de menores dimensiones (con equipamiento eléctrico).

Estas puntas dibujan una zona de protección en forma "cónica" e impiden una descarga directa de rayo sobre la estructura del tejado.

La distancia de separación s debe tenerse en cuenta al dimensionar la altura de las puntas captadoras (Ver capítulo 5.6).

Instalaciones captadoras aisladas y no aisladas

Al realizar la protección externa contra rayos de un edificio se diferencia entre dos tipos de instalaciones captadoras:

- ⇒ Aisladas.
- ⇒ No aisladas.

Las dos formas de ejecución pueden combinarse entre sí.

La instalación captadora de un sistema de protección contra el rayo no aislado puede llevarse a cabo de diferentes formas:

Si el tejado está realizado de material no combustible, los conductores de la instalación captadora pueden tenderse sobre la superficie de la cubierta (p. ej. tejado a dos aguas o cubierta plana) Por lo general se utilizan materiales de construcción no combustibles. Los componentes de la protección externa contra rayos pueden instalarse directamente sobre la estructura (Figuras 5.1.1.18 y 5.1.1.19).

Si el tejado está realizado con materiales fácilmente combustibles como p. ej. tejados de paja, la distancia entre partes combustibles del tejado y los elementos de la instalación captadora formada por puntas captadoras, conductores captadores y mallas captadoras no puede ser inferior a 0,4 m.

Las partes de la instalación a proteger que sean fácilmente inflamables no deben estar en contacto directo con elementos del sistema de protección externo contra rayos. Tampoco deben situarse bajo una cubierta de tejado que pueda ser perforada en caso de descarga directa de rayo (Ver capítulo 5.1.5 Tejedados de paja).

En caso de instalaciones captadoras aisladas, la totalidad de la estructura está protegida contra descargas directas mediante puntas captadoras, mástiles o mástiles con tendido de cables. Los elementos de protección tienen que instalarse teniendo muy en cuenta la distancia de separación s respecto al edificio. (Figuras 5.1.1.20 y 5.1.1.21).

La distancia de separación s entre los dispositivos de protección y la estructura a proteger debe ser respetada.

Las instalaciones captadoras aisladas de la estructura a proteger se utilizan con frecuencia en caso de que existan materiales combustibles sobre el tejado (p. ej. paja) o también en caso de instalaciones Ex (p.ej. depósitos de combustibles).

Ver también el capítulo 5.1.5: "Instalaciones captadoras para tejados de paja".

Otra posibilidad de diseñar sistemas de protección aislados consiste en fijar los elementos captadores (puntas captadoras, conductores o cables) al objeto

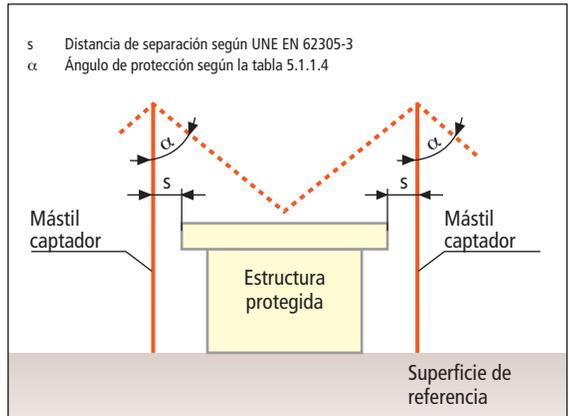


Fig.5.1.1.20: Sistema de protección externa contra rayos aislado con dos mástiles captadores separados de acuerdo con el procedimiento de ángulo de protección: Proyección sobre una superficie vertical.

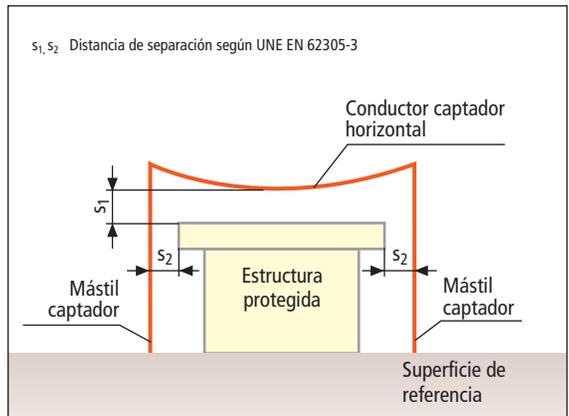


Fig. 5.1.1.21: Sistema de protección externa contra rayos aislado, compuesto por dos mástiles captadores separados, unidos entre sí con un conductor horizontal captador: Proyección sobre una superficie vertical mediante dos mástiles (alzado).

que se pretende proteger con materiales aislados eléctricamente como p. ej. GRP (plástico reforzado con fibra de vidrio).

Esta forma de aislamiento puede utilizarse en espacios limitados o puede aplicarse para todas las partes de la instalación. Con frecuencia se emplea para proteger estructuras situadas sobre cubierta, como instalaciones de ventilación o de refrigeración, que están conectadas eléctricamente con el interior del edificio (Ver también capítulo 5.1.8).

Nivel de protección del SPCR	Material	Espesor ^{a t} mm	Espesor ^{b t'} mm
I hasta IV	Plomo	-	2.0
	Acero (inox., galvanizado)	4	0.5
	Titanio	4	0.5
	Cobre	5	0.5
	Aluminio	7	0.65
	Cinc	-	0.7
^{a t} Impide perforaciones, sobrecalentamiento e inflamación ^{b t'} Sólo para chapas metálicas, cuando no sea importante impedir la perforación, el sobrecalentamiento y la inflamación			

Tabla 5.1.1.5: Espesor mínimo de chapas metálicas.

Componentes naturales de las instalaciones captadoras

Se pueden utilizar partes o piezas metálicas de la construcción, como p. ej. canalones de lluvia, petos, barandillas o revestimientos, como elementos naturales de una instalación captadora de protección contra rayos.

Si un edificio tiene un armazón metálico de acero, una cubierta metálica y una fachada con materiales conductores, estos elementos, bajo determinadas condiciones, pueden utilizarse como parte integrante del sistema de protección externa contra rayos.

Los revestimientos realizados con chapas metálicas en fachada o en cubierta del edificio a proteger, pueden utilizarse si la conexión eléctrica entre los diferentes tramos de revestimiento está realizada de forma segura. Estas conexiones eléctricas pueden llevarse a cabo p. ej. mediante abrazaderas, soldadura, compresión, tornillos o pernos.

Si no hay conexión eléctrica, estos elementos deben conectarse expresamente mediante latiguillos de empalme o cables de puenteo.

Si el grosor de la chapa no es inferior al valor t' en la **tabla 5.1.1.5**, y no es necesario tener en cuenta la posibilidad de fusión de las chapas en el punto de impacto del rayo, o la inflamación de material combustible bajo la cubierta, dichas chapas pueden utilizarse como elementos captadores.

El espesor de los materiales requerido no varía en función de los niveles de protección.

Sin embargo, si fuera necesario adoptar medidas para impedir la fusión o calentamientos indebidos en el punto de descarga, el espesor de las chapas de metal no debe ser inferior al valor t en la **tabla 5.1.1.5**.

Por lo general, estos grosores exigidos para los materiales, no pueden cumplirse, p. ej. en el caso de tejados metálicos.

En el caso de tuberías o depósitos sí existe la posibilidad de cumplir estos grosores mínimos (espesor de las paredes). Sin embargo, si el aumento de temperatura (calentamiento) que se produce en la parte interior de las tuberías o de los depósitos pudiera ser peligroso para los medios contenidos en ellos (riesgo de incendio o de explosión) estos elementos no deben ser utilizados como captadores (Ver también al respecto el capítulo 5.1.4).

Si las exigencias de los correspondientes espesores mínimos no se cumplen, estos elementos, p. ej. tuberías o depósitos, deben quedar incluidos en una zona protegida contra descargas directas de rayo.

Un ligero recubrimiento de pintura, 1 mm de pintura bituminosa, o 0,5 mm de PVC no se considera como aislamiento adecuado en caso de descarga directa de rayo. Dichos revestimientos se perforan como consecuencia de la alta energía que se origina durante una descarga directa de rayo.

En caso de usar componentes naturales para las derivaciones, no deben existir recubrimientos en los puntos de conexión.

Si se encuentran elementos conductores en la superficie del tejado, éstos pueden utilizarse como elementos captadores naturales, siempre que no exista una conexión conductora con el interior del edificio.

En este caso, p. ej. tuberías o conductores eléctricos, podrían penetrar corrientes parciales de rayo en el interior del edificio y dañar, o incluso destruir instalaciones y dispositivos eléctricos/electrónicos sensibles.

Para evitar esta situación, se deben instalar sistemas captadores aislados.

El dimensionado de los sistemas captadores aislados puede efectuarse de acuerdo con el método de la esfera rodante o según el método del ángulo de protección. Una instalación captadora con un reticulado de malla definido conforme con el correspondiente nivel de protección, puede construirse cuando toda la



Fig. 5.1.2.1: Instalación captadora sobre tejado a dos aguas.

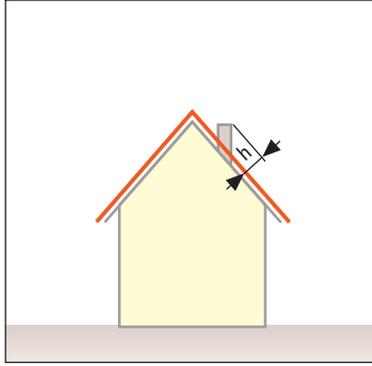


Fig. 5.1.2.2: Altura de una estructura sobre el tejado realizada en material no conductor (p. ej. PVC), $h \leq 0.5$ m.



Fig. 5.1.2.3: Elementos captadores adicionales para tuberías de ventilación.

instalación está aislada (elevada) de la estructura a proteger a la distancia de separación s requerida.

En el capítulo 5.1.8 se describe un sistema universal de componentes para la realización de instalaciones captadoras aisladas.

5.1.2 Instalación captadora para edificios con tejados a dos aguas

Con el concepto de “instalación captadora” se entiende la totalidad de los componentes metálicos, p. ej. conductores captadores, puntas captadoras, soportes, clemas, etc.

Los puntos más expuestos a descargas de rayo, como son esquinas de tejados, chimeneas, caballetes y aristas, cantos de frontispicios, aleros, balaustradas, antenas y cualquier otro elemento constructivo que sobresalga en cubierta, deben protegerse con dispositivos captadores.

Por lo regular, en tejados a dos aguas la instalación captadora en forma de malla se dispone sobre la superficie del tejado, con el nivel de protección correspondiente (p. ej. reticulado de malla de 15 m x 15 m para el nivel de protección III). (Figura 5.1.2.1).

La situación de las mallas se define tomando en consideración el caballete y los bordes exteriores, así como los componentes metálicos que sirven como elementos captadores. Los conductores captadores situados en los bordes exteriores del edificio deben tenderse tan cerca de los bordes como sea posible.

Para cerrar la “malla” de la instalación captadora tendida sobre la superficie del tejado suele utilizarse, por

lo general, el canalón del tejado. Partiendo del supuesto de que el canalón del tejado es conductor, en el punto donde se cruzan el sistema captador con el canalón del tejado se utiliza una borna de unión.

Las estructuras de tejado de material **no conductor**, (p. ej. tuberías de ventilación de PVC) se consideran protegidas si no sobresalen más de 0,5 m del plano de la malla (Figura 5.1.2.2).

Si sobresale más de 0,5 m, dicha estructura debe equiparse con un elemento captador (p. ej. punta captadora) y éste, a su vez, debe conectarse con el conductor captador más próximo. Una forma de hacerlo es usar una varilla de diámetro 8 mm con una longitud libre máxima de 0,5 m, tal y como se refleja en la **figura 5.1.2.3**.

Las estructuras metálicas situadas sobre el tejado, sin conexión conductora con el interior de la estructura a proteger, no necesitan conectarse a la instalación captadora si se dan los tres requisitos siguientes:

- ⇒ Sobresalir, como máximo, 0,3 m del nivel del tejado.
- ⇒ Tener una superficie máxima encerrada de 1 m² (p.ej. ventanas de tejado).
- ⇒ Tener como máximo, de 2 metros de largo (p. ej. cubiertas de chapa).

Solamente en el caso de que se cumplan las tres condiciones citadas podrá prescindirse de la conexión.

Además, con las condiciones arriba enunciadas, hay que respetar la distancia de separación en relación con la instalación captadora y derivadora (Figura 5.1.2.4).



Fig. 5.1.2.4: Edificio con una instalación fotovoltaica.
Fuente: Blitzschutz Wettingfeld, Krefeld.



Fig. 5.1.2.5: Antena con punta captadora.
Fuente: Oberösterreichischer Blitzschutz, Linz.

Para proteger las chimeneas, los elementos captadores deben instalarse de tal manera que toda la chimenea se encuentre dentro de la zona de protección. Para el cálculo de las puntas captadoras se aplicará el método del ángulo de protección.

Si la chimenea está hecha con ladrillos o con material prefabricado, la punta captadora puede instalarse directamente sobre la misma.

Si en el interior de la chimenea hay un tubo metálico (p. ej. en caso de restauración de edificios antiguos), tiene que respetarse la distancia de separación respecto a este elemento conductor. Este es un ejemplo en el que se usan sistemas captadores aislados y las puntas captadoras se sustentarán mediante distanciadores aislantes. El tubo metálico se conectará al sistema equipotencial general. La protección de antenas parabólicas se efectúa de manera similar a la de las chimeneas con tubo metálico interior.

En caso de descarga directa de rayo en antenas, corrientes parciales de rayo pueden penetrar en el interior del edificio que se desea proteger a través del blindaje de los conductores coaxiales y ocasionar daños en los equipos e interferencias en el funcionamiento de los mismos. Para evitarlo, las antenas se protegen con elementos captadores aislados (p. ej. con puntas captadoras) (Figura 5.1.2.5).

Los elementos captadores situados sobre el caballete determinan una zona de protección con vertientes angulares (de acuerdo con el procedimiento de ángulo de protección). El ángulo depende de la altura sobre el nivel de referencia (p. ej. superficie del terreno) y del nivel de protección elegido.

5.1.3 Instalación captadora para edificios con cubierta plana

En edificios con cubierta plana (Figuras 5.1.3.1 y 5.1.3.2) se aplica el método de mallas para el dimensionado de la instalación captadora. Se coloca una instalación captadora sobre la cubierta formando mallas, con un reticulado que se determina en función del nivel de protección elegido (Tabla 5.1.1.3).

La figura 5.1.3.3 reproduce una aplicación práctica de instalación captadora mallada en combinación con puntas captadoras para la protección de elementos situados sobre el tejado, como son por ej. lucernarios, módulos fotovoltaicos o equipos de aire acondicionado.

El capítulo 5.1.8 muestra como deben tratarse estas estructuras situadas sobre cubierta.

Los soportes de conductor para tejados planos se colocan dejando una distancia entre sí de aproximadamente 1 metro. Los conductores captadores se conectan con el peto como elemento natural de la instalación captadora. Al cambiar la temperatura, también lo hace la longitud de los materiales utilizados en los petos, y por tanto los distintos segmentos de los mismos se equipan con piezas de dilatación.

Si se utiliza el peto como elemento captador, estos distintos segmentos tienen que estar unidos entre sí eléctricamente, sin que ello dificulte su capacidad de dilatación. Esto puede realizarse con ayuda de bandas de puenteo, cables o latiguillos de empalme (Figura 5.1.3.4).

Los cambios de longitud debidos a las variaciones de

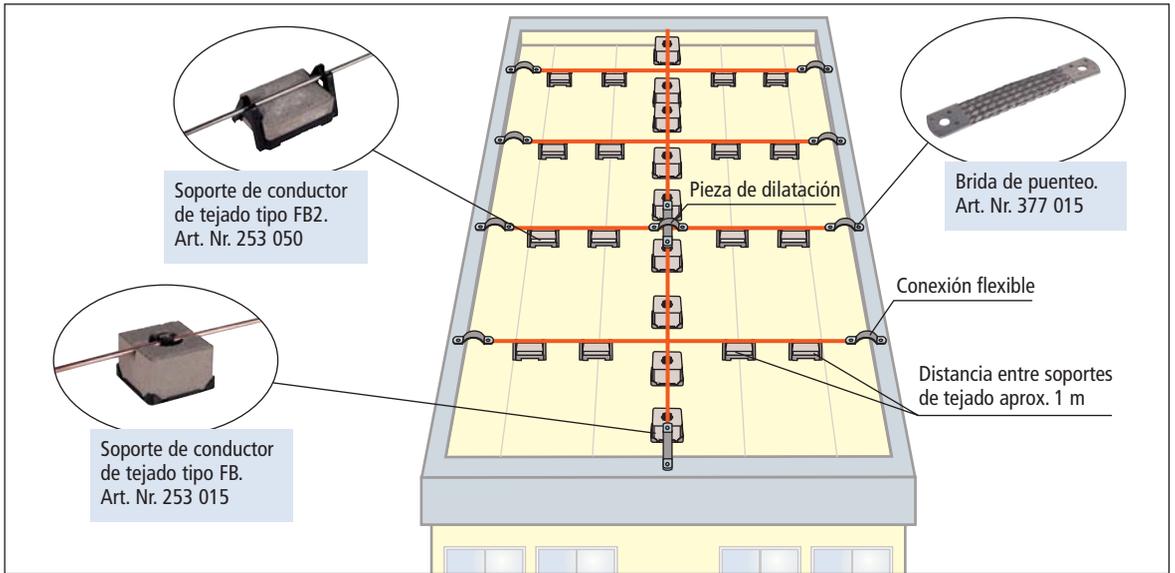


Fig. 5.1.3.1: Instalación captadora.



Fig. 5.1.3.2: Instalación captadora sobre tejado plano.



Fig. 5.1.3.3: Uso de puntas captadoras.



Fig. 5.1.3.4: Brida de puenteo.

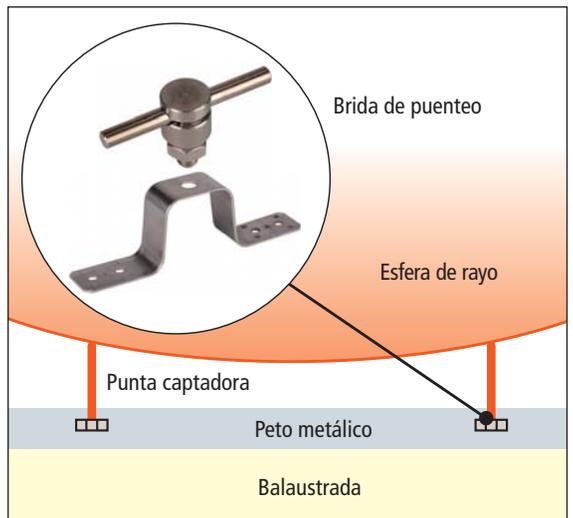


Fig. 5.1.3.5: Ejemplo de protección para un peto metálico cuando pueda producirse la fusión del material (Vista frontal).

temperatura hay que tenerlos en cuenta también en el caso de los conductores captadores y en el caso de las derivaciones (Ver capítulo 5.4).

Una descarga de rayo en el peto puede producir la fusión de los materiales utilizados en el mismo. Si esta circunstancia no puede asumirse, será necesario instalar un elemento captador suplementario, por ejem-

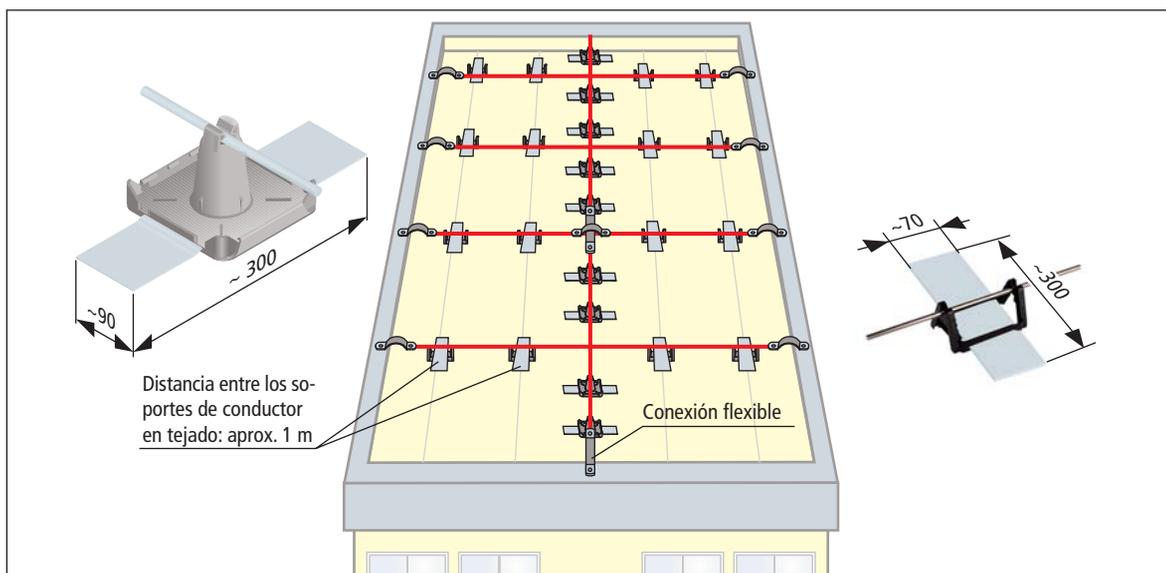


Fig. 5.1.3.6: Bandas para tejado plano sintético. Soporte de conductor de tejado tipo KF/KF2.

plo puntas captadoras, posicionadas de acuerdo con el método de la esfera rodante (Figura 5.1.3.5).

Soportes de conductor para tejados planos soldados homogéneamente

Como consecuencia de la acción del viento, el recubrimiento del tejado, si sólo está fijado mecánicamente o sustentado por su propio peso, puede moverse en sentido horizontal. Para que los soportes de conductores de la instalación captadora no se desplacen sobre la superficie lisa del tejado, es necesario asegurar la fijación de los conductores captadores sobre dicha superficie. Los soportes convencionales para conductores de tejado no pueden pegarse, de forma duradera, sobre el recubrimiento de tejado, ya que por lo general los pegamentos utilizados no son compatibles con el recubrimiento de las cubiertas.

Una forma sencilla y segura de asegurar la fijación, es utilizar soportes de conductores de tejado tipo KF en combinación con tiras (cortar las tiras a medida) del mismo material que el utilizado para el recubrimiento del tejado. La tira se fija al soporte de plástico y se suelda por los dos lados sobre la cubierta. El soporte y la tira deben posicionarse inmediatamente al lado de una junta de la cubierta a una distancia de aproximadamente 1 m. Las tiras se sueldan con el recubrimiento del tejado de acuerdo con las indicaciones proporcionadas por el fabricante del mismo. De este

modo, se evita que los conductores captadores se desplacen por el tejados. En caso de que el tejado tenga una inclinación de 5° , cada soporte debe tener su correspondiente elemento de fijación.

En caso de recubrimiento de tejado sintético fijado mecánicamente, los soportes de los conductores de tejado deben disponerse inmediatamente al lado de la fijación mecánica.

Hay que tener muy en cuenta que los trabajos de soldadura y pegado pueden afectar negativamente a la garantía proporcionada por el instalador de la cubierta.

Por lo tanto, este tipo de trabajos debe llevarlos a cabo el instalador de la cubierta o, en todo caso, de acuerdo con él (Figura 5.1.3.6).

5.1.4 Instalación captadora sobre cubiertas metálicas

Los modernos edificios industriales y comerciales, con mucha frecuencia, tienen tejados y fachadas de metal. Las chapas o las placas metálicas de los tejados suelen tener un espesor de 0,7 – 1,2 mm.

La figura 5.1.4.1 muestra un ejemplo de la forma de construcción de un tejado metálico.

Cuando se produce una descarga directa de rayo sobre la cubierta, puede producirse su perforación



Fig. 5.1.4.1: Tipos de tejados metálicos, p. ej. tejado con junta redondeada.



Fig. 5.1.4.2: Ejemplo de daños: cubierta de chapa.

como consecuencia de la fusión y la vaporización en el punto de la descarga del rayo. El tamaño del agujero depende de la energía del impacto de rayo y de

Apropiado para todos los niveles de protección contra rayos	
Distancia de los conductores horizontales	Altura de la punta captadora*)
3 m	0.15 m
4 m	0.25 m
5 m	0.35 m
6 m	0.45 m
* Valores recomendados	

Tabla 5.1.4.1: Protección contra rayos para tejados metálicos. Altura de las puntas captadoras.

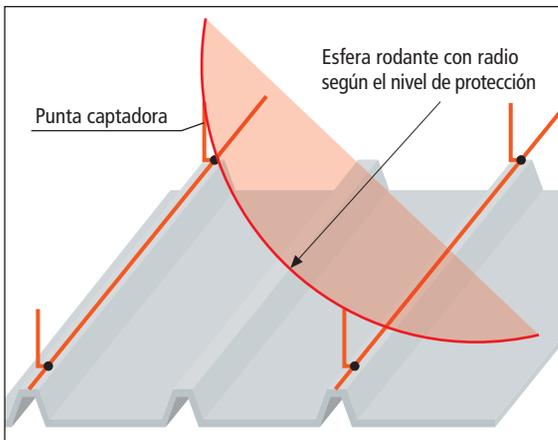


Fig. 5.1.4.3 Instalación captadora en tejado metálico. Protección contra perforaciones.

las propiedades del material (p. ej. espesor del mismo). El mayor problema que se da en estos casos, son los daños derivados, p. ej. goteras. Pueden pasar días e incluso semanas hasta que se adviertan estos daños. El aislamiento del tejado se humedece y el techo pierde su estanqueidad.

Un ejemplo de daños, que fue evaluado por el Servicio de Información sobre Rayos de Siemens (BLIDS – Blitz Informations Dienst von Siemens), muestra esta problemática. (Figura 5.1.4.2) Una corriente de aproximadamente 20.000 A descargó sobre la cubierta de chapa e hizo un agujero (Figura 5.1.4.2: Detalle A). Como la cubierta de chapa no estaba puesta a tierra, en la zona de la cornisa se produjeron saltos de chispas hacia partes metálicas naturales de la pared (Figura 5.1.4.2: Detalle B), lo que a su vez ocasionó que se hiciera otro agujero.

Para evitar estos tipos de daños, incluso en el caso de tejados metálicos finos, hay que instalar un sistema adecuado de protección externa contra el rayo, con cables y bornas capaces de soportar la corriente del mismo.

La norma de protección contra rayos UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3) hace referencia expresa al riesgo de daños en tejados metálicos. Cuando sea necesario instalar una protección externa contra rayos, las chapas de metal tienen que tener los valores mínimos fijados en la tabla 5.1.1.5.

Los espesores t no son relevantes para las cubiertas de tejado. Si las chapas de metal tienen un espesor t' suficiente para soportar la perforación y fusión de la misma como consecuencia del sobrecalentamiento que puedan sufrir al producirse una descarga de rayo, pueden utilizarse como elementos captadores naturales.

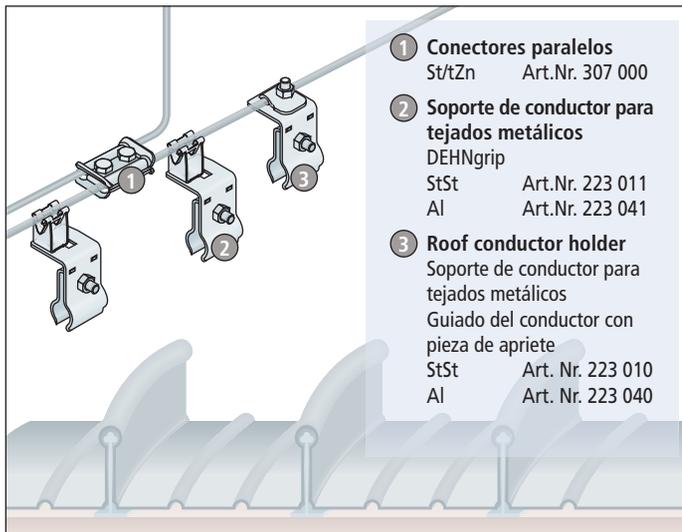


Fig. 5.1.4.4a: Soporte de conductores para tejado metálico - Tejado con junta redonda.

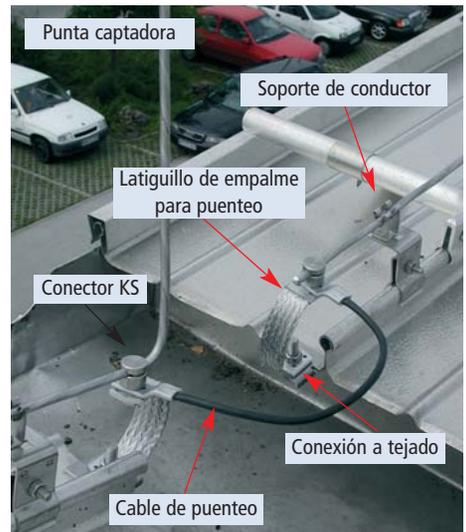


Fig. 5.1.4.4b: Soporte de conductores para tejado metálico - Tejado con junta redonda.

En estos casos, el propietario del edificio debe conocer y dar su conformidad a esta circunstancia puesto que el tejado no ofrece ya total garantía en términos de estanqueidad.

Si el propietario no está dispuesto a asumir el riesgo de sufrir este tipo de daños en el tejado como consecuencia de una descarga de rayo, habrá que instalar el correspondiente sistema de protección. La instalación captadora debe dimensionarse a partir del sistema de la esfera rodante (de radio r según el nivel de protección elegido) (Figura 5.1.4.3).

Para el montaje de la instalación captadora se reco-

mienda realizar una especie de "erizo" con conductores longitudinales y puntas captadoras.

En la práctica, con independencia del nivel de protección, se han usado y probado las alturas de las puntas captadoras según la **tabla 5.1.4.1**.

Es importante señalar que para sujetar y fijar los conductores y puntas captadoras sobre tejados metálicos, éstos no deben taladrarse. Para las distintas variantes de tejados metálicos (junta redonda, con nervio, trapezoidal) se dispone del correspondiente soporte. En la **figura 5.1.4.4a** se reproduce un posible diseño para un tejado metálico con junta redonda.



Fig. 5.1.4.5: Modelo de estructura de un tejado de chapa trapezoidal. Soporte de conductor con pieza de apriete.

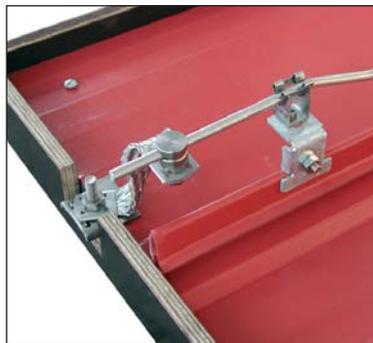


Fig. 5.1.4.6: Modelo de estructura de tejado con junta redonda.



Fig. 5.1.4.7: Punta captadora para un lucernario en un tejado con junta redonda.

Hay que tener muy en cuenta que, al instalar los conductores, el soporte situado en la parte más alta del tejado, tiene que estar realizado con un guiado fijo del conductor, mientras que los restantes soportes de conductores deben estar realizados en ejecución suelta, debido a la compensación de longitud condicionada por la temperatura (Figura 5.1.4.4b).

El soporte con guiado fijo del conductor está reflejado en la figura 5.1.4.5 con el ejemplo de un tejado de chapa trapezoidal.

En la figura 5.1.4.5, además del soporte de conductor, se ha reproducido una punta captadora. El soporte de conductor tiene que sujetarse en el tornillo de fijación por encima de la arandela de estanqueidad para evitar la penetración de agua.

En la figura 5.1.4.6 se reproduce el guiado libre del conductor, con el ejemplo de un tejado con junta en forma de nervio.

También en la figura 5.1.4.6 se ha reproducido la conexión, capaz de soportar corriente de rayo, con la chapa en junta nervada en la zona del borde del tejado.

Los dispositivos no protegidos, que sobresalen del tejado, como p. ej. lucernarios y chimeneas, son puntos expuestos al riesgo de descargas de rayo, que deben protegerse instalando puntas captadoras jun-

to a los mismos. La altura de la punta captadora se calcula en base al ángulo de protección "alfa".

5.1.5 Instalación captadora en edificios con cubiertas de paja

Para realizar el dimensionado de un sistema de protección externo contra rayos con este tipo de cubierta, se suele utilizar un nivel III pues cumple, por lo general, las exigencias para un edificio de este tipo. En algunos casos especiales puede efectuarse un análisis de riesgos en base a la norma UNE EN 62305-2 (IEC 62305-2).

Los conductores de la instalación captadora emplazados sobre este tipo de tejados (de paja, cañizo o juncos) deben tenderse sobre soportes aislantes con libertad de movimiento. Deben respetarse determinadas distancias respecto de los aleros.

En el caso de que se lleve a cabo un sistema de protección contra rayos sobre el tejado hay que aumentar las distancias de seguridad, de manera que en caso de instalación de una nueva cubierta puedan cumplirse en cualquier caso las distancias mínimas exigidas. El valor típico para la distancia entre derivadores es de 15 metros en el nivel de protección III.

La distancia exacta entre derivadores se obtiene en base al cálculo de la distancia de separación "s" según UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3).

En el capítulo 5.6 se expone el método de cálculo de la distancia de separación.

En el caso de conductores situados en caballetes de tejado, deben considerarse vanos de hasta aprox. 15 m. y en el caso de conductores para bajantes o derivadores, vanos de hasta aproximadamente 10 m. sin apoyos adicionales.

Los mástiles de apoyo tienen que estar fijados al tejado (vigas y travesaños) con arandelas y bulones de sujeción (Figuras 5.1.5.1 hasta 5.1.5.3).

Si en la superficie del tejado se encuentran piezas metálicas (p. ej. veletas, antenas, chapas metálicas, escalari-

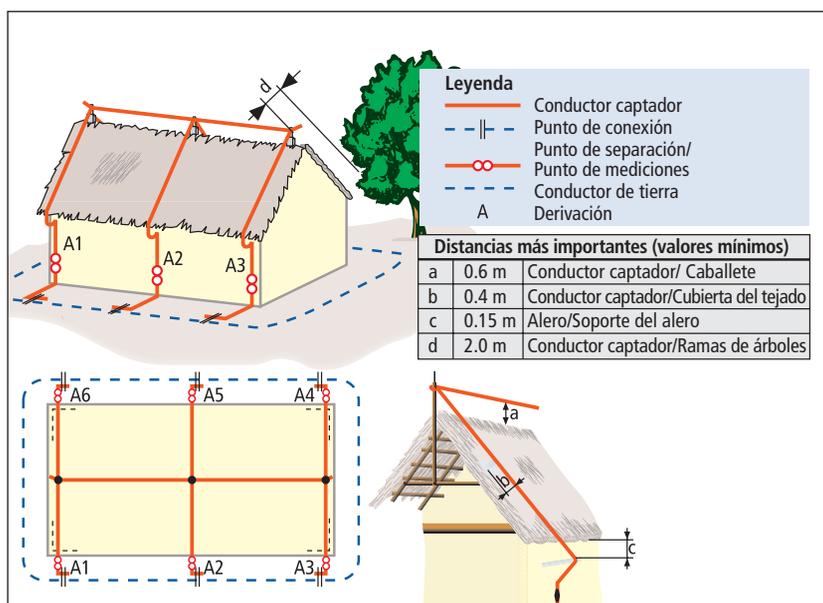


Fig. 5.1.5.1: Instalación captadora para edificios con cubiertas de paja.

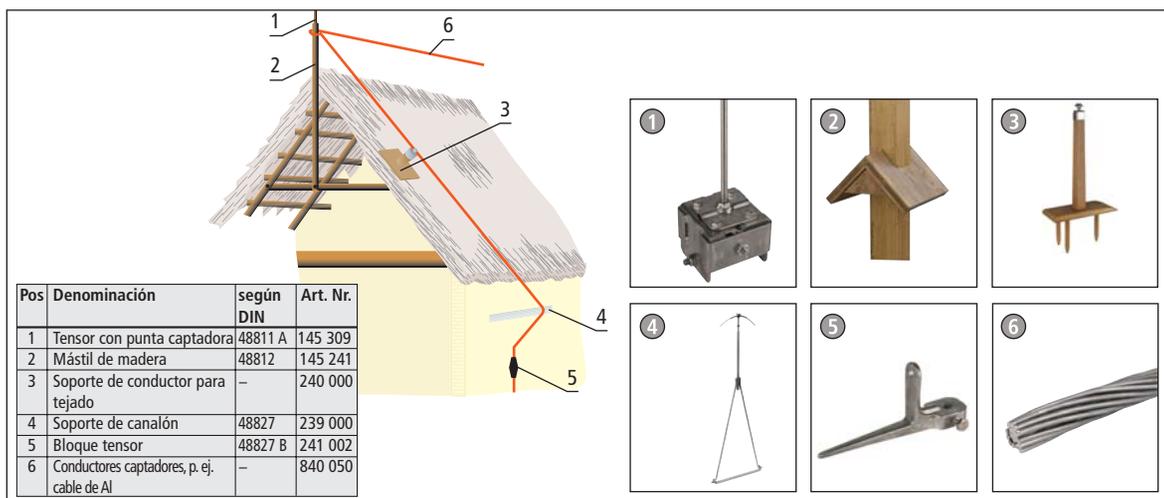


Fig. 5.1.5.2: Componentes para tejados de paja.

llas...), estos elementos deben quedar completamente dentro del volumen de protección que aporte el correspondiente sistema de protección aislado.

En estos casos, sólo se consigue una protección efectiva contra rayos utilizando un sistema de protección aislado con puntas captadoras ubicadas cerca del edificio, o con conductores captadores o mástiles interconectados junto al mismo.

Si un tejado de paja limita con una cubierta de metal, y se pretende instalar en el edificio una protección externa contra rayos, se debe introducir una placa no conductora, por ejemplo de plástico, de 1 metro de ancho como mínimo entre el tejado de paja y el otro tejado.

Las ramas de los árboles próximos deben mantenerse, como mínimo, a una distancia de 2 metros del tejado de paja. Si hay árboles situados muy cerca del edificio, y lo sobrepasan en altura, entonces en el borde de la edificación cercana a los árboles (borde del canalón, frontispicio) hay que instalar un conductor captador que deberá, a su vez, conectarse con la instalación de protección contra rayos del edificio, prestando debida atención a las distancias necesarias requeridas.



Fig. 5.1.5.3: Tejado de brezo.

Otra posibilidad para proteger edificios con tejados de paja contra descargas de rayo, es la de instalar mástiles captadores calculados de tal manera que todo el edificio quede dentro de la zona de protección.

Consultar al respecto el capítulo 5.1.8 sobre instalaciones captadoras aisladas (Mástiles de protección telescópicos).

Una nueva posibilidad, arquitectónica y estéticamente interesante es utilizar conductores aislados como derivadores.

En la **figura 5.1.5.4** puede verse un ejemplo de instalación de bajantes con conductores aislados: Reforma de un tejado en una granja histórica en la Baja Sajonia.

En España, la instalación o no de un sistema de pro-



Fig. 5.1.5.4: Granja histórica con protección externa contra rayos. (Fuente: Hans Tormählen GMBH & Co K.G.).

tección externo contra el rayo viene determinada por la ley. Así, el Código Técnico de la Edificación establece

en que casos se debe instalar dicho sistema de acuerdo con una serie de parámetros definidos en el mismo. Fuera de esas situaciones, es decisión del propietario del edificio o instalación disponer o no de las correspondientes medidas de protección. Obviamente la adopción de estas medidas es más que recomendable en el caso de edificios o estructuras que, por su situación, tipo de construcción o uso son particularmente susceptibles de recibir descargas directas de rayo, o en los que dicha descarga pueda tener graves consecuencias, por pérdidas irreparables, continuidad de servicio o coste de reparación o reposición de los equipos que puedan verse afectados.

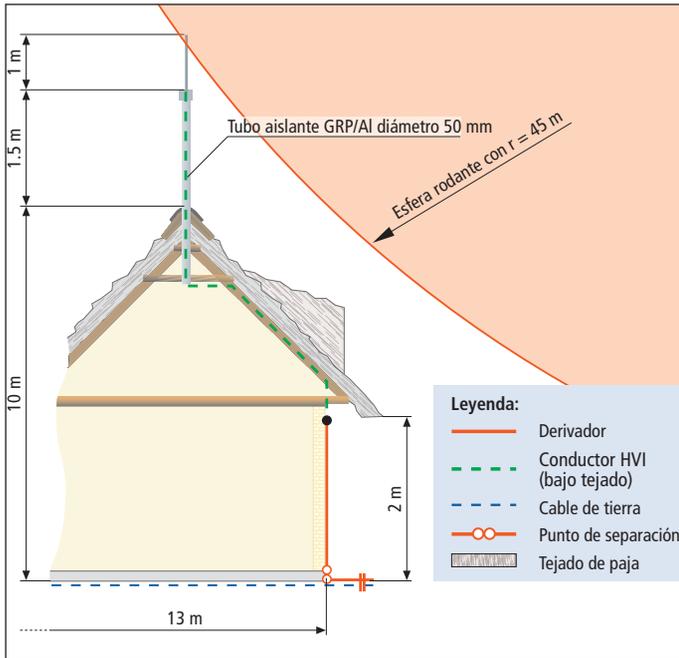


Fig. 5.1.5.5: Sección del edificio principal.

Teniendo en cuenta el incremento de casos de daños causados por descargas de rayo y sobretensiones, las Compañías de Seguros, al firmar o ampliar un contrato de seguro, exigen la adopción de medidas para la protección contra rayos y sobretensiones. La base de cálculo para la evaluación del riesgo es un análisis de riesgos según la norma UNE EN 62305-2 (IEC 62305-2).

Para la granja histórica anteriormente mencionada, el sistema de protección contra rayos a instalar debe tener el nivel de pro-

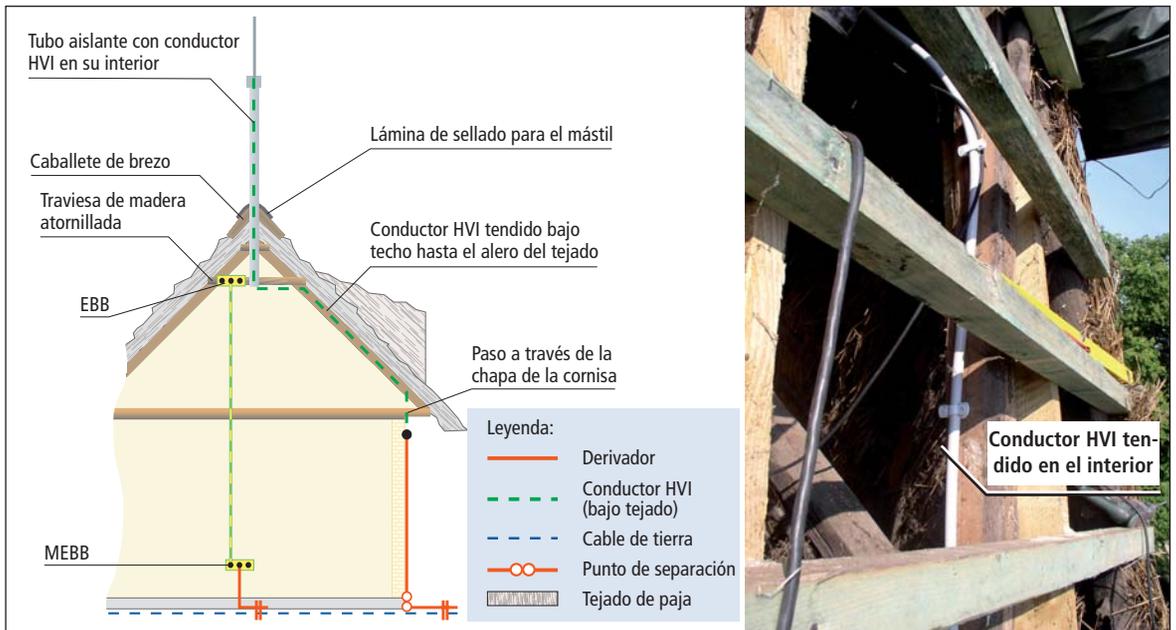


Fig. 5.1.5.6: Representación esquemática del tendido de los derivadores en las vigas del tejado.



Fig. 5.1.5.7: Conductor HVI guiado por la cornisa.

tección III. Esto se corresponde con las exigencias contenidas en las normas para edificios con cubierta de paja UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3).

El objeto tiene un caballete de brezo que, para protegerlo contra daños causados por los pájaros, está cubierto por una malla de plástico.

Para planificar la instalación captadora hay que determinar, en primer lugar, las zonas a proteger, lo que se realiza por el procedimiento de la esfera rodante. De acuerdo con la normativa, en el nivel de protección III, debía aplicarse un radio de 45 metros. Según esto, se calculó una altura de la punta captadora de 2,30 m, con lo que quedaban incluidas en la zona protegida contra descargas de rayo las dos chimeneas situadas en el tejado, así como los tres nuevos salientes situados en un lado del mismo (Figura 5.1.5.5).

Se eligió instalar un tubo aislante (plástico reforzado con fibra de vidrio) para elevar la punta captadora a una altura suficiente y sujetar el sistema de derivadores aislados. Para garantizar la estabilidad mecánica del tubo, su parte inferior está hecha de aluminio. La presencia de elementos metálicos cercanos podía originar chispas indeseadas. Para evitarlo, es necesario asegurarse de que en un área de 1 metro alrededor del dispositivo captador no haya elementos puestos a tierra ni equipos eléctricos.

El aislamiento eléctrico entre la instalación captadora y los derivadores por una parte y las instalaciones metálicas y los equipos de energía eléctrica e informática por otra, dentro de la instalación del edificio o estructura a proteger, puede lograrse asegurando una distancia de separación "s" entre las distintas

partes conductoras. Esta distancia de separación se determina según lo dispuesto en la norma UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3). El conductor HVI aislado está desarrollado de tal manera que aporta una distancia de separación equivalente en el aire de $s = 0,75 \text{ m}$, o $s 1,50 \text{ m}$ en caso de materiales sólidos. La disposición del derivador está representada en la figura 5.1.5.6.

El conductor HVI se instala en el interior del tubo aislante. La instalación del conductor HVI requiere su conexión a una barra equipotencial de toma de tierra. La equipotencialidad se lleva a cabo mediante un conductor flexible H0V-K $1 \times 16 \text{ mm}^2$. El tubo aislante se sujetó a una construcción especial (travesía de madera), y los derivadores, en su posterior recorrido, se fijaron a lo largo de las vigas de sustentación del tejado (Figura 5.1.5.6).

En el alero del tejado los conductores HVI se guiaron a través de la chapa de la cornisa. (Figura 5.1.5.7).

Por razones arquitectónicas, el posterior tendido de los derivadores se efectuó en aluminio. El paso del conductor HVI a los derivadores no aislados en las proximidades de la instalación de toma de tierra se efectuó, como en toda la instalación, teniendo en cuenta las instrucciones de montaje del sistema DEHNconductor. Aquí no fue necesario utilizar una unidad de sellado.

5.1.6 Cubiertas transitables por personas y vehículos

Sobre cubiertas transitables no se pueden tender conductores captadores (p. ej. con soportes de hormigón). Una posible solución es disponerlos en el interior del hormigón o en las juntas de dilatación del pavimento. En este caso, en los puntos de intersección de la malla se instalarán cabezas tipo hongo que hacen el efecto de las puntas captadoras.

Las dimensiones de malla no pueden sobrepasar los valores del nivel de protección correspondiente (Ver capítulo 5.1.1- Tabla 5.1.1.3).

Si se garantiza que en estas superficies no va a haber tránsito de personas durante una tormenta, es suficiente con adoptar las medidas de protección que se acaban de enunciar.

En todo caso, se debe informar a las personas que puedan acceder a la cubierta donde está el aparcamiento, mediante los correspondientes avisos, de que la cubierta debe desalojarse inmediatamente en caso de tormenta y que no se debe acceder a la misma en estas circunstancias. (Figura 5.1.6.1).

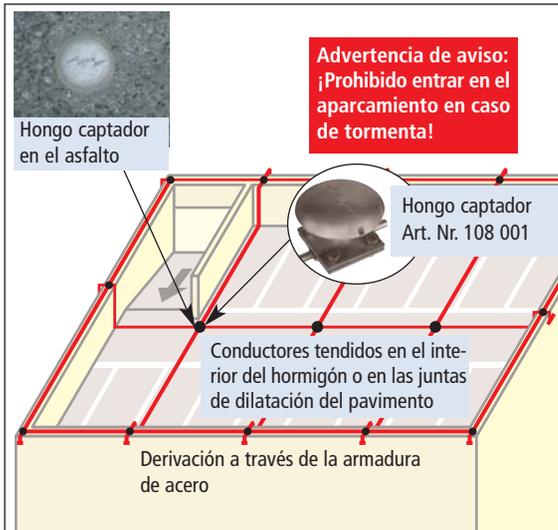


Fig. 5.1.6.1: Protección contra rayos de aparcamientos en cubierta – Protección del edificio.

Si, por el contrario, es previsible que, durante una tormenta puedan encontrarse personas en la superficie del tejado, los dispositivos captadores deben proyectarse a una altura de 2,5 m. (con los brazos extendidos) de tal manera que queden protegidas contra descargas directas de rayo.

La instalación captadora, según el nivel de protección, puede dimensionarse, por el método de la esfera rodante o por el del ángulo de protección (Figura 5.1.6.2).

La instalación captadora puede realizarse mediante puntas captadoras o con cables tensados. Las puntas captadoras se fijarán, por ejemplo, a elementos de la construcción como son parapetos, balaustradas o similares.

Por otra parte, para la protección de personas, también se pueden utilizar otros elementos como, por ejemplo, postes de alumbrado. En estos casos, sin embargo, deben tenerse muy en cuenta las corrientes parciales de rayo que pueden acceder al interior de la construcción a través de los cables de energía. Para estos conductores es imprescindible realizar medidas de conexión equipotencial contra rayos.

5.1.7 Instalación captadora para cubiertas ajardinadas y planas

Tanto desde un punto de vista económico como ecológico, las cubiertas ajardinadas cobran sentido. Las

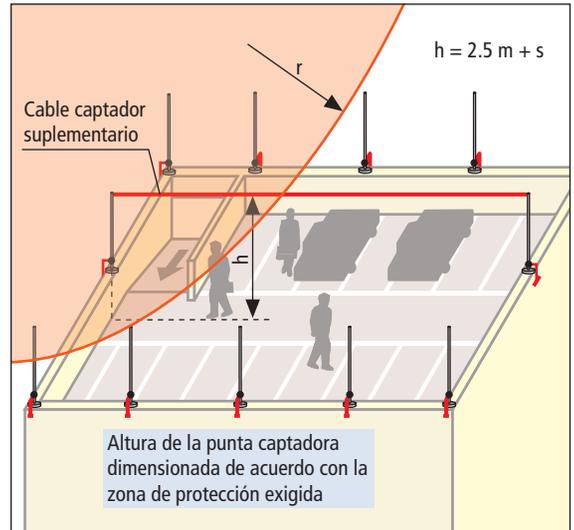


Fig. 5.1.6.2: Protección contra rayos de aparcamientos en cubierta – Protección de las personas y del edificio (UNE EN 62305-3); Anexo E.

razones que lo justificarían son: aislamiento del ruido, protección de la superficie del tejado, eliminación de polvo en el ambiente, aislamiento térmico adicional, filtrado y retención del agua de lluvia y mejora natural del ambiente de la vivienda y del lugar de trabajo. Se diferencia entre las denominadas cubiertas ajardinadas extensivas e intensivas. Las cubiertas extensivas no requieren muchos cuidados, contrariamente a lo que sucede en el caso de las cubiertas ajardinadas intensivas, que requieren trabajos y cuidados, como son riego, poda, y abono. Las cubiertas ajardinadas requieren un sustrato de tierra o un granulado sobre el tejado.

Si no se cuenta con un sistema de protección externa contra rayos, la impermeabilización de la cubierta puede quedar dañada en el punto de descarga de rayo.

La práctica nos demuestra que, independientemente del tipo de cuidados necesarios, se puede y se debe instalar un sistema de protección externa contra rayos en la superficie ajardinada en una cubierta.

La norma de protección contra rayos UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3), en caso de una instalación captadora en forma de malla, prescribe unas dimensiones que dependen directamente del nivel de protección elegido (Ver capítulo 5.1.1, tabla 5.1.1.3). Un conductor captador montado en el interior del recubrimiento de la cubierta, es muy difícil de inspeccionar transcurridos algunos años, ya que pequeñas puntas capta-



Fig. 5.1.7.1: Tejado ajardinado.



Fig. 5.1.7.2: Instalación captadora sobre un tejado ajardinado.



Fig. 5.1.7.3: Guiado de los conductores por encima del recubrimiento.

doras o los hongos captadores son casi imposibles de detectar a consecuencia de la acumulación de sustancias sobre ellos y por que, con frecuencia, sufren daños durante los trabajos de mantenimiento. A esto hay que añadir el peligro de corrosión de los conductores captadores tendidos dentro del recubrimiento. Los conductores de la malla captadora tendidos por encima de la superficie de cubierta, son fáciles de inspeccionar, pese a la acumulación de vegetación sobre ellos, y además, la altura de la instalación captadora puede elevarse mediante puntas captadoras que “crezcan” con la vegetación de cubierta. La instalación captadora puede diseñarse de maneras diferentes. Por lo general, con independencia de la altura del edificio, se suele tender sobre la superficie del tejado una instalación captadora en forma de malla con un reticulado que varía según el nivel de protección que se considere y que va desde los de 5 m x 5 m (Nivel de protección I), hasta un máximo de 15 m x 15 m (Nivel de protección III). Es aconsejable determinar el lugar de instalación de la malla teniendo en cuenta el perímetro de la cubierta y las estructuras metálicas que puedan y deban integrarse en la instalación captadora.

Un material aconsejable para los conductores

captadores situados sobre tejados ajardinados es el acero inoxidable (Nr. de material 1.4571).

En caso de tender los conductores dentro de la capa de recubrimiento (en el sustrato o granulado de tierra) no puede utilizarse conductor de aluminio. (Figuras 5.1.7.1 hasta 5.1.7.3).

5.1.8 Instalaciones captadoras aisladas

En la actualidad es frecuente que en los tejados de grandes edificios de oficinas y en edificios industriales, se ubiquen instalaciones de aire acondicionado y sistemas de refrigeración, p.ej. para servidores infor-

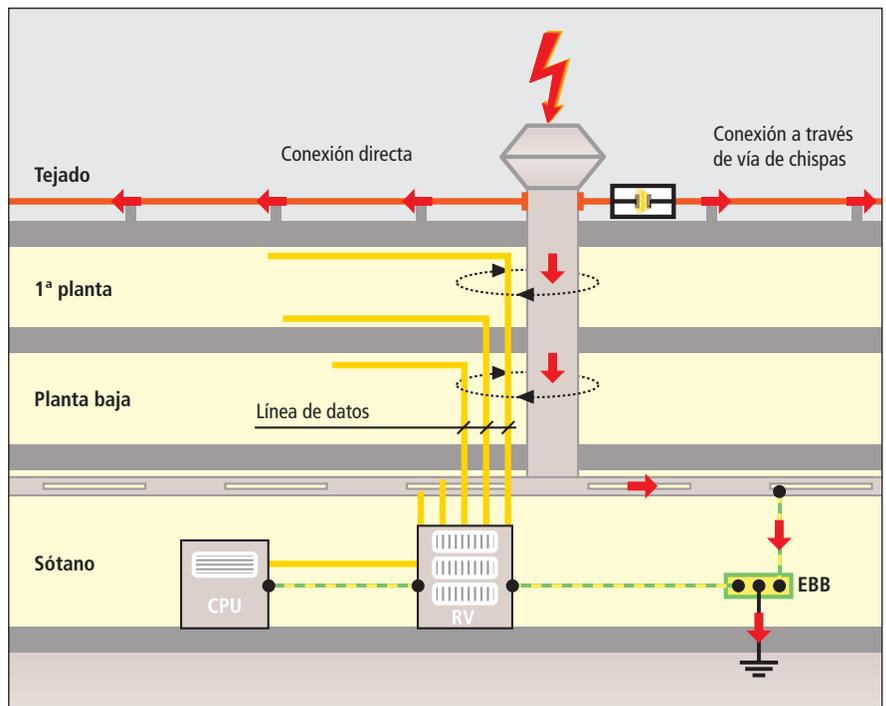


Fig. 5.1.8.1: Conexión de estructuras sobre cubierta.



Fig. 5.1.8.2: Instalación captadora aislada. Protección con punta captadora.

máticos. Antenas, lucernarios accionados eléctricamente, anuncios publicitarios con luz integrada y todas las demás estructuras que sobresalen de la cubierta conectadas por un elemento conductor, p.ej. a través de cables o tuberías, con el interior del edificio, deben ser tratadas de la misma forma.

De acuerdo con el estado actual de la técnica de protección contra rayos, estas estructuras situadas en cubierta se protegen contra descargas directas de rayo mediante una instalación captadora aislada. De esta forma, se evita que puedan penetrar corrientes parciales de rayo en el interior del edificio, donde interferirían o incluso llegarían a destruir equipos eléctricos/electrónicos sensibles.

En el pasado estas estructuras de tejado se conectaban directamente al sistema de protección externa.

Esta conexión directa significa que corrientes parciales de rayo podrían penetrar en el interior del edificio. Posteriormente se puso en práctica la "conexión indirecta" a través de una vía de chispas. De este modo, descargas directas de rayo en las estructuras del tejado podían fluir, también parcialmente a través del "conductor interior" y en caso de una descarga lejana en el edificio, las vías de chispas no deberían alcanzar la tensión de respuesta. Sin embargo, casi siempre se alcanzaba esta tensión de aprox. 4 kV, y así penetraba una corriente parcial de rayo en el interior del edificio, por ejemplo a través de un conductor eléctrico. Con ello podrían resultar dañados, o incluso destruidos totalmente equipos eléctricos y



Fig. 5.1.8.3: Punta captadora con soporte distanciador.

electrónicos situados en el interior del mismo.

La única forma de evitar la entrada de estas corrientes parciales en el interior de los edificios es utilizar instalaciones captadoras aisladas que aseguran que se mantiene la distancia de separación "s" necesaria.

La **figura 5.1.8.1** muestra la penetración de una corriente parcial de rayo en el interior del edificio.

Puntas captadoras

En el caso de pequeñas estructuras de tejado (p. ej. pequeños ventiladores) la protección puede lograrse mediante la instalación de una punta captadora o la combinación de varias. Las puntas captadoras con una altura de hasta 2 metros pueden fijarse con uno o dos zócalos de hormigón superpuestos (p. ej. Art. Nr. 102 010) (**Figura 5.1.8.2**).

Si las puntas captadoras son más altas de 2,5 o 3,0 m, las puntas captadoras deben fijarse al objeto que se pretende proteger con soportes de material aislante eléctrico (p. ej. soporte distanciador DEHNiso) (**Figura 5.1.8.3**).

Si, además, se quieren fijar las puntas captadoras con seguridad frente a los efectos del viento lateral, es aconsejable la utilización de soportes angulados (**Figuras 5.1.8.4 y 5.1.8.5**).

Si se precisan puntas captadoras de mayor altura, p. ej. para estructuras de tejado muy elevadas, pueden utilizarse soportes especiales para su instalación.

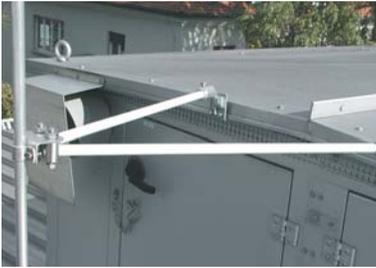


Fig. 5.1.8.4: Soporte angular para punta captadora.



Fig. 5.1.8.5: Soporte de la punta captadora.



Fig. 5.1.8.6: Instalación captadora aislada para una instalación fotovoltaica.

Las puntas captadoras auto soportadas hasta una altura de 8,5 metros pueden instalarse usando un soporte en forma de trípode. Estos soportes se fijan sobre el suelo con zócalos de hormigón convencionales (colocados unos sobre otros). A partir de una altura de 6 metros se requieren cables adicionales de sujeción, para resistir la acción del viento.

Esta clase de puntas captadoras pueden utilizarse para las más diversas aplicaciones (p. ej. antenas o instalaciones fotovoltaicas). Su instalación requiere muy poco tiempo ya que tan sólo es necesario atornillar algunos elementos entre sí. (Figuras 5.1.8.6 a 5.1.8.7).

En el caso de que haya que proteger instalaciones o edificios enteros mediante la disposición de puntas captadoras, (p. ej. instalaciones fotovoltaicas, depósitos de munición...), se utilizan mástiles de protección contra rayos. Estos mástiles se montan en un cimiento de hormigón. Con ellos se puede alcanzar una altura sobre el nivel de la base de hasta 19 metros, e incluso superiores si empleamos ejecuciones especiales. También es posible instalar cables sobre estos mástiles, cuando están adaptados expresamente para

ello. Los mástiles telescópicos de protección contra rayos se suministran en tramos empalmables lo que supone una enorme ventaja para el transporte.

Más información (p. ej. montaje e instalación) sobre estos mástiles telescópicos de acero para protección contra rayos en las Instrucciones de montaje Nr. 1574 (Figuras 5.1.8.8 y 5.1.8.9).

Tendido de cables o conductores

Según UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3) los cables captadores pueden instalarse sobre la estructura que se desea proteger.

Los cables captadores tendidos entre puntas definen un espacio protegido en forma de tienda de campaña a lo largo de los mismos y de forma cónica en sus extremos.

El ángulo de protección "alfa" depende de la clase de protección y de la altura de la instalación captadora respecto del plano de referencia.

Para el dimensionado de los cables o conductores puede aplicarse también el método de la esfera



Fig. 5.1.8.7: Instalación captadora aislada para estructuras sobre el tejado.



Fig. 5.1.8.8: Protección suplementaria contra la corrosión en la zona de transición, mediante cinta anticorrosiva para aplicación bajo tierra.



Fig. 5.1.8.9: Instalación de un mástil telescópico de protección contra el rayo.



Fig. 5.1.8.10: Instalación captadora.
Fuente: Protección contra rayos Wettingfeld, Krefeld.

rodante (Radio de la esfera rodante - de acuerdo con el nivel de protección).

Asimismo, puede utilizarse la malla como elemento captador, siempre que pueda asegurarse la distancia de separación correspondiente "s". En estos casos, los soportes distanciadores aislados se instalan en vertical sobre zócalos de hormigón, por ejemplo, para elevar la malla a una determinada altura. (Figura 5.1.8.10).

DEHNiso-Combi

El programa de productos DEHNiso-Combi ofrece diversas posibilidades para instalar cables o conductores de acuerdo con los tres métodos para el diseño de instalaciones captadoras (esfera rodante, ángulo de protección, malla).

Los tubos aislantes de aluminio con "tramo aislado" (GRP –plástico reforzado con fibra de vidrio) que se fijan al objeto que se desea proteger, proporcionan una forma de guiado para los cables. El posterior guiado hacia la instalación derivadora o hacia un sistema captador suplementario (p. ej. malla), se realiza con soportes distanciadores de plástico reforzado con fibra de vidrio.

Puede obtenerse más información sobre las distintas aplicaciones en los folletos DS 123, DS 111 y en las Instrucciones de montaje Nr. 1475.



Fig. 5.1.8.11: Trípode para tubos auto soportados aislados.



Fig. 5.1.8.12: Instalación captadora aislada con DEHNiso-Combi.

Las ejecuciones descritas pueden combinarse discrecionalmente entre sí, para adaptar la instalación captadora aislada a las condiciones locales (Figuras 5.1.8.11 hasta 5.1.8.14).



Fig. 5.1.8.13: Detalle de un DEHNiso-Combi.



Fig. 5.1.8.14: Instalación captadora aislada con DEHNiso-Combi.

5.1.9 Instalación captadora para campanarios e iglesias

Protección externa contra rayos

Según la Hoja suplementaria 2 de la UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3), apartado 18.1., un sistema de protección contra rayos dimensionado para el nivel de pro-

tección III cumple las exigencias normales para iglesias y campanarios. En algunos casos especiales, como por ejemplo, en edificaciones con un alto valor cultural, hay que efectuar un análisis de riesgos específico.

Naves de iglesias

Según la Hoja suplementaria a la norma UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3), apartado 18.5. la nave de una iglesia tiene que dotarse de una protección especial contra rayos. En caso de estar anexa a la torre de la iglesia, debe unirse por la vía más corta posible con los derivadores instalados en ésta. En el caso de una nave de iglesia en cruz, tiene que instalarse un derivador en cada uno de los extremos del cable captador situado a lo largo del caballete.

Campanarios o torres de iglesias

Las torres con una altura de hasta 20 metros tienen que equiparse con un derivador. Si la torre y la nave de la iglesia están construidas juntas, el derivador debe conectarse, por la vía más corta posible, con la protección externa contra rayos de la nave de la iglesia. (Figura 5.1.9.1). Si un derivador de la torre coincide con un derivador de la nave de la iglesia, podrá utilizarse un solo derivador común para ambas.

Según la Hoja suplementaria 2 a la norma UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3), apartado 18.3, en las torres de



Fig. 5.1.9.1: Tendido de los derivadores en una torre de iglesia.

iglesia de una altura superior a los 20 metros, hay que instalar, como mínimo, dos derivadores. Uno de estos derivadores, por lo menos, debe unirse, por la vía más corta posible, con la protección externa contra rayos de la nave de la iglesia.

Los derivadores de las torres deben instalarse, por principio, por el exterior de las mismas. No está permitido tender el derivador por el interior de la torre. UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3), Hoja suplementaria 2. Además tiene que respetarse la distancia de separación "s" respecto de elementos metálicos e instalaciones eléctricas existentes en la torre (p. ej. equipos de relojes, campanas) o debajo del tejado (p. ej. instalaciones de calefacción y de ventilación) mediante una disposición apropiada de la protección externa contra rayos. La distancia de separación exigida puede suponer un problema, especialmente en el caso del reloj de la torre. En este caso, y para evitar la formación de chispas peligrosas en partes de la protección externa contra rayos, la unión conductora con el interior del edificio puede sustituirse por una pieza aislante (p. ej. tubo de GRP – plástico reforzado con fibra de vidrio).

En las iglesias de nueva construcción que se construyen en hormigón armado, los hierros del mismo pueden utilizarse como derivadores, siempre que se garantice la continuidad eléctrica. Si se utilizan piezas prefabricadas de hormigón armado, pueden utilizarse como derivador si se han dispuesto los puntos de conexión correspondientes que aseguren la continuidad eléctrica requerida.

De acuerdo con la Hoja suplementaria 2 de la norma UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3) la compensación de potencial de protección contra rayos con el equipamiento electrónico (suministro eléctrico, telefonía y megafonía), el control de las campanas en el campanario y en el sistema de control del tiempo, se debe realizar en la entrada del edificio.

5.1.10 Instalación captadora para aerogeneradores

Requerimientos para la protección contra rayos

La norma IEC 61400-24 describe las medidas de protección contra rayos para aerogeneradores. En las directrices de certificación de la German Lloyd, se exige un nivel III para los sistemas de protección contra rayos en aerogeneradores con una altura de góndola de hasta 60 m. y un nivel II para alturas de góndola superiores a 60 m. En el caso de plantas Offshore

se exige el nivel de protección I. De este modo, pueden controlarse descargas de rayo con intensidades de hasta 200.000 A. Estos requerimientos están basados en las experiencias de campo en operación con aerogeneradores y en el análisis de riesgos según UNE EN 62305-2 (IEC 62305-2).

Principio de protección externa contra rayos en aerogeneradores

La protección externa contra rayos consta de instalación captadora, instalación derivadora y sistema de puesta a tierra, y protege contra daños mecánicos y contra incendios. Las descargas de rayo en aerogeneradores tienen lugar, sobre todo, en las palas del rotor. Por eso, en dichos puntos se integran elementos cuya finalidad es actuar como receptores de la descarga del rayo (Figura 5.1.10.1).

Para conseguir que la corriente del rayo fluya a tierra de manera controlada, los receptores integrados en las palas del rotor, se conectan con la góndola mediante un conductor de interconexión (pletina de acero zincado St/tZn de 30 mm x 3,5 mm, o cable de cobre de 50 mm²).

A su vez, cepillos de fibra de carbono o vías de chispas aéreas puentean los rodamientos de bolas en la cabeza de la góndola a fin de evitar que se produzca soldadura en las piezas giratorias de la estructura.

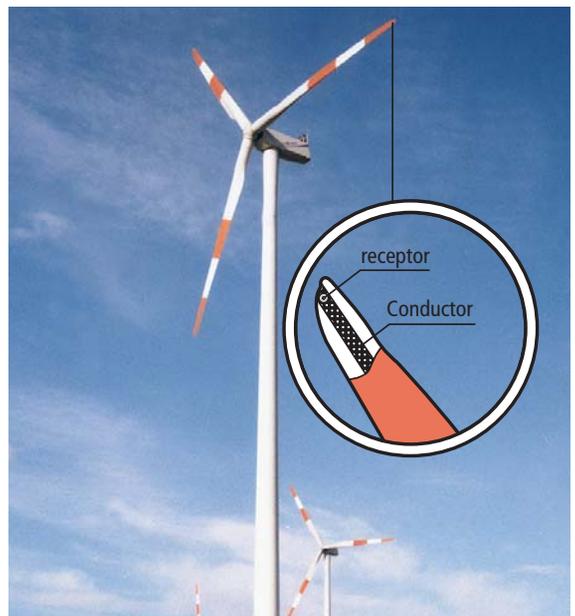


Fig. 5.1.10.1: Aerogeneradores con receptores integrados en las palas.



Fig. 5.1.10.2: Protección contra rayos de anemómetros situados en un aerogenerador.

Para proteger frente a la descarga de rayo los equipamientos instalados en el exterior de las góndolas de los aerogeneradores, como p. ej. anemómetros, se utilizan puntas captadoras o “jaulas captadoras” (Figura 5.1.10.2).

Como instalación derivadora se emplea la propia torre del aerogenerador en el caso de que sea metálica. En el supuesto de torres construidas de hormigón armado, se utilizan conductores embebidos en el mismo (redondo de acero zincado St/tZn diámetro 8...10 mm, o pletina St/tZn de 30 mm x 3,5 mm). El sistema de puesta a tierra del aerogenerador está constituido por una toma de tierra de cimientos en la base de la torre y la conexión en forma de malla con la toma de tierra de cimientos del edificio de operaciones. De este modo se consigue una “superficie equipotencial” que, en caso de descargas de rayo, impide que se originen diferencias de potencial.

5.1.11 Esfuerzos por acción del viento en puntas captadoras

Las cubiertas de los edificios se utilizan cada vez más como lugar de localización de instalaciones. Particularmente, en la cubierta de edificios de oficinas e industrias, se instalan numerosos equipos técnicos para ampliar los equipamientos de los mismos. Para disponer de un sistema correcto de protección contra rayos, es esencial proceder a la protección de las estructuras ubicadas en la cubierta del edificio, como son instalaciones de aire acondicionado, refrigeración, antenas, instalaciones de telefonía móvil, alumbrado, salidas de humo y otros elementos con conexiones al sistema eléctrico de baja tensión (Figura 5.1.11.1).



Fig. 5.1.11.1: Protección contra descargas directas de rayo mediante puntas captadoras autoportadas.

Según las normas de protección vigentes de la serie UNE EN 62305 (IEC 62305) estas estructuras de tejado pueden ser protegidas mediante una instalación captadora aislada. Esto requiere un aislamiento de la instalación captadora y derivadora. Es decir, una distancia de separación suficiente respecto a las estructuras y equipamientos instalados en cubierta que se desea proteger. Esta opción proporciona una zona de protección en la que se descarta la posibilidad de descargas directas de rayo. Igualmente, se evita la entrada de corrientes parciales de rayo en el sistema de baja tensión y, por tanto, en el interior del edificio.

Esto tiene especial relevancia ya que, la entrada de corrientes parciales de rayo puede deteriorar e incluso destruir equipos eléctricos/electrónicos sensibles.

Este tipo de instalaciones captadoras se utilizan también para proteger estructuras de tejado extensas. Los diversos sistemas se conectan entre sí y con el sistema de puesta a tierra. El volumen del espacio de protección obtenido depende, entre otras cosas, del número y de la altura de los elementos captadores instalados. En el caso de estructuras de tejado pequeñas, esta protección se consigue con una sola punta captadora. El procedimiento para determinar el número y altura de las puntas que deban utilizarse en cada caso, implica el uso del método de la esfera rodante según UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3) (Figura 5.1.11.2).

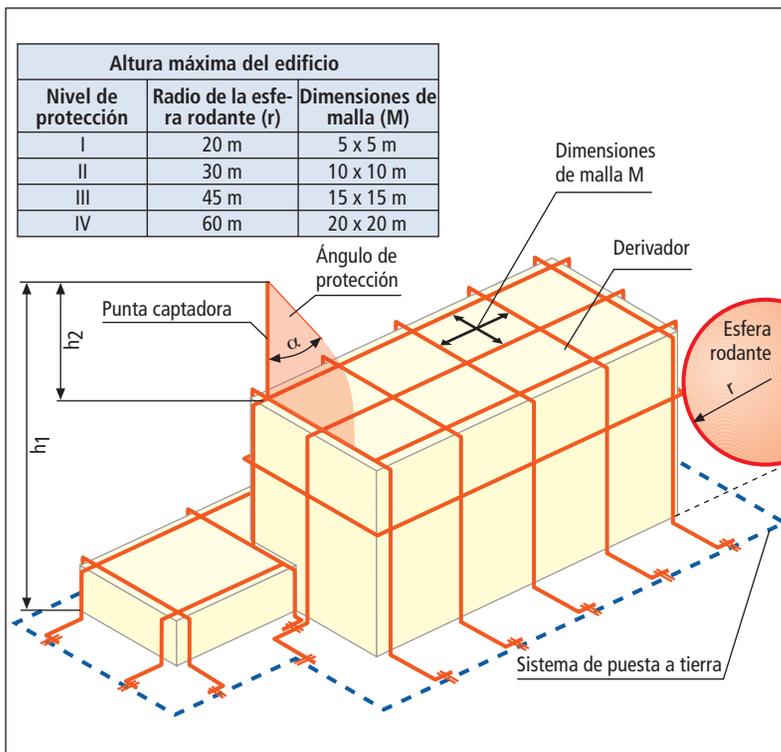


Fig. 5.1.11.2: Procedimiento para el dimensionado de instalaciones captadoras según UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3).

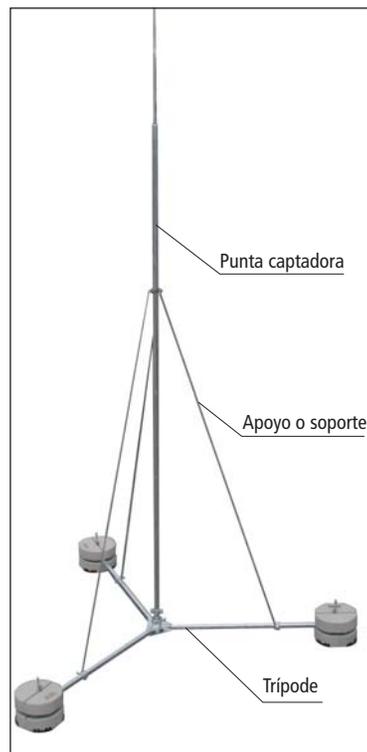


Fig. 5.1.11.3: Punta captadora auto-soportada con trípode.

El radio de la esfera dependerá del nivel de protección elegido. Dicha esfera se hace rodar en todas las direcciones posibles sobre la instalación a proteger, de modo que sólo toque en el suelo (superficie de referencia) y/o en la instalación captadora.

Con este procedimiento se consigue definir un volumen protegido en el que es imposible que se produzcan descargas directas de rayo.

Para obtener un volumen protegido lo más grande posible, o bien para poder proteger estructuras de tejado de mayor tamaño contra descargas directas de rayo, se utilizan puntas captadoras adicionales de altura suficiente. Las puntas captadoras auto-soportadas se aseguran contra roturas y contra vuelcos mediante una adecuada ejecución del soporte que le sirve de base y utilizando los elementos suplementarios de apoyo correspondientes. (Figura 5.1.11.3)

La altura de las puntas captadoras auto-soportadas tiende a ser la mayor posible pero se debe tener muy en cuenta que a mayor altura, mayor es la influencia de la acción del viento sobre las mismas y se incrementa el riesgo de cimbreos y caídas. Al mismo tiempo,

desde el punto de vista de la instalación, los usuarios demandan una construcción ligera del sistema de puntas captadoras auto-soportadas, para facilitar el transporte y el montaje. Para garantizar que es seguro utilizar puntas captadoras sobre tejados se debe probar la estabilidad mecánica de las mismas.

Esfuerzos provocados por acción del viento

Normalmente, las puntas captadoras auto-soportadas se instalan en lugares expuestos (p. ej. sobre tejados), donde se originan esfuerzos mecánicos debidos a la acción del viento que son comparables a aquellos a los que se ven sometidos los soportes y fijaciones de las antenas.

Por eso, para las puntas captadoras auto-soportadas, se requieren las mismas exigencias, en lo que se refiere a la resistencia mecánica, que las que se plantean a los soportes de antena según norma DIN 4131.

En Alemania, por ejemplo, la norma DIN 4131 divide el país en 4 zonas en función de la velocidad del viento asociada a cada una de ellas. (Figura 5.1.11.4).

En los cálculos de los esfuerzos reales a soportar debido a la acción del viento, hay que tener en cuenta también la altura del edificio y las circunstancias locales de emplazamiento (edificio aislado situado en terreno abierto, o situado entre otras edificaciones). En la **figura 5.1.11.4** puede verse como, casi el 95% de toda la superficie de Alemania, puede incluirse en las zonas de viento I y II. Por este motivo, el dimensionado de las puntas captadoras se realiza, en general, para la zona de viento II. La aplicación de puntas captadoras auto-soportadas en las zonas de viento III y IV debe calcularse en cada caso en función de las cargas de viento esperadas.

Según esta normativa, en edificios de hasta 50 metros de altura, se puede contar con una presión dinámica constante sobre la altura del edificio. A efectos de los cálculos, se asume un altura máxima del edificio en 40 m, por lo que la altura total (altura

del edificio más longitud de las puntas captadoras) se mantiene por debajo del límite de los 50 metros.

En la definición de las puntas captadoras auto-soportadas deben cumplirse los requisitos siguientes en lo que a la acción del viento se refiere:

- ⇒ Resistencia frente a vuelco de las puntas captadoras.
- ⇒ Resistencia a la rotura de las puntas.
- ⇒ Garantizar la distancia de separación necesaria hacia el objeto a proteger, incluso bajo la acción del viento (evitar que la punta captadora se doble de forma indebida).

Determinación de la resistencia frente al vuelco

La presión dinámica originada (dependiente de la velocidad del aire), del coeficiente de resistencia c_w y de la superficie expuesta a la acción del viento de la punta captadora, generan una carga q' en la superficie, que determina un momento de vuelco M_T para la punta captadora. Para garantizar la estabilidad de la punta captadora auto-soportada, al momento de vuelco M_T se debe oponer un momento de resistencia M_O , que será generado por el pie de soporte.

La magnitud del momento soporte M_O depende del peso vertical y del radio del propio soporte de pie. Si el momento de vuelco es mayor que el contra-momento, la punta captadora se caerá debido a la acción del viento.

La prueba de estabilidad de puntas captadoras auto-soportadas se efectúa mediante cálculos estáticos. En los cálculos aparecen, además de las características mecánicas de los materiales utilizados, los valores siguientes:

⇒ **Superficie expuesta a la acción el viento de la punta captadora:**
Está definida por la longitud y el diámetro de cada una de las piezas de la punta captadora.

⇒ **Superficie de los tirantes expuesta a la acción del viento:**

Las puntas captadoras auto-soportadas de gran altura se sujetan por medio de 3 tirantes que se montan equidistantes respecto a la punta. La

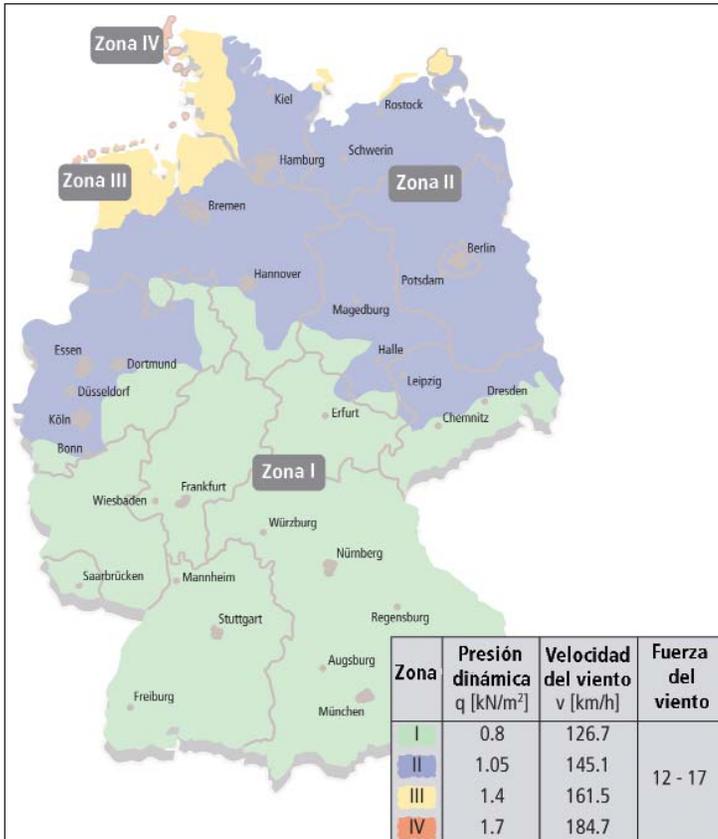


Fig. 5.1.11.4: División de Alemania en zonas de viento y valores correspondientes de la presión dinámica y de las velocidades máximas del viento. Fuente: DIN 4131: 1991-11 Soportes de acero para antenas Berlin, Editorial Beuth-Verlag GMBH.(Mapa).

superficie expuesta a la acción del viento de estos tirantes se corresponde con la superficie de los mismos proyectada sobre un plano situado verticalmente a la acción del viento. Así, las longitudes de los tirantes se acortarían correspondientemente si los cálculos así lo determinan.

- ⇒ **Peso de la punta captadora y de los tirantes:**
El peso propio de la punta captadora y de los tirantes de sujeción debe tomarse en consideración al efectuar el cálculo del contra-momento.
- ⇒ **Peso del soporte de base:**
El soporte de base es una construcción en forma de trípode cuyo peso se incrementa, en caso necesario, utilizando zócalos de hormigón. Por tanto, el peso de este trípode se compone de la suma del peso del propio trípode más el peso de cada uno de los zócalos de hormigón que en su caso se coloquen.
- ⇒ **Palanca de oscilación:**
La palanca de oscilación es la distancia más corta existente entre el punto medio del trípode y la línea o punto en el que todo el sistema de soporte se volcaría.

La prueba de estabilidad se obtiene por la comparación de los siguientes momentos:

- ⇒ Momento de vuelco, constituido por la fuerza ejercida por el viento sobre la punta captadora o los tirantes de sujeción y el brazo de palanca de la punta captadora.
- ⇒ Momento de torsión del soporte formado por el peso del trípode de sujeción, el peso de la punta captadora y los tirantes de soporte, así como por la longitud de la palanca de oscilación a través del trípode de apoyo.

La **estabilidad** se alcanza cuando la relación entre el momento soporte y el momento de vuelco alcanza un valor >1 .

Básicamente: cuanto mayor sea la relación entre el momento soporte y el momento de vuelco mayor será la estabilidad.

La estabilidad requerida puede lograrse de las formas siguientes:

- ⇒ Reducir al máximo la superficie de la punta captadora expuesta a la acción del viento utilizando secciones lo más pequeñas posibles. Ciertamente, la carga sobre la punta captadora se reduce pero, al mismo tiempo, disminuye la rigidez mecánica de la punta captadora y ello incrementa el riesgo

de rotura de la misma. Por eso, es muy importante encontrar un equilibrio entre el uso de la sección más pequeña posible para reducir la carga del viento y conseguir la necesaria rigidez de la punta captadora.

- ⇒ Aumentar peso de la base del soporte y/o el radio de la misma. Esto, con frecuencia, entra en conflicto con la superficie de emplazamiento disponible así como con la demanda de elementos de peso reducido y fácil transporte.

Realización:

Para alcanzar una superficie de exposición al viento lo más reducida posible, se optimizan las secciones de las puntas captadoras de acuerdo con los resultados de los cálculos. Para facilitar el transporte y el montaje, la punta captadora se compone de un tubo de aluminio (que se puede dividir si así se desea) y de una punta captadora del mismo material. El pie de soporte para la punta captadora es abatible y se oferta en dos versiones. Se pueden compensar inclinaciones de tejado de hasta 10° .

Determinación de la resistencia a roturas

Además de la estabilidad hay que testar la resistencia de las puntas captadoras frente a roturas originadas por la acción del viento. La tensión de flexión o doblado no puede sobrepasar la tensión máxima tolerable. La tensión de flexión es mayor en el caso de puntas captadoras más largas. Las puntas captadoras deben diseñarse para que, las cargas del viento que pueden presentarse en la zona de viento II, no den lugar a deformaciones permanentes en las puntas captadoras.

Como quiera que debe tenerse en cuenta, tanto la geometría exacta de la punta captadora como el comportamiento no lineal de los materiales utilizados, la prueba contra roturas de puntas captadoras auto-soportadas se efectúa mediante un modelo de cálculo FEM. El FEM (Finite Element Method – El método de los elementos finitos) es un procedimiento numérico para calcular las tensiones y deformaciones de estructuras geométricas complejas. La estructura que se pretende analizar se divide en los denominados “elementos finitos” usando superficies imaginarias y líneas unidas entre sí mediante nudos.

Para efectuar los cálculos se necesitan los datos siguientes:

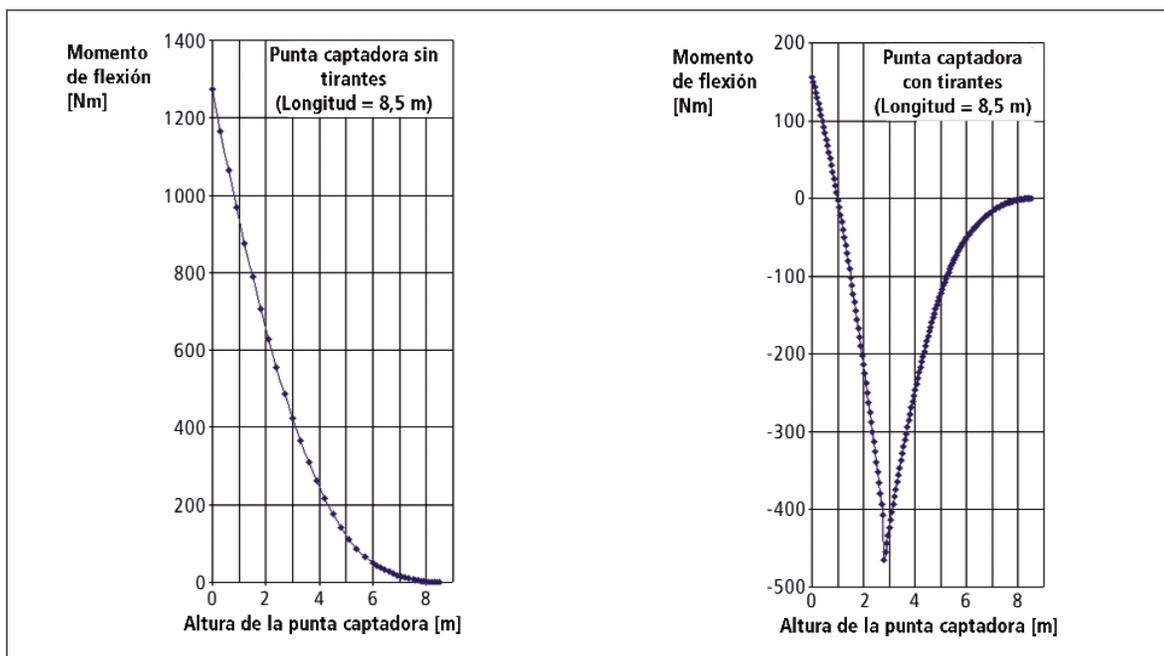


Fig. 5.1.11.5: Comparación entre el desarrollo de los momentos de flexión en puntas captadoras auto-soportadas con y sin tirantes (Longitud = 8,5 m).

⇒ **Modelo de cálculo FEM**

El modelo de cálculo FEM se corresponde, en forma simplificada, con la geometría de la punta captadora auto-soportada.

⇒ **Características de los materiales**

El comportamiento del material viene dado por los datos relativos a los valores de sección, elasticidad, densidad y contracción lateral.

⇒ **Cargas**

La carga del viento se aplica como carga de presión sobre el modelo geométrico.

La resistencia a la rotura se determina comparando la carga de flexión admisible (valor característico del material) y la carga máxima de flexión que se pueda presentar (calculada en base al momento de flexión y a la sección efectiva en el punto de mayor esfuerzo).

La resistencia contra rotura se consigue si la relación entre la carga de flexión admisible y la que puede presentarse, alcanza un valor >1. Básicamente: cuanto mayor sea la relación entre la carga de flexión admisible y la existente, mayor será la seguridad frente a rotura.

Con el modelo FEM se calculan los momentos de flexión que se originan en función de la altura de las

puntas captadoras (longitud = 8,5 m) con y sin tirantes (Figura 5.1.11.5). Aquí se pone de manifiesto claramente la influencia de un posible tirante. En el momento máximo de flexión en la punta captadora sin tirante, tenemos un valor de aprox. 1270 Nm. Dicho valor se reduce, por acción del tirante, hasta aproximadamente 460 Nm. Mediante este tirante es posible reducir las tensiones en la punta captadora de tal manera que, con las cargas de viento máximas que se puede esperar, no se sobrepase la resistencia de los materiales utilizados y, en consecuencia, la punta captadora no se vea dañada.

Realización

Los tirantes de sujeción generan un punto de soporte adicional con el que se reducen considerablemente las tensiones de flexión en la punta captadora.

Sin un tirante de apoyo suplementario, las puntas captadoras no podrían soportar los esfuerzos de la zona de viento II. Por esta razón, las puntas captadoras se equipan con tirantes de sujeción a partir de una altura de 6 metros.

Además del momento de flexión, los cálculos FEM indican también las tensiones que se van a originar en los tirantes de apoyo, cuya resistencia debe testarse.

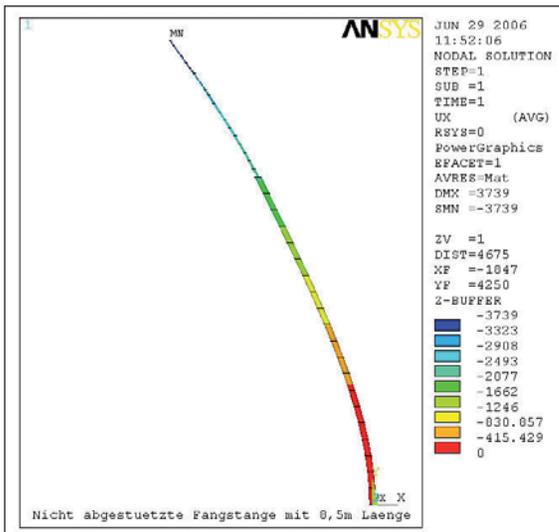


Fig. 5.1.11.6: Modelo FEM de una punta autosoportada sin tirantes.

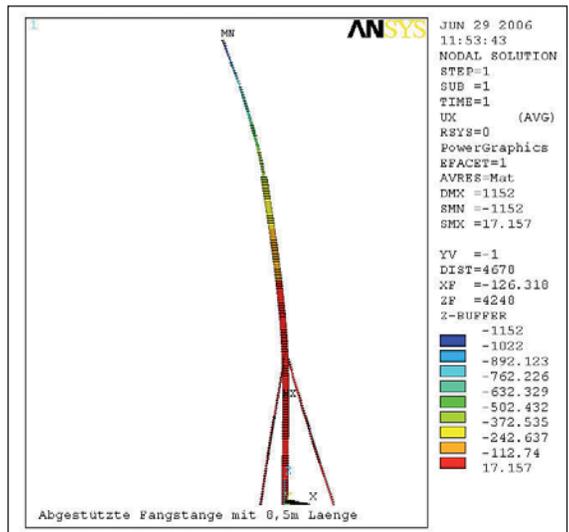


Fig. 5.1.11.7 Modelo FEM de una punta autosoportada con tirantes.

Determinación de la flexión de la punta captadora debido a la carga de viento.

Otro resultado importante de los cálculos del modelo FEM hace referencia a la flexibilidad de la punta captadora. Las cargas del viento hacen que las puntas captadoras se doblen. La flexión permanente de la punta provoca una variación del volumen protegido por la misma. Por tanto, es posible que objetos que deberían estar protegidos, queden fuera de la zona de protección.

La aplicación del modelo de cálculo a una punta captadora, con y sin tirantes, muestra los resultados obtenidos en las figuras 5.1.11.6 y 5.1.11.7.

Los cálculos para el ejemplo elegido dan como resultado una flexión de la punta de la barra captadora de aprox. 1150 mm. Sin tirantes, la flexión sería de 3740 mm, un valor teórico que sobrepasaría el límite de rotura de la punta captadora considerada.

Resultados

La resistencia contra vuelcos, roturas y flexión son los factores decisivos en el dimensionado de las puntas captadoras. La base de soporte y la punta captadora deben ajustarse entre sí de tal manera que las cargas que se originan como consecuencia de la velocidad del viento correspondiente a la zona II, no den lugar al vuelco y/o a daños en la punta captadora.

También hay que tener en cuenta que las flexiones

que pueda sufrir una punta captadora pueden influir negativamente en la necesarias distancias de seguridad que un sistema de protección externa contra rayos siempre debe asegurar. En el caso de puntas captadoras de mayor altura es necesario un apoyo suplementario para evitar desviaciones inadmisibles de las mismas.

5.2 Instalación derivadora

La instalación derivadora es la unión eléctrica conductora entre la instalación captadora y el sistema de puesta a tierra. La instalación derivadora debe conducir la corriente de rayo al sistema de puesta a tierra sin que se produzca un calentamiento indebido que, por ejemplo, dañe la estructura.

Para evitar que en el proceso de derivación a tierra de la corriente de rayo se produzcan daños en la instalación, los derivadores deben instalarse de tal modo que, desde el punto de descarga del rayo hasta tierra:

- ⇒ existan varias bajantes paralelas para conducir la corriente,
- ⇒ la longitud de estas bajantes se reduzca al mínimo posible (recto, vertical, sin bucles),
- ⇒ las uniones con partes conductoras de la estructura se efectúen en todos los lugares necesarios (Distancia < s ; s = distancia de separación).

5.2.1 Determinación del número de derivadores

El número de derivadores depende del perímetro de los bordes exteriores del tejado (perímetro de la proyección sobre la superficie del suelo).

Los derivadores deben instalarse de tal manera que, partiendo de las esquinas de la edificación, estén distribuidos de la forma más regular posible.

Dependiendo de las condiciones de la edificación (p. ej. puertas, elementos prefabricados de hormigón,...) las distancias entre derivadores pueden ser diferentes. En cualquier caso, hay que respetar el número total de los derivadores a instalar de acuerdo con el nivel de protección.

En la norma UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3) se indican las distancias típicas entre derivadores y anillos perimetrales dependiendo del nivel de protección (Tabla 5.2.1.1).

El número exacto de derivadores solamente puede determinarse mediante el cálculo de la distancia de separación "s". Si no se puede cumplir la distancia de separación calculada para el número de derivadores previsto en una estructura, una posibilidad para cumplir el requerimiento es elevar el número de derivadores a instalar. Las trayectorias de corriente paralelas mejoran el coeficiente de distribución de corriente kc. Con esta medida se disminuye la corriente que circula por cada uno de los derivadores y se puede, por tanto, mantener la distancia de separación exigida.

Los elementos naturales de la estructura (p. ej. columnas de hormigón armado, estructuras metálicas de acero,...) pueden utilizarse asimismo como derivadores si se garantiza la continuidad eléctrica de los mismos.

Al conectar los derivadores con el sistema de puesta a tierra y usar anillos perimetrales en edificios de mayor altura se consigue una simetría en la distribu-

Nivel de protección	Distancia típica
I	10 m
II	10 m
III	15 m
IV	20 m

Tabla 5.2.1.1: Distancias entre derivadores según UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3).

ción de la corriente de rayo, lo que reduce la distancia de separación "s".

En la serie actual de normas UNE EN 62305 (IEC 62305) se concede gran relevancia a la distancia de separación. Con las medidas citadas anteriormente se facilita obtener dichas distancias y con ello garantizar una derivación segura de la corriente de rayo.

Si a pesar de las mismas, no se consigue alcanzar la distancia de separación requerida, pueden utilizarse los nuevos conductores aislados resistentes a alta tensión (HVI). Estos conductores se describen en el capítulo 5.2.4.

En el capítulo 5.6 se expone cómo se determina la distancia de separación de forma exacta.

5.2.2 Instalación derivadora para un sistema de protección contra rayos no aislado

Como norma general, los derivadores se instalan directamente sobre el edificio (sin distancia). El criterio para permitir o no su instalación directa sobre la estructura es que el aumento de temperatura que se produce en caso de un impacto de rayo en el sistema de protección pueda afectar al edificio en el que se instala. Así, si la pared del edificio está fabricada en material no inflamable o en material con un nivel normal de inflamabilidad, los derivadores pueden montarse directamente sobre o en la pared.

q mm ²	Ø	Clase de protección											
		Aluminio			Hierro			Cobre			Acero inoxidable		
		III + IV	II	I	III + IV	II	I	III + IV	II	I	III + IV	II	I
16		146	454	*	1120	*	*	56	143	309	*	*	*
50	8 mm	12	28	52	37	96	211	5	12	22	190	460	940
78	10 mm	4	9	17	15	34	66	3	5	9	78	174	310

* se funden/evaporan

Tabla 5.2.2.1: Elevación máxima de la temperatura "DeltaT" en K de diferentes materiales conductores.

Se considera que la madera tiene un grado de inflamabilidad normal si su densidad bruta es superior a 400 kg/m^2 y tiene un espesor mayor a 2 mm. En ese caso se permite la instalación de derivadores sobre pilares de madera.

Si la pared es de material altamente inflamable, los derivadores pueden instalarse directamente sobre la superficie de la pared, por cuanto la elevación de temperatura durante el flujo de la corriente de rayo no es peligrosa.

La elevación máxima de la temperatura " ΔT " en K de los distintos conductores para cada nivel de protección, puede verse en la **tabla 5.2.2.1**. En base a estos valores, se permite, por lo regular, incluso instalar derivadores por detrás de un aislamiento térmico, ya que estos aumentos de temperatura no suponen un peligro de incendio del mismo.

De este modo, queda garantizada asimismo la prevención contra incendios.

También se puede reducir la elevación de la temperatura en la superficie, utilizando un revestimiento adicional de PVC al efectuar el tendido de los derivadores en o detrás de un aislamiento térmico. También puede utilizarse varilla de aluminio recubierto de PVC.

Si la pared está fabricada en material altamente inflamable y la elevación de temperatura de los derivadores pudiera resultar peligrosa, éstos deben instalarse de tal manera que la distancia entre los derivadores y la pared sea superior a 0,1 metros. Los elementos de sujeción sí pueden tocar la pared.

El constructor del edificio tiene que especificar si la pared está realizada de material fácilmente inflamable o no.

La definición exacta de los conceptos "no inflamable, normal y altamente inflamable" está descrita en la Hoja suplementaria 1 de la norma UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3).

5.2.2.1 Instalación de derivadores

Los derivadores deben estar dispuestos de tal manera que sean la continuación directa de la instalación captadora. Deben montarse verticales y rectos para que constituyan la conexión directa más corta posible con tierra.

Hay que evitar la formación de bucles, por ejemplo, en cornisas o en estructuras. Si esto no fuera posible,

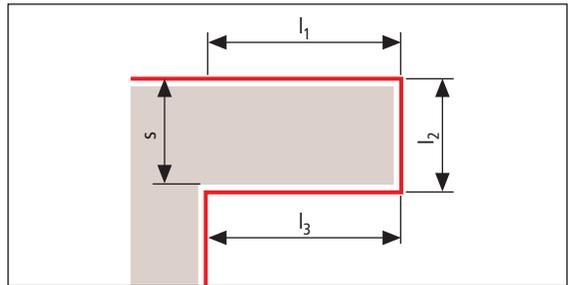


Fig. 5.2.2.1.1: Bucle en el derivador.

entonces la distancia, medida en el lugar de proximidad de dos puntos de un derivador, así como la longitud l del derivador entre estos puntos, tiene que cumplir con la distancia de separación " s " (**Figura 5.2.2.1.1**).

La distancia de separación " s " se calcula usando la longitud total $l = l_1 + l_2 + l_3$.

Los derivadores no deben instalarse en el interior de canalones ni en bajantes de agua, aún cuando estén revestidas de material aislante. La humedad en las bajantes de agua daría lugar a una corrosión excesiva de los derivadores.

Si se utiliza aluminio para el derivador, éste no debe tenderse directamente (sin distancia) sobre, en o bajo yeso, hormigón o mortero, ni tampoco en la zona del suelo. En caso de que el aluminio tenga un revestimiento de PVC, es posible efectuar el tendido en yeso, morteros u hormigón siempre que se garantice que el revestimiento no va a sufrir daños mecánicos ni se va a producir la rotura del aislamiento por frío.

Se recomienda tender los derivadores de tal manera que se mantenga la distancia de separación " s " requerida respecto a todas las puertas y ventanas (**Figura 5.2.2.1.2**).

Los canalones metálicos deben conectarse en los puntos de intersección con los derivadores (**Figura 5.2.2.1.3**).

Los tubos metálicos se deben conectar con el sistema equipotencial general o con la instalación de toma de tierra aún cuando no se utilicen como derivadores. Como quiera que el canalón del tejado por el que fluye la corriente de rayo está conectado a la tubería bajante, ésta lleva también una parte de la corriente de rayo que debe ser conducida al sistema de puesta a tierra. Ver **figura 5.2.2.1.4**.

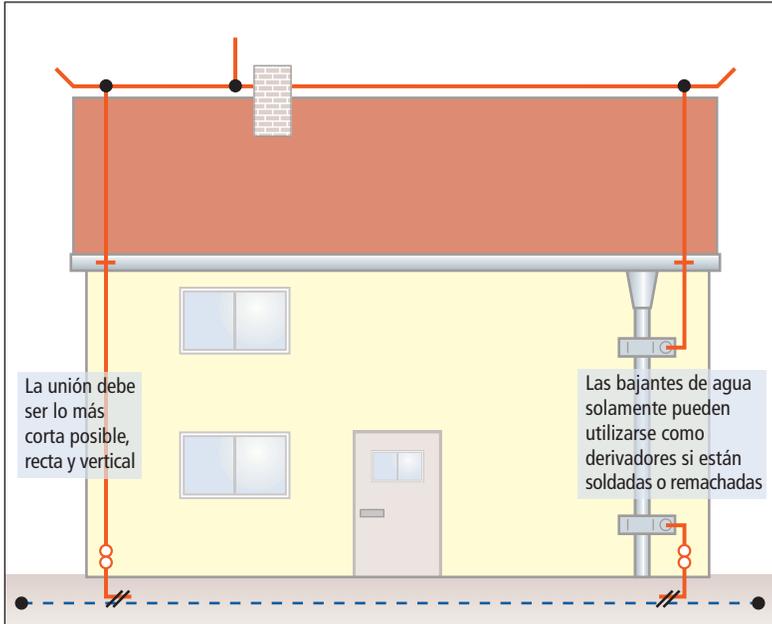


Fig. 5.2.2.1.2: Instalación derivadora.



Fig. 5.2.2.1.3: Instalación captadora con conexión al canalón del tejado.



Fig. 5.2.2.1.4: Puesta a tierra de bajantes de agua.

5.2.2.2 Componentes naturales de una instalación derivadora

Si se utilizan los componentes naturales de la estructura como derivadores, puede reducirse, o incluso suprimirse totalmente, el número de derivadores que fuera preciso instalar.

Los siguientes elementos de un edificio pueden utilizarse como "componentes naturales" de la instalación derivadora:

- ⇒ Instalaciones metálicas, siempre que la unión entre sus diferentes partes sea permanente y sus dimensiones se correspondan con las exigencias mínimas requeridas para los derivadores. Estas instalaciones metálicas pueden estar asimismo revestidas de material aislante.
- ⇒ La utilización como derivadores de tuberías con contenido inflamable o explosivo no está permitida si el sellado de las juntas no es metálico o las juntas de los tubos conectados no están unidas como para poder garantizar una unión eléctricamente conductora.
- ⇒ El esqueleto metálico de la estructura.
Si el armazón del esqueleto de acero o el hormi-

gón armado de la estructura se utiliza como derivador, no son necesarios anillos perimetrales, ya que con conductores suplementarios no se consigue una mejor distribución de la corriente.

- ⇒ Interconexión segura del armado de la estructura
- En edificaciones ya existentes, el armado no puede utilizarse como componente natural de derivación, si no puede asegurarse que está interconectado de forma segura. En ese caso hay que instalar derivadores externos.
- ⇒ Hormigón prefabricado
- En las piezas de hormigón prefabricado los puntos de conexión para el armado deben estar previstos. Las piezas de hormigón prefabricadas tienen que presentar una conexión conductora eléctrica entre todos los puntos de unión. Las distintas piezas tienen que interconectarse entre sí durante los trabajos de montaje (**Figura 5.2.2.2.1**).

Observación:

En el caso del hormigón pretensado hay que tener muy en cuenta el riesgo especial de eventuales influencias mecánicas debidas a la corriente de rayo



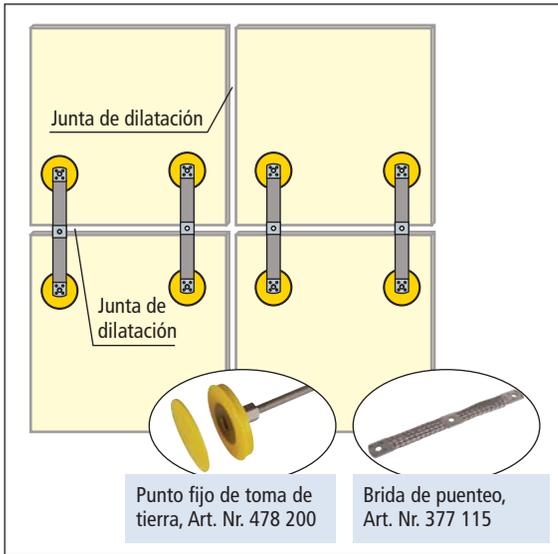


Fig. 5.2.2.2.1: Uso de elementos naturales. Nuevos edificios de hormigón prefabricado.

y, en consecuencia, a su conexión con el sistema de protección contra rayos.

En el caso de hormigón pretensado, la conexión a redondos o cables tensores solamente puede efectuarse fuera de la zona del pretensado. Antes de utilizar redondos o cables tensores como derivadores hay que solicitar la aprobación del responsable de la obra.

Si en estructuras existentes, el armado no está correctamente interconectado, no podrá utilizarse como derivador. En este caso se instalarán derivadores exteriores.

Asimismo pueden utilizarse como derivadores elementos de la fachada, rieles de montaje y estructuras metálicas, siempre que:

- ⇒ Cumplan las exigencias mínimas en cuanto a sus dimensiones. En chapas de metal el grosor de las mismas no debe ser inferior a 0,5 mm.
- ⇒ Se garantiza su conductibilidad eléctrica en sentido vertical. Si se utilizan fachadas metálicas como derivadores, tienen que estar interconectadas, de tal manera que, las diferentes chapas estén unidas entre sí mediante tornillos, pernos o bandas de puenteado. Hay que efectuar una conexión segura a la instalación captadora y al sistema de puesta a tierra que sea capaz de soportar corrientes rayo.

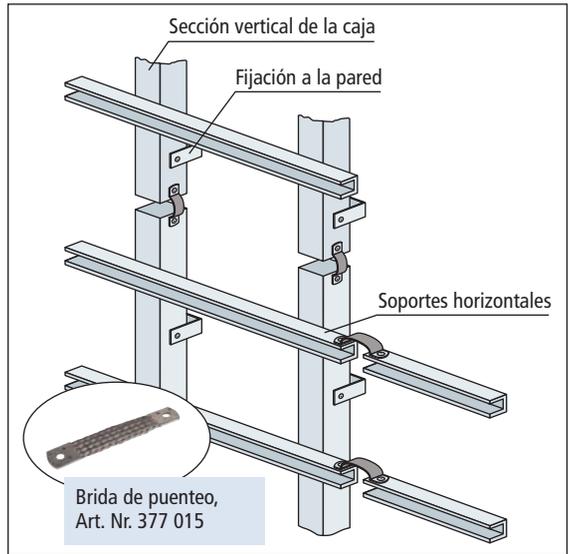


Fig. 5.2.2.2.2: Subestructura metálica, puenteada eléctricamente.

⇒ Si las chapas de metal no están unidas entre sí de acuerdo con las exigencias anteriores, pero las estructuras de soporte están realizadas de modo que desde la conexión a la instalación captadora hasta la conexión al sistema de puesta a tierra se garantiza la continuidad eléctrica, estas estructuras podrán utilizarse como derivadores (Figuras 5.2.2.2.2 y 5.2.2.2.3).

Las bajantes de agua pueden utilizarse como derivadores naturales si están interconectadas de forma segura (mediante abrazaderas o remaches) y se cum-



Fig. 5.2.2.2.3: Conexión a tierra de una fachada metálica.

plen los espesores de pared mínimos exigidos de 0,5 mm.

Si una bajante no está interconectada de forma segura puede utilizarse como soporte para derivadores suplementarios. Este tipo de aplicación está representado en la **figura 5.2.2.2.4**. La conexión de la bajante al sistema de puesta a tierra debe ser capaz de soportar corrientes de rayo, ya que el conductor solamente es sostenido por la tubería.

5.2.2.3 Puntos de medida

En cada conexión de un derivador al sistema de puesta a tierra se debe instalar un punto de medida (a ser posible antes de entrar en el terreno).

Los puntos de medida son necesarios para poder comprobar las siguientes características del sistema de protección contra rayos:

- ⇒ Conexiones de los derivadores con el derivador siguiente a través de la instalación captadora
- ⇒ Interconexión de los terminales entre sí a través del sistema de puesta a tierra, p. ej. en caso de tomas de tierra anulares o tomas de tierra de cimientos (Toma de tierra Tipo B)
- ⇒ Resistencias de puesta a tierra en caso de tomas de tierra individuales (Toma de tierra Tipo A).

Los puntos de medida no son necesarios cuando el diseño constructivo (p. ej estructura de hormigón



Fig. 5.2.2.2.4: Derivador instalado a lo largo de la tubería.



Fig. 5.2.2.3.1: Punto de medida numerado.

armado) no permite la desconexión “eléctrica” de la derivación “natural” respecto al sistema de puesta a tierra. (p. ej. toma de tierra de cimientos).

El punto de medida solamente debe poder abrirse, para efectuar mediciones, con la ayuda de una herramienta. Si no, debe estar cerrado.

En el diseño del sistema de protección contra rayos, cada punto de medida debe identificarse claramente. Por lo general, cada punto de medida se identifica mediante un número (**Figura 5.2.2.3.1**).

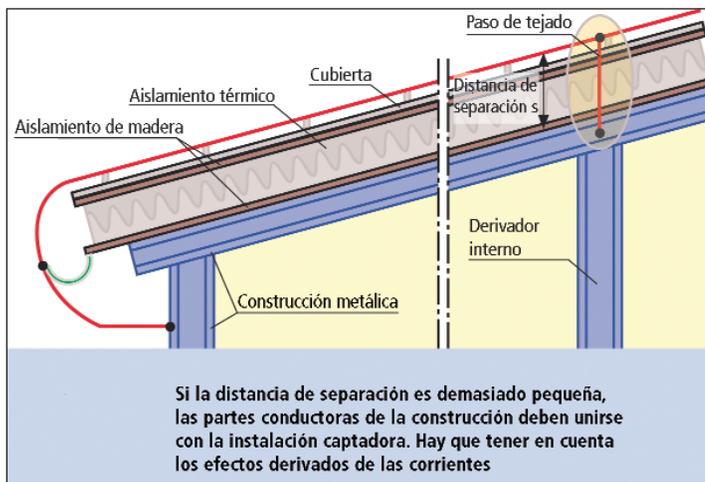


Fig. 5.2.2.4.1: Instalación captadora en cubiertas de grandes dimensiones - derivadores internos.

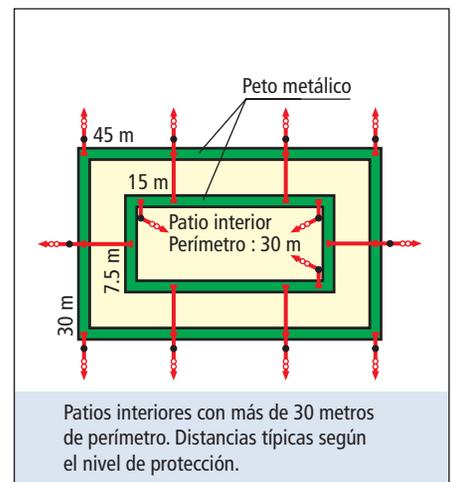


Fig. 5.2.2.5.1: Instalación derivadora en patios interiores.

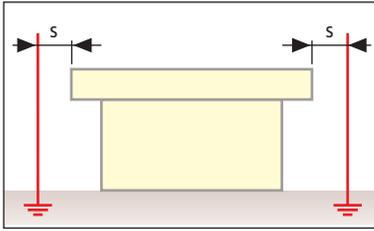


Fig. 5.2.3.1: Mástiles captadores aislados del edificio.

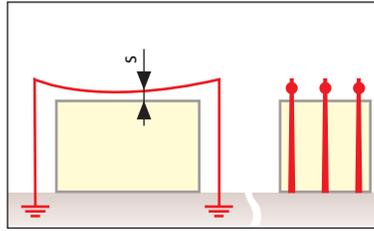


Fig. 5.2.3.2: Mástiles captadores interconectados mediante cables.

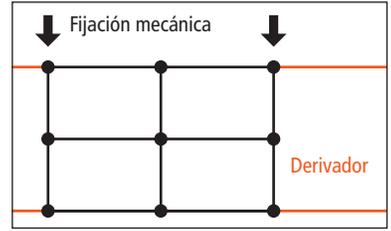


Fig. 5.2.3.3: Mástiles captadores interconectados mediante cables con uniones transversales (Malla).

5.2.2.4 Derivadores internos

Si las medidas del edificio (longitud y anchura) son cuatro veces más grandes que la distancia existente entre los derivadores, deberán instalarse derivadores adicionales internos en función del nivel de protección correspondiente (Figura 5.2.2.4.1).

Las dimensiones de la cuadrícula para los derivadores internos son de aprox. 40 m x 40 m.

Con mucha frecuencia se precisan derivadores internos para estructuras con cubiertas de grandes dimensiones, p. ej. grandes naves industriales o centros de distribución. En estos casos, los pasos de tejado debería realizarlos el instalador de la cubierta ya que es responsable de la estanqueidad de la misma.

El campo electro-magnético resultante que se origina cerca de los derivadores, debe asimismo tomarse en consideración al efectuar el proyecto de la protección interna contra rayos. (Atención a acoplamientos sobre sistemas eléctricos/electrónicos).

5.2.2.5 Patios interiores

En estructuras con patios interiores de más de 30 m de perímetro deben instalarse derivadores con distancias entre ellos según señala la tabla 5.2.1.1 (Figura 5.2.2.5.1).

5.2.3 Derivadores para una protección externa contra rayos aislada

Si la instalación captadora está constituida por puntas captadoras instaladas en mástiles aislados (o un mástil), ésta será al mismo tiempo instalación captadora y derivadora (Figura 5.2.3.1).

Para cada uno de estos mástiles se precisa, como

mínimo, un derivador. Los mástiles de acero o los mástiles con armado de acero interconectado no precisan derivadores suplementarios.

Un mástil de bandera metálico, por ejemplo, puede utilizarse como elemento captador lo que representa ventajas desde el punto de vista económico y estético.

La distancia de separación "s" debe mantenerse entre la instalación captadora y derivadora y la estructura.

Si la instalación captadora y derivadora se compone de uno o varios cables tensados, para cada extremo del conductor hay que instalar, por lo menos, un derivador (Figura 5.2.3.2).

Si la instalación captadora forma una malla, es decir, que cada uno de los cables se interconecta para formar una malla (están unidos entre sí transversalmente), en cada extremo de cada cable al que se unan los demás, debe instalarse, como mínimo, un derivador (Figura 5.2.3.3).

5.2.4 Sistema derivador aislado resistente a alta tensión - Conductor HVI

Para crear una red de telefonía móvil con una extensa cobertura se usan un gran número de estructuras donde localizar las estaciones bases que componen dicha red. Algunos de estos edificios están equipados con sistemas de protección contra rayos. Para una planificación y ejecución, conforme con la normativa, de la infraestructura de telefonía es necesario tomar en consideración la estructura anteriormente existente y las diferentes normativas aplicables deben estar estrictamente diferenciadas.

Desde el punto de vista del operador de la red de telefonía móvil existen básicamente tres situaciones:

- ⇒ El edificio no dispone de sistema de protección contra rayos.
- ⇒ El edificio está equipado con un sistema de protección contra rayos fuera de servicio.
- ⇒ El edificio está equipado con una instalación de protección contra rayos en correcto estado.

El edificio no dispone de sistema de protección contra rayos

En Alemania las estaciones de telefonía móvil se instalan según la norma DIN VDE 0855-300. En conformidad con el concepto de protección contra sobretensiones de los operadores de la red de telefonía, en los contadores se instalará una protección suplementaria contra sobretensiones.

El edificio está equipado con un sistema de protección contra rayos fuera de servicio

En Alemania, las instalaciones de telefonía móvil se conectan al sistema de protección externa contra rayos de acuerdo con el nivel de protección exigido. Así, se realiza un análisis y evaluación de las vías de derivación que se precisan para conducir a tierra la corriente de rayo. Después, se reemplazarán los elementos de la instalación que sea necesario, como puntas captadoras, derivadores y conexiones a la puesta a tierra. Las deficiencias existentes en las partes de la instalación que ya no son utilizadas se notificarán por escrito a los propietarios del edificio.

El edificio está equipado con un sistema de protección contra rayos en correcto estado

La experiencia nos demuestra que la mayoría de sistemas de protección contra rayos están contruidos generalmente según el nivel de protección III. Para ciertos edificios está prescrita la obligación de efectuar revisiones periódicas. La estación de telefonía móvil debe incluirse de acuerdo con el nivel de protección prefijado. En instalaciones con nivel de protección I y II, deberá registrarse fotográficamente el entorno del edificio, para poder demostrar, en caso de posteriores problemas, cual era la situación existente en la fecha de la construcción.

Si se realiza una instalación de telefonía móvil en un edificio con protección externa contra rayos en correcto estado, será de aplicación la normativa actual (UNE EN 62305 – IEC 62305). Las distancias de

seguridad deberán calcularse según el nivel de protección correspondiente en cada caso. Todos los componentes mecánicos utilizados deben poder soportar las corrientes parciales de rayo.

Por razones de estandarización, todos los elementos de fijación de acero y las estructuras para soportar antenas, deben diseñarse según el nivel de protección I. La unión debe efectuarse por la vía más corta, lo que no resulta problemático ya que el tendido de conductores en cubiertas planas suele realizarse en forma de malla. Si en el edificio que alberga la instalación de telefonía móvil existe un sistema de protección contra rayos, éste tendrá prioridad frente a una instalación de toma de tierra de antenas.

En todo caso, el sistema de protección a ejecutarse se debe tener en cuenta en la fase de planificación del proyecto:

- ⇒ Si los componentes del sistema se encuentran situados en la cubierta del edificio, es preferible instalar los cables eléctricos por el exterior del mismo.
- ⇒ Si los componentes del sistema se encuentran situados en la cubierta del edificio y se ha proyectado la disposición de un mástil central, se instalará un sistema de protección contra rayos aislado.
- ⇒ Si los componentes del sistema están situados dentro del edificio, es preferible instalar un sistema de protección contra rayos aislado. En estos casos, debe tenderse a una ejecución geométrica pequeña de la infraestructura de telefonía móvil, para que los costes de la protección contra rayos sean asumibles económicamente.

La experiencia nos enseña que, en muchos casos de instalaciones de protección contra rayos existentes, se detectan numerosas deficiencias, que pueden disminuir la eficacia y el rendimiento de la nueva instalación. Estas deficiencias dan lugar a que, pese a la correcta inclusión de la instalación de telefonía en el sistema de protección externa contra rayos, se pueden originar daños en el interior del edificio.

Para que el proyectista de la red de telefonía móvil pueda construir instalaciones de antena conformes a las normas, incluso en situaciones difíciles, antes solamente se disponía de la protección contra rayos aislada mediante distanciadores horizontales. En estos casos, sin embargo, este tipo de instalación puede resultar no demasiado estética (**Figura 5.2.4.1**).



Fig. 5.2.4.1: Instalación captadora aislada con soportes distanciados.



Fig. 5.2.4.2: Instalación captadora aislada para antenas de telefonía. Aplicación del sistema DEHNconductor.

Instalaciones captadoras como la que se muestra en la **figura 5.2.4.1** no pueden disponerse en emplazamientos donde prima el impacto estético que pueda tener la instalación de la antena.

El conductor HVI aislado representa una solución innovadora que proporciona al instalador de sistemas de protección contra rayos una nueva posibilidad para su diseño y una manera fácil de conseguir la distancia de separación (**Figura 5.2.4.2**).

5.2.4.1 Instalación y funcionamiento del sistema derivador aislado HVI

El concepto básico del sistema derivador aislado consiste en revestir el conductor por el que circula la corriente de rayo con material aislante, de tal manera que se mantenga la distancia de separación necesaria "s" respecto a otras partes conductoras de la construcción del edificio, así como respecto a conductores eléctricos y a tuberías.

En principio, cuando se utiliza este tipo de materiales aislantes en la construcción de la instalación derivadora, deben cumplirse las siguientes exigencias:

- ⇒ Posibilidad de conexión mediante terminales, resistentes a la corriente de rayo, de los derivado-

res a la instalación captadora (punta captadora, conductor captador, etc.).

- ⇒ Conformidad con la necesaria distancia de separación "s" mediante una suficiente resistencia dieléctrica del derivador, tanto en la zona de entrada como a lo largo de todo el derivador.
- ⇒ Suficiente capacidad para conducir corriente mediante una sección adecuada del derivador.
- ⇒ Posibilidad de conexión al sistema de puesta a tierra o al sistema equipotencial.

Mediante el recubrimiento del derivador con materiales aislantes de elevada resistencia dieléctrica, puede reducirse la distancia de separación. Sin embargo, para ello, deben cumplirse determinados requerimientos tecnológicos de alta tensión. Esto es necesario ya que, la resistencia dieléctrica del derivador aislado depende de su propia colocación y de la posibilidad de que se originen descargas.

El uso de derivadores aislados, no apantallados, es una solución fundamental que parece independiente, en un principio, de su posición y tendido. Sin embargo, únicamente con un conductor recubierto por un revestimiento de material aislante, no puede solucionarse el problema. Sólo con tensiones de impulso inducidas relativamente pequeñas, se producirían pequeñas descargas en la zona de las proximidades (p. ej. entre el metal, soportes puestos a tierra y en el punto de entrada de corriente) que podrían ocasionar una descarga total en la superficie de una sección importante de conductor.

En lo que se refiere a las descargas, son críticas las zonas en las que coinciden materiales aislantes, metal (puesto a potencial de alta tensión o puesto a tierra) y aire. Este entorno está sometido a un esfuerzo de alta tensión debido a la elevación de potencial de las descargas superficiales, obteniéndose como resultando una considerable reducción de la resistencia eléctrica. Las descargas superficiales se deben tener en cuenta, cuando componentes usuales de intensidad de campo eléctrica E (orientados verticalmente respecto a la superficie del material aislante) dan lugar a que se sobrepase la tensión de descarga y los componentes de campo tangenciales fomenten la propagación de las descargas superficiales (**Figura 5.2.4.1.1**).

La tensión inicial de descarga determina la resistencia de todo el dispositivo aislante y se encuentra en el orden de magnitudes de 250 - 300 kV de tensión de impulso de rayo.

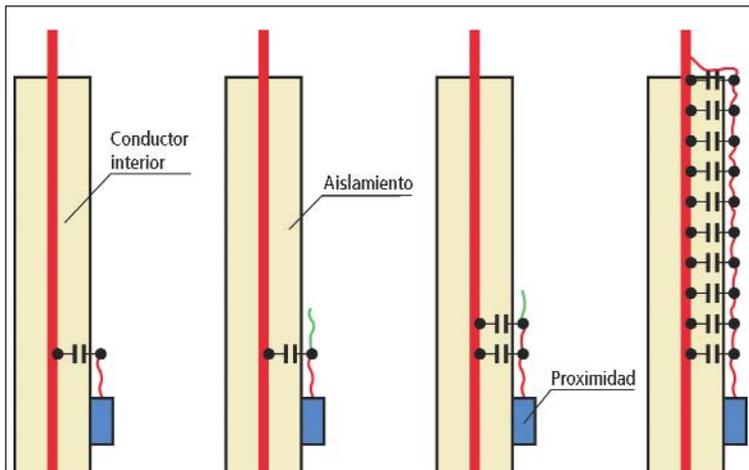


Fig. 5.2.4.1.1: Evolución de una descarga en un derivador aislado sin revestimiento especial.

Mediante el cable coaxial conductor (HVI conductor) - representado en la **figura 5.2.4.1.2** - se evita que se originen descargas superficiales y se consigue derivar a tierra la corriente de rayo con seguridad.

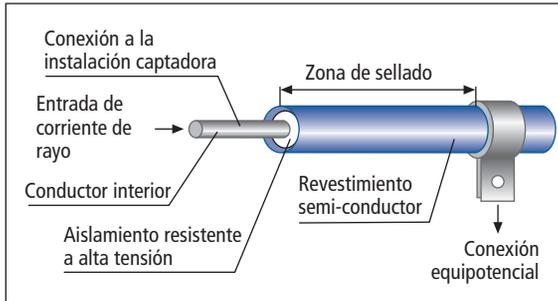


Fig. 5.2.4.1.2: Componentes del conductor HVI.



Fig. 5.2.4.1.3: Conductor HVI I y componentes del sistema DEHNconductor.

Los sistemas derivadores aislados con control de campo y apantallamiento semi-conductor impiden que las descargas superficiales influyan sobre el campo eléctrico en la zona del punto de entrada. Además, facilitan el guiado de la corriente de rayo por el interior del cable especial y garantizan la distancia de separación exigida "s". El blindaje semi-conductor del cable coaxial aísla del campo eléctrico. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, el campo magnético que rodea al conductor interior por el que fluye la corriente, no se vea influido.

La optimización del control de campo permite una unidad de sellado con una longitud de 1,50 m para conseguir una distancia de separación equivalente en aire "s" <- 0,75 o de "s" <- 1,50 metros en material sólido (**Figura 5.2.4.1.3**).

Esta unidad especial de sellado esta realiza mediante la conexión apropiada a la instalación captadora (punto de entrada) y la conexión equipotencial a una distancia fija. Todo el revestimiento semi-conductor del cable, tiene una resistencia claramente superior a la de un cable coaxial con blindaje metálico. Con ello, incluso en el caso de una conexión equipotencial múltiple del revestimiento del cable, podrían entrar en el edificio corrientes parciales de rayo insignificantes.

Además de la distancia de separación necesaria "s", la longitud máxima de cable L_{max} de un derivador aislado de este tipo puede calcularse mediante la ecuación siguiente:

$$L_{max} = \frac{k_m \cdot s}{k_i \cdot k_c}$$

5.2.4.2 Ejemplos de instalaciones

Aplicación para estaciones de telefonía móvil

Con frecuencia, las estaciones de telefonía móvil se ubican en la cubierta de los edificios. Por lo regular, existe un acuerdo entre el operador de telefonía móvil y el propietario de la edificación, en virtud del cuál se asegura que la construcción de la instalación de telefonía no representa ningún tipo de riesgo

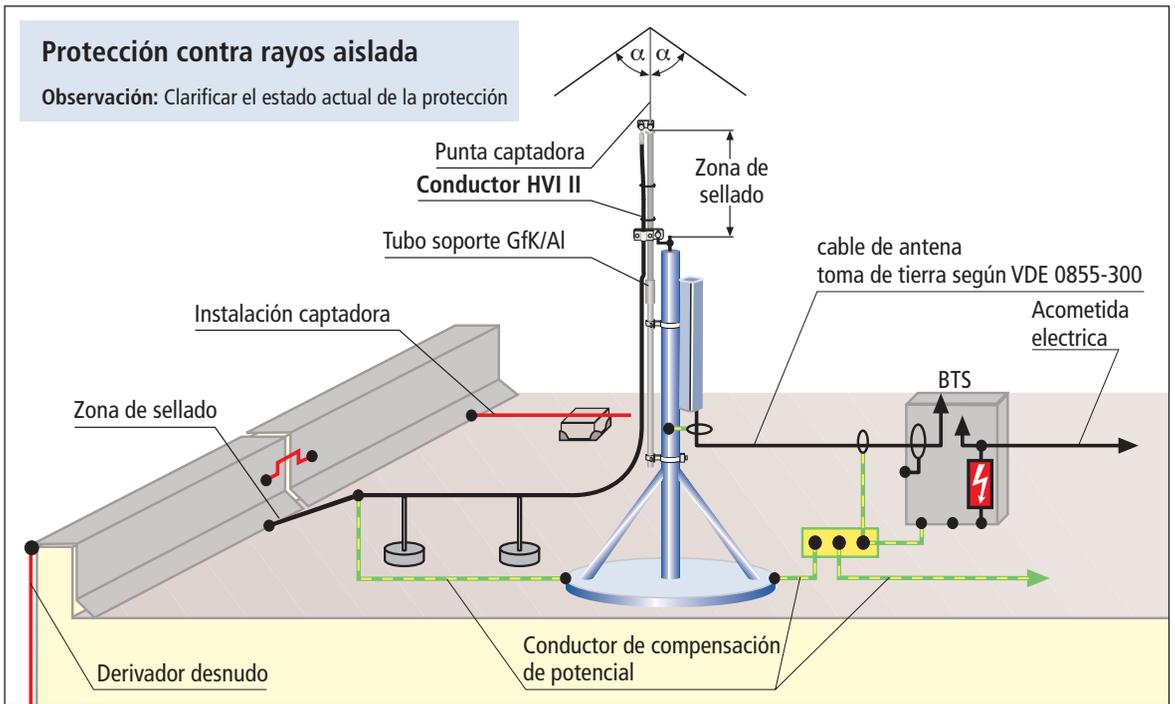


Fig. 5.2.4.2.1: Integración de una nueva antena 2G/3G en la instalación ya existente de protección contra rayos con utilización del conductor HVI.

para el edificio. En relación con la protección contra rayos, esto significa especialmente que, en caso de una descarga de rayo en la estructura de la antena, no entrarán corrientes parciales de rayo en la edificación. Una corriente parcial de rayo en el interior de la edificación pondría en peligro especialmente los equipos y dispositivos eléctricos y electrónicos que se encuentren en la misma.

En la **figura 5.2.4.2.1** se reproduce una solución para una "Instalación captadora aislada" montada en la estructura soporte de una antena.

La punta captadora debe fijarse al soporte de antena mediante un tubo de apoyo de material no conductor para que esté aislada. La altura de la punta captadora depende de que la estructura de antena y otros dispositivos eléctricos existentes, queden o no dentro de la zona de protección que aporta la punta captadora.

En edificios con varias antenas hay que instalar varias "puntas captadoras aisladas".

En las **figuras 5.2.4.2.a** y **b** se representa el montaje sobre un poste de antena.



Fig. 5.2.4.2.2a: Tubo aislante en la zona de la antena.



Fig. 5.2.4.2.2b: Conexión al soporte de la antena para control de potencial.



Fig. 5.2.4.2.3a: Ventiladores con puntas captadoras y tendido de cable.



Fig. 5.2.4.2.3b: Punta captadora, conductor circular elevado con conexión a sistema derivador aislado.

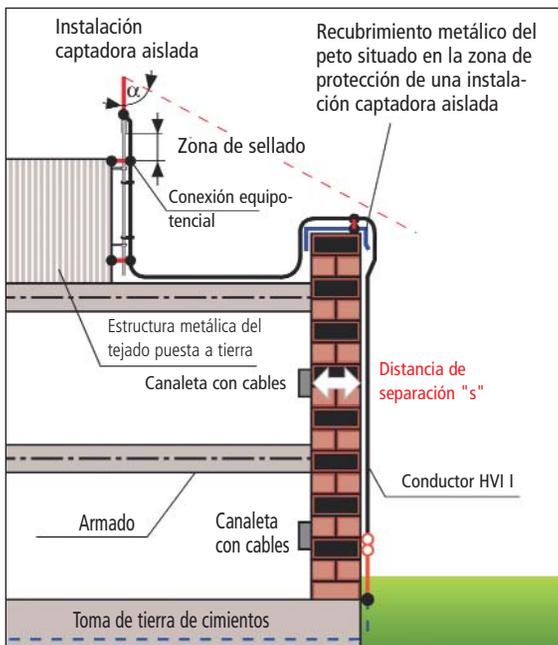


Fig. 5.2.4.2.4: Conservación de la distancia de separación necesaria mediante derivador aislado controlada por tensión (HVI).

Superestructuras de tejado

Las superestructuras metálicas y eléctricas de tejado sobresalen del plano de la cubierta y, consecuentemente, son puntos expuestos a descargas directas de rayo. Debido a la conexión conductora de estas estructuras con el interior del edificio (mediante tuberías y/o cables eléctricos), existe el riesgo de que fluyan corrientes parciales de rayo al interior del mismo.

Para evitar esta situación y los daños que pueda provocar, debe asegurarse la distancia de separación necesaria y conectar la instalación captadora a la instalación derivadora aislada (Figuras 5.2.4.2.3a y 5.2.4.2.3b).

De este modo, todas las estructuras metálicas/eléctricas que sobresalen del tejado se encontrarán dentro de la zona protegida y libres de recibir descargas directas de rayo. La corriente de rayo se conducirá a lo largo de la estructura hasta el sistema de puesta a tierra.

Instalación derivadora

En el caso de las instalaciones aisladas, desde un punto de vista estético, resulta especialmente problemático integrar la instalación derivadora en el edificio a proteger debido a que deben tomarse en consideración las distancias de seguridad..

Los conductores HVI pueden instalarse, por ejemplo, en la fachada y también pueden integrarse en su interior. (Figura 5.2.4.2.5). El nuevo sistema derivador aislado contribuye a mejorar el aspecto estético de la estructura. Funcionalidad y diseño pueden fusionarse y constituir una unidad, por lo que esta tecnología innovadora representa un aspecto importante para la arquitectura moderna.



Fig. 5.2.4.2.5: Sistema captador con cable tendido y sistema derivador aislado.

5.2.4.3 Ejemplo de proyecto: Edificio residencial

Estructura

El edificio de la **figura 5.2.4.3.1** se construyó desde la planta baja hasta el sexto piso en forma de construcción convencional.

Con posterioridad se levantó un piso más sobre la superficie de tejado existente. La fachada exterior del séptimo piso está formada por planchas de metal.

En el tercer piso se encuentra el centro de medios audiovisuales y en la planta baja se localiza la administración. Los restantes pisos hasta el séptimo, están dedicados a viviendas.

Las cubiertas de los pisos sexto y séptimo están rematadas con un peto metálico, cuyos elementos no están conectados eléctricamente.

El edificio tiene 25,80 metros de altura (sin peto) hasta el nivel de cubierta.

Más adelante, sobre la cubierta del séptimo piso, se montaron cinco instalaciones de antena para telefonía móvil y microondas de distintos operadores. El emplazamiento de las antenas se efectuó en las esquinas y en el centro de la cubierta.

Los cables (cables coaxiales) de las cuatro antenas situadas en las esquinas de la cubierta están instalados cerca del peto de la esquina sur-oeste.

Desde allí, se conducen a través de una bandeja metálica que conecta el peto de la cubierta de los pisos sexto y séptimo con la estación de telefonía móvil (BTS) situada en el sexto piso.

Los cables de la antena situada en el centro de la cubierta están instalados en otra bandeja de cables metálica que conecta directamente hasta la segunda estación de telefonía móvil situada en el lado noreste del edificio en el sexto piso. Esta conducción de cable está conectada a los petos perimetrales del edificio.

El edificio estaba protegido con un sistema de protección contra rayos. La nueva instalación de protección externa contra rayos para protección del edificio y de las personas se efectuó de acuerdo con la norma de protección contra rayos DIN VDE 0185 -3 (IEC 61024), que era a norma de aplicación cuando el edificio se construyó.

Durante la instalación de las antenas, la compensación de potencial y la puesta a tierra de la instalación se llevaron a cabo de acuerdo con la normativa alemana DIN VDE 0855-300 parte 300.

La puesta a tierra de los sistemas, sin embargo, no se efectuó aislada de la protección externa contra rayos existente hasta al sistema de puesta a tierra a nivel de suelo, sino solamente respecto de la instalación captadora.

De este modo, en caso de una descarga de rayo, se pueden introducir corrientes parciales de rayo en el edificio a través de las pantallas de los cables coaxiales. Estas corrientes parciales de rayo constituyen un peligro, no sólo para las personas sino también para los dispositivos eléctricos y electrónicos existentes en el mismo.

Nuevo concepto

Se requería una instalación de protección contra rayos que evitara que pudieran acceder al interior del edificio corrientes parciales de rayo a través de los componentes de las antenas (Estructuras soporte, blindajes de cables e instalaciones). Al mismo tiempo, debía asegurarse la distancia de separación necesaria "s" entre los soportes de las antenas y la instalación captadora situada sobre la cubierta del séptimo piso.

Esto es algo que no puede conseguirse con una instalación de protección contra rayos de ejecución convencional.

Mediante la instalación del conductor HVI se construyó un sistema de protección contra rayos con una ins-



Fig. 5.2.4.3.1: Vista general.

talación captadora aislada. Para ello se necesitaron los siguientes componentes:

⇒ Puntas captadoras sobre tubos aislantes, de material GRP, fijados directamente al mástil de las antenas (**Figura 5.2.4.2.2a**).

⇒ Derivación desde la punta captadora mediante un conductor HVI hasta conectar con el anillo aislado (**Figura 5.2.4.3.2**).

⇒ Sellado del punto entrada, a fin de garantizar la resistencia a descargas en el punto de entrada (**Figuras 5.2.4.2.2a y 5.2.4.2.2b**).

⇒ Anillo aislado realizado con varilla instalada sobre soportes aislantes de GRP. La altura de los soportes se calcula de acuerdo con la distancia de separación necesaria.

⇒ Derivadores del anillo aislado tendidos a través del peto y de la fachada metálica hacia los derivadores desnudos en el sexto piso con la correspondiente distancia de separación "s" necesaria respecto al peto (**Figura 5.2.4.3.3**).

⇒ Anillo perimetral suplementario, conectando todos los derivadores entre sí a una altura de aprox. 15 metros, para reducir la distancia de separación necesaria "s" de la instalación captadora y la instalación derivadora (**Figuras 5.2.4.3.4 y 5.2.4.4.1**).

Los distintos pasos de la ejecución, explicados en detalle, están representados en la **figura 5.2.4.3.4**

Es importante advertir que el concepto de ejecución proyectado ha sido analizado y discutido



Fig. 5.2.4.3.2: Instalación captadora aislada y anillo aislado.
Fuente: H. Bartels GMBH, Oldenburg.



Fig. 5.2.4.3.3: Derivador de anillo aislado.

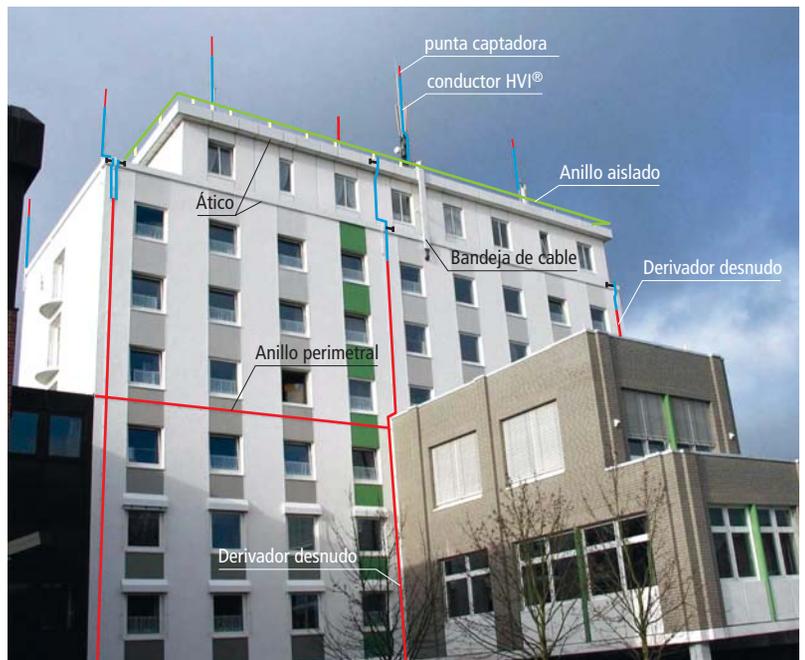


Fig. 5.2.4.3.4: Vista general de la nueva protección externa contra rayos.

detalladamente con el instalador, a fin de evitar fallos o errores en la realización.

Al planificar la protección externa contra rayos se ha tenido en cuenta el hecho de que la cubierta del tejado, en el sexto piso del edificio (**Figura 5.2.4.3.1**) y los anexos al edificio situado más abajo (**Figura 5.2.4.3.4**) también están situados en la zona de protección/ángulo de protección de la instalación captadora.

5.2.4.4 Distancia de separación

Para el cálculo de la distancia de separación "s", hay que tener en cuenta, no sólo la altura del edificio, sino también la altura de cada una de las antenas con sus correspondientes sistemas captadores aislados.

Las cuatro antenas situadas en las esquinas del edificio sobrepasan la cubierta en 3,6 m. cada una. La antena central sobresale de la cubierta 6,6 m.

Así pues, teniendo en cuenta la altura del edificio, se obtuvieron las siguientes alturas totales que debían considerarse para el cálculo de la instalación:

⇒ 4 antenas situadas en las esquinas hasta el punto de base de la punta captadora +29,40 m

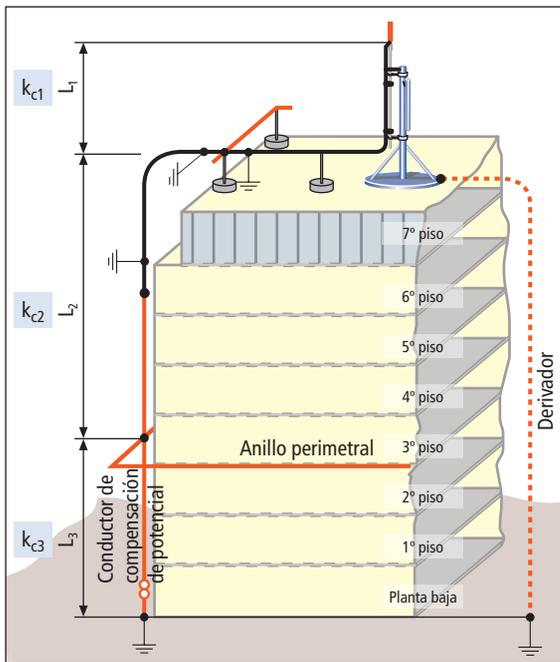


Fig. 5.2.4.4.1: Cálculo de la distancia de separación necesaria.

⇒ 1 antena en el medio de la cubierta hasta el punto de base de la punta captadora +32,40 m

⇒ Otras tres puntas captadoras aisladas, situadas en el lado oeste de la cubierta y dos mástiles captadores aislados situados en el balcón del sexto piso, en el lado sur, que completan la protección de toda la cubierta del edificio.

Como cable de derivación aislado se utilizó el cable especial DEHNconductor, con el que se consigue mantener una distancia de separación equivalente de $s = 0,74 \text{ m (aire)}/1,5 \text{ m (materiales sólidos de construcción)}$.

El cálculo de las distancias de separación necesarias se efectuó para tres sectores parciales según **figura 5.2.4.4.1**:

1. Sector parcial de altura +32,4 m y altura +29,4 (antenas) hasta +27,3 m (anillo aislado) sobre la cubierta
2. Sector parcial de +27,3 m hasta +15,0 m (anillo aislado sobre cubierta hasta anillo perimetral adicional inferior)
3. Sector parcial de +15,0 m hasta $\pm 0 \text{ m}$ (anillo perimetral inferior hasta el nivel del suelo).

La instalación derivadora se compone de seis derivadores desde el anillo aislado a una altura de +27,3 m. hasta el anillo perimetral adicional a +15,0 m. El anillo perimetral a nivel +15,0 m. está unido con el anillo de tierra a través de los seis derivadores del edificio residencial y otros cuatro derivadores instalados en anexos al edificio.

Con ello resulta una distribución de corriente diferente en cada uno de los sectores parciales, que deberá tenerse en cuenta en la planificación de la instalación de protección contra rayos.

La compensación de potencial necesaria y la toma de tierra de los componentes de las antenas sobre la cubierta (incluyendo las bandejas de cables, las fachadas metálicas y los petos en los dos niveles de tejado) se efectuó a través de dos cables suplementarios de toma de tierra NYY 1 x 25 mm², conectados al sistema equipotencial de cada una de las estaciones de telefonía.

Con la construcción de la instalación captadora aislada sobre cubierta y antenas, por un lado, y con los derivadores aislados en la zona de coexistencia con partes metálicas del edificio, por otro, se evita la entrada de corrientes parciales de rayo en el interior del edificio.

Material	Forma	Sección mínima mm ²	Observaciones ¹⁰⁾
Cobre	material plano macizo material redondo macizo ⁷⁾ cable material redondo macizo ^{3), 4)}	50 ⁸⁾ 50 ⁸⁾ 50 ⁸⁾ 200 ⁸⁾	Grosor mínimo 2 mm. Diámetro 8 mm. Diámetro mínimo de cada cable 1,7 mm. Diámetro 16 mm.
Cobre cincado ¹⁾	material plano macizo material redondo macizo ⁷⁾ cable	50 ⁸⁾ 50 ⁸⁾ 50 ⁸⁾	Grosor mínimo 2 mm. Diámetro 8 mm. Diámetro mínimo de cada cable 1,7 mm.
Aluminio	material plano macizo material redondo macizo cable	70 50 ⁸⁾ 50 ⁸⁾	Grosor mínimo 3 mm. Diámetro 8 mm. Diámetro mínimo de cada cable 1,7 mm.
Aleación de aluminio	material plano macizo material redondo macizo cable material redondo macizo ³⁾	50 ⁸⁾ 50 50 ⁸⁾ 200 ⁸⁾	Grosor mínimo 2,5 mm. Diámetro 8 mm. Diámetro mínimo de cada cable 1,7 mm. Diámetro 16 mm.
Acero cincado al fuego ²⁾	material plano macizo material redondo macizo ⁹⁾ cable material redondo macizo ^{3), 4), 9)}	50 ⁸⁾ 50 50 ⁸⁾ 200 ⁸⁾	Grosor mínimo 2,5 mm. Diámetro 8 mm. Diámetro mínimo de cada cable 1,7 mm. Diámetro 16 mm.
Acero Inoxidable ⁵⁾	material plano macizo ⁶⁾ material redondo macizo ⁶⁾ cable material redondo macizo ^{3), 4)}	50 ⁸⁾ 50 70 ⁸⁾ 200 ⁸⁾	Grosor mínimo 2 mm. Grosor mínimo 8 mm. Diámetro mínimo de cada cable 1,7 mm. Diámetro 16 mm.

1) Estañado al fuego o estañado galvánicamente. Espesor mínimo del recubrimiento 1 µm.

2) El revestimiento debe ser liso, continuo, libre de restos de fundentes y presentar un grosor mínimo de 50 µm.

3) Utilizable para puntas captadoras. Para aplicaciones en las que no sean críticos esfuerzos mecánicos como la carga del viento, puede utilizarse una punta captadora de 1 m de largo con fijación suplementaria y de diámetro de 10 mm.

4) Aplicable para barras de penetración en el terreno.

5) Cromo ≥ 16 %, níquel ≥ 8 %, carbono ≤ 0.03 %

6) En caso de acero inoxidable en hormigón y/o en contacto directo con materiales inflamables, la sección mínima para el redondo macizo debe ser de 78 mm² (10 mm. de diámetro) y para material plano macizo 75 mm² (3 mm. de grosor)

7) En determinadas aplicaciones en las que la resistencia mecánica no es de relevancia, la sección puede reducirse de 50 mm² (8 mm. de diámetro) a 28 mm² (6 mm. de diámetro). En estos casos, hay que tener en cuenta la disminución de la distancia de los elementos de fijación.

8) Cuando las exigencias térmicas y mecánicas son relevantes, estas medidas pueden incrementarse a 60 mm² en el caso del material plano macizo y a 78 mm² para el redondo macizo.

9) Con una energía específica de 10,000 kJ/Ω la sección mínima para evitar la fusión es de 16 mm² (cobre), 25 mm² (aluminio), 50 mm² (acero) y 50 mm² (acero inoxidable). Más información en el anexo E.

10) Grosor, achura y diámetro están definidos para una tolerancia de ± 10%.

Tabla 5.3.1: Material, forma y sección mínima de puntas captadoras, conductores captadores y derivadores.

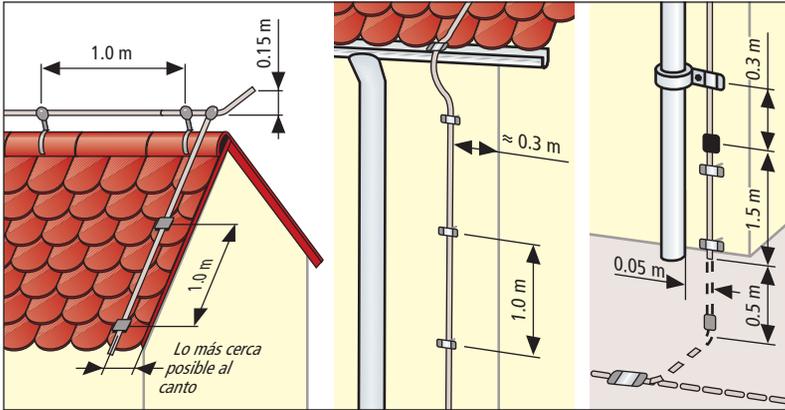


Fig. 5.4.1: Ejemplos de detalles de una protección externa contra rayos en un edificio con tejado a dos aguas.

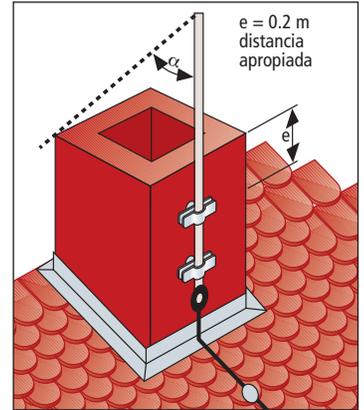


Fig. 5.4.2: Punta captadora para chimenea.

5.3 Materiales y medidas mínimas para dispositivos captadores y derivadores

En la **tabla 5.3.1** se recogen las secciones mínimas, la forma y el material de elementos captadores.

Estas exigencias están condicionadas por la capacidad de los materiales para soportar la corriente de rayo (elevación de la temperatura) y por los esfuerzos mecánicos al usarlos.

Si se utiliza varilla de diámetro 8 mm. como punta captadora, se permite una altura máxima libre de 0,5 m. La limitación de altura para una varilla de diámetro 10 mm. es de 1 m. de longitud libre.

Observación:

Según la norma UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3) punto 1 de la tabla 8, la sección mínima para un cable de unión entre dos barras equipotenciales es de 14 mm² Cu.

En pruebas efectuadas con un cable de cobre aislado con PVC y con una corriente de choque de 100 kA (10/350 μs) se ha comprobado una elevación de la temperatura de 56 K. En este caso, puede utilizarse,

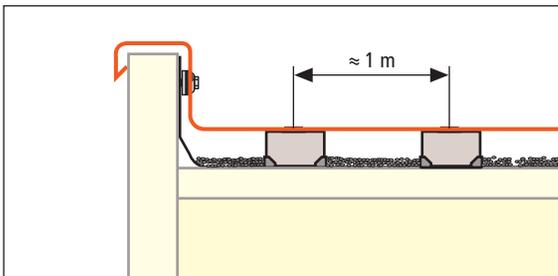


Fig. 5.4.3: Instalación en cubierta plana.

por ejemplo, un cable NYY 1 x 16 mm² Cu como derivador o como conductor de unión sobre tierra o bajo tierra.

5.4 Medidas de montaje para instalaciones captadoras y derivadoras

Las medidas de montaje que se recogen a continuación están basadas en la experiencia práctica (**Figura 5.4.1**) y vienen determinadas, principalmente, por las fuerzas mecánicas que actúan sobre los componentes del sistema de protección externa contra rayos.

Estas fuerzas mecánicas se originan, en menor medida, por las fuerzas electrodinámicas que se producen durante el flujo de la corriente de rayo y, en mayor medida, por fuerzas de presión y tracción (p. ej. por variación de la longitud a causa de la temperatura), por esfuerzos derivados del viento o por carga de nieve.

Los datos sobre la distancia máxima de 1,2 metros entre los soportes de conductores hacen referencia principalmente al acero, que es un material relativamente rígido. En el caso del aluminio, la distancia entre soportes es de 1 metro.

En la norma UNE EN 62305-3 (IEC62305 - 3) se recomiendan las siguientes medidas de montaje para la protección externa contra rayos (**Figuras 5.4.1** y **5.4.2**).

La **figura 5.4.3** muestra la aplicación sobre cubierta plana.

A ser posible, al instalar los derivadores, deberá mantenerse la distancia de separación “s” respecto a ventanas, puertas y otras aberturas.

En las figuras 5.4.3 - 5.4.5 se representan otras medidas importantes de montaje.

El tendido de una toma de tierra alrededor de un edificio (p. j. anillo de tierra), deberá realizarse a una profundidad de >0.5 m y con una distancia respecto al mismo de aproximadamente 1 metro (Figura 5.4.4).

En las entradas a tierra o en las conexiones a la toma de tierra de cimientos (tomas de tierra anulares) deben tenerse en cuenta medidas de protección contra la corrosión, como, por ejemplo, la utilización de cinta anticorrosiva o el uso de varilla con revestimiento de PVC, 0,3 m por encima y por debajo de la entrada en tierra (Figura 5.4.5)

Es posible realizar una conexión segura frente a la corrosión y libre de impacto visual, utilizando un punto fijo de toma de tierra realizado en NIRO para instalar en el hormigón.

Igualmente, en el caso de lugares húmedos, el terminal de tierra debe protegerse contra corrosión en la barra equipotencial.

Las diferentes combinaciones de materiales que se muestran en la tabla 5.4.1 (entre elementos de la instalación captadora, derivadores y con partes de la estructura) han sido experimentadas en la práctica y reflejan que son compatibles desde el punto de vista de la corrosión, incluso en el caso de que existan influencias medioambientales especialmente agresivas.

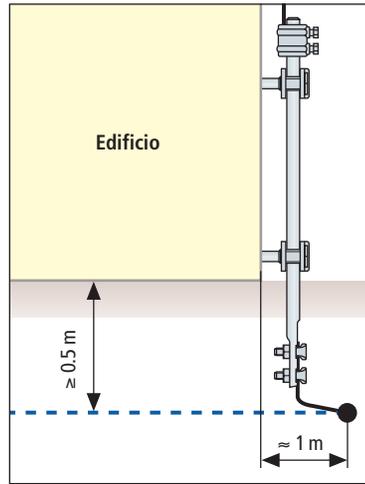


Fig. 5.4.4: Dimensiones para tomas de tierra anulares.

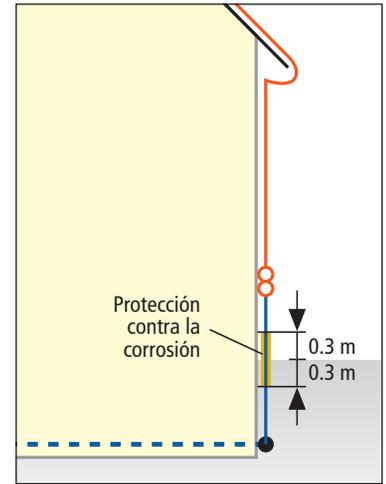


Fig. 5.4.5: Punto expuesto a riesgo de corrosión.

5.4.1 Variación de la longitud en cables metálicos

A menudo, en la práctica, tanto en instalaciones captadoras como en las derivadoras, no se toma en consideración la variación de la longitud de los materiales ocasionada por los cambios de la temperatura.

En las antiguas normas y disposiciones se recomendaba, de forma general, instalar cada 20 metros aproximadamente una pieza de dilatación. Esta disposición se refería a que antiguamente solía utilizarse única y exclusivamente varilla de acero. No se tenían en cuenta los valores más elevados de los coeficientes de dilatación longitudinal del acero inoxidable, el cobre y sobre todo del aluminio.

Hay que considerar que, en la cubierta y sus alrededores, a lo largo del año, pueden producirse variaciones de la temperatura de 100 K. En la tabla 5.4.1.1 se enumeran las variaciones longitudinales que se pro-

	Acero (StZn)	Aluminio	Cobre	NIRO	Titanio	Estaño
Acero (StZn)	si	si	no	si	si	si
Aluminio	si	si	no	si	si	si
Cobre	no	no	si	si	no	si
NIRO	si	si	si	si	si	si
Titanio	si	si	no	si	si	si
Estaño	si	si	si	si	si	si

Tabla 5.4.1: Combinación de materiales.



Material	Coefficiente de dilatación longitudinal α	ΔL
	$\frac{1}{10^6} \frac{1}{K}$	Fórmula de cálculo $\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$ variación de la temperatura asumida en el tejado: $\Delta T = 100 K$
Acero	11,5	$\Delta L = 11,5 \cdot 10^6 \cdot 100 \text{ cm} \cdot 100 = 0,115 \text{ cm} \cdot 1,1 \text{ mm/m}$
Acero inoxid.	16	$\Delta L = 16 \cdot 10^6 \cdot 100 \text{ cm} \cdot 100 = 0,16 \text{ cm} \cdot 1,6 \text{ mm/m}$
Cobre	17	$\Delta L = 17 \cdot 10^6 \cdot 100 \text{ cm} \cdot 100 = 0,17 \text{ cm} \cdot 1,7 \text{ mm/m}$
Aluminio	23,5	$\Delta L = 23,5 \cdot 10^6 \cdot 100 \text{ cm} \cdot 100 = 0,235 \text{ cm} \cdot 2,3 \text{ mm/m}$

Tabla 5.4.1.1: Cálculo de la variación longitudinal Δ de varillas metálicas usadas en protección contra rayos, condicionada por la temperatura.



Fig. 5.4.1.1: Instalación captadora. Compensación de dilatación mediante bridas de puenteo.

Material	Superficie de fijación para conductores captadores o derivadores		Distancia de las piezas de dilatación en m
	blanda, p. ej. tejado plano con recubrimiento bituminoso o de plástico	dura, p. ej. ladrillos o mampostería	
Acero	X		≈ 15
		X	≤ 20
Acero inoxidable/Cobre	X		≈ 10
		X	≤ 15
Aluminio	X	X	≤ 10
Utilización de piezas de dilatación cuando no se realiza ninguna otra medida de compensación de longitud			

Tabla 5.4.1.2: Piezas de dilatación para protección contra rayos. Recomendaciones de uso.

ducen en los distintos materiales. Es de destacar que la variación longitudinal debido a la temperatura entre el acero y el aluminio difiere aproximadamente en un factor 2.

Los criterios para la utilización de piezas de dilatación se exponen en la **tabla 5.4.1.2**. Al utilizar piezas de dilatación hay que tener en cuenta que se tiene que tratar de una compensación flexible de la longitud. La flexión en forma de "S" de la varilla metálica no es suficiente, ya que estas "piezas de dilatación" realizadas manualmente no son suficientemente flexibles.

Al conectar instalaciones captadoras, por ejemplo a petos metálicos continuos en los bordes del tejado, debería recurrirse a una conexión flexible mediante piezas o medidas adecuadas. Si no se realiza esta conexión flexible, existe el riesgo de que el revestimiento metálico de los petos del tejado resulte dañado a causa de la variación de longitud de los materiales debido a los cambios de temperatura.

Para compensar dicha variación, es necesario instalar las correspondientes piezas de dilatación. (**Figura 5.4.1.1**).

5.4.2 Protección externa contra rayos para un edificio industrial y para una vivienda

La **figura 5.4.2.1a** muestra el diseño de la protección externa contra rayos para una vivienda con garaje incorporado, y la **figura 5.4.2.1b**, para un edificio industrial.

Las **figuras 5.4.2.1a** y **5.4.2.1b** y las **tablas 5.4.2.1a** y **b** muestran ejemplos de los componentes utilizados.

No se han tomado en consideración las medidas necesarias de protección interior contra rayos, como p. ej. la equipotencialidad de protección contra el rayo y la protección contra sobretensiones (Ver al respecto el capítulo 6.)

Particularmente centramos nuestra atención en los programas de soporte de DEHN, DEHNSnap y DEHN-grip.

La generación de soportes de plástico DEHNSnap (**Figura 5.4.2.2**) es apropiada como un componente básico (para pared y tejado). El conductor se fija al

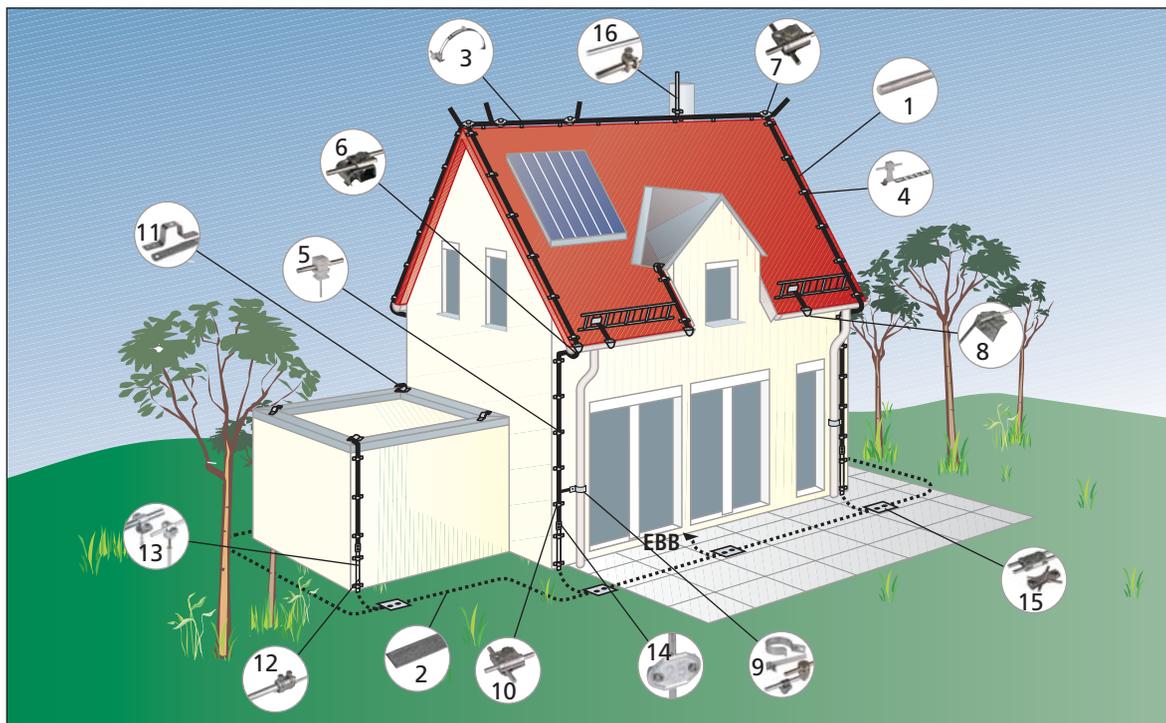


Fig. 5.4.2.1a: Protección externa contra rayos de una vivienda unifamiliar.

Pos.	Artículo - Descripción	Art.Nr.	Pos.	Artículo - Descripción	Art.Nr.
1	Varilla diámetro 8 mm. - DEHNALU semi-duro o blando.	840 008 840 018	7	Borna MV Borna MV	St/tZn 390 050 StSt 390 059
2	Pletina de acero 30 x 3,5 mm. Varilla de 10 mm. de diámetro	St/tZn 810 335 StSt V4A 860 010	8	Borna para rejilla para la nieve	St/tZn 343 000
3	Soporte de conductor de tejado para caballetes	St/tZn 202 020 StSt 204 109 StSt 204 249 StSt 204 269 StSt 206 109 StSt 206 239	9	Abrazadera para canalones ajustable ø 60 - 150 mm Abrazadera para canalones para cualquier sección Conector KS para conexión de conductores Conector KS	423 020 423 200 301 000 StSt 301 009
4	Soporte de conductor para cubierta	StSt 204 149 StSt 204 179 St/tZn 202 010 St/tZn 202 050 St/tZn 202 080 StSt 206 209 St/tZn 206 309	10	Borna MV	390 051
5	DEHNsnap DEHNgrip Soporte de conductor con taco y arandela Soporte de conductor para aislamiento térmico	204 006 207 009 275 160 273 740	11	Brida de puenteo Banda de puenteo	Aluminio 377 006 Aluminio 377 015
6	Borna para canalones de tejado Borna atornillada para canalones de tejado de	St/tZn 339 050 StSt 339 059 St/tZn 339 100 StSt 339 109	12	Barra de penetración diámetro 16 mm Completa	480 150 480 175
			13	Soporte de barra con taco y arandela Soporte de barra para aislamiento térmico	275 260 273 730
			14	Placa numerada para identificación de puntos de separación	480 006 480 005
			15	Conector paralelo Cruceta Bornas SV Bornas SV	305 000 306 020 319 201 St/tZn 308 220 StSt 308 229
			16	Puntas captadoras con orejeta soldada Puntas captadoras con extremos redondeados Conexión a punta	100 075 483 075 380 020

Tabla 5.4.2.1a: Componentes para la protección externa contra rayos de una vivienda unifamiliar.

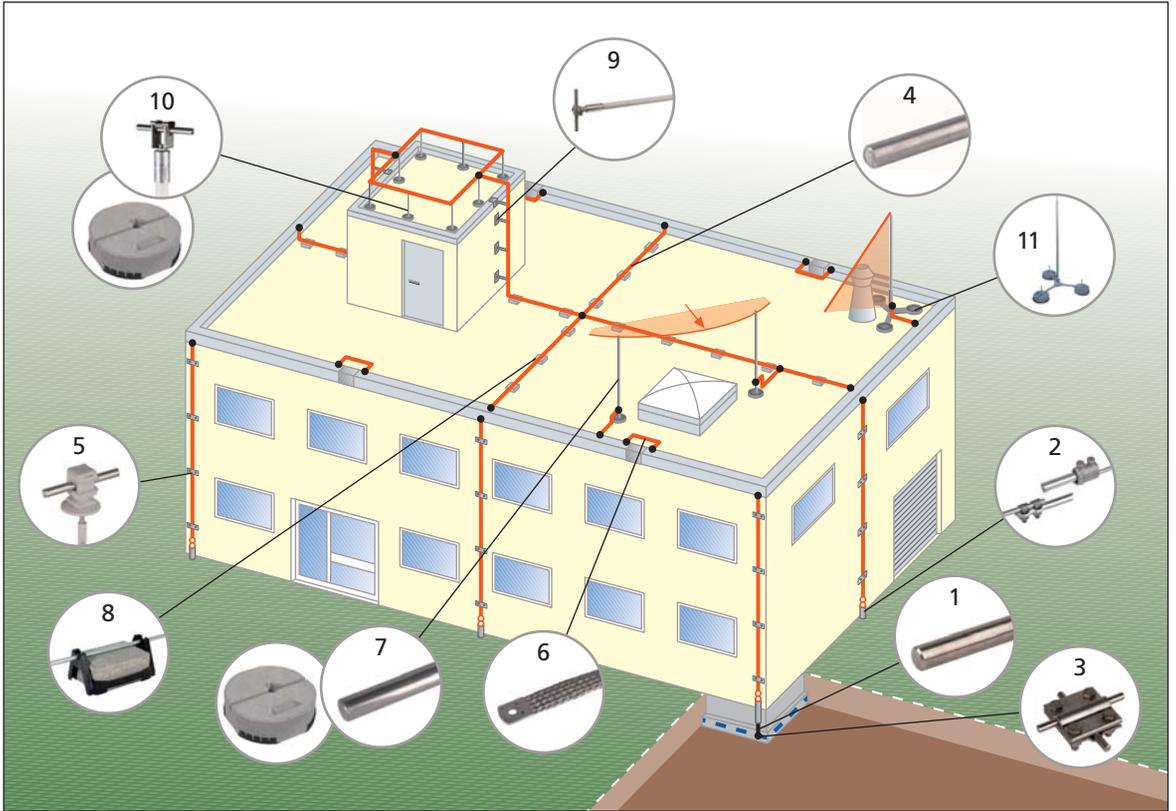


Fig. 5.4.2.1b: Protección externa contra rayos de un edificio industrial.

Pos.	Artículo - Descripción	Art.Nr.	Pos.	Artículo - Descripción	Art.Nr.
1	Varilla de acero inoxidable diámetro 10 mm. StSt	860 010	8	Soporte de conductor de tejado para cubiertas planas	253 050
2	Juego de barra de penetración en tierra St/tZn	480 150	9	Soporte distanciador DEHNiso ZDC-St/tZn	106 100
3	Cruceta StSt	319 209	10	Anillo elevado con zócalo de hormigón con placa protectora y distanciador StSt	102 340 106 160
4	Varilla DEHNALU® AlMgSi	840 008	11	Punta captadora aislada	105 500
5	Soporte de conductores DEHNSnap®	204 120			
6	Banda de puenteado Al	377 015			
7	Punta captadora AlMgSi	104 200			
	Con zócalo de hormigón con placa protectora	120 340			

Tabla 5.4.2.1b: Componentes para la protección externa contra rayos de un edificio industrial.

soporte simplemente basculando la caperuza del mismo. La técnica especial de enclavamiento no ejerce ningún tipo de esfuerzo mecánico sobre el cierre.

DEHNgrip (Figura 5.4.2.2) es un soporte de acero inoxidable sin tornillos que se añadió al programa de productos para complementar al sistema DEHNSnap de soportes de plástico.

Este sistema de soporte sin tornillos es apropiado para utilizarse como soporte de conductores de diámetro 8 mm. tanto en el tejado como en la pared. Basta sencillamente con presionar sobre el soporte y el conductor queda fijado en el DEHNgrip (Figura 5.4.2.2).

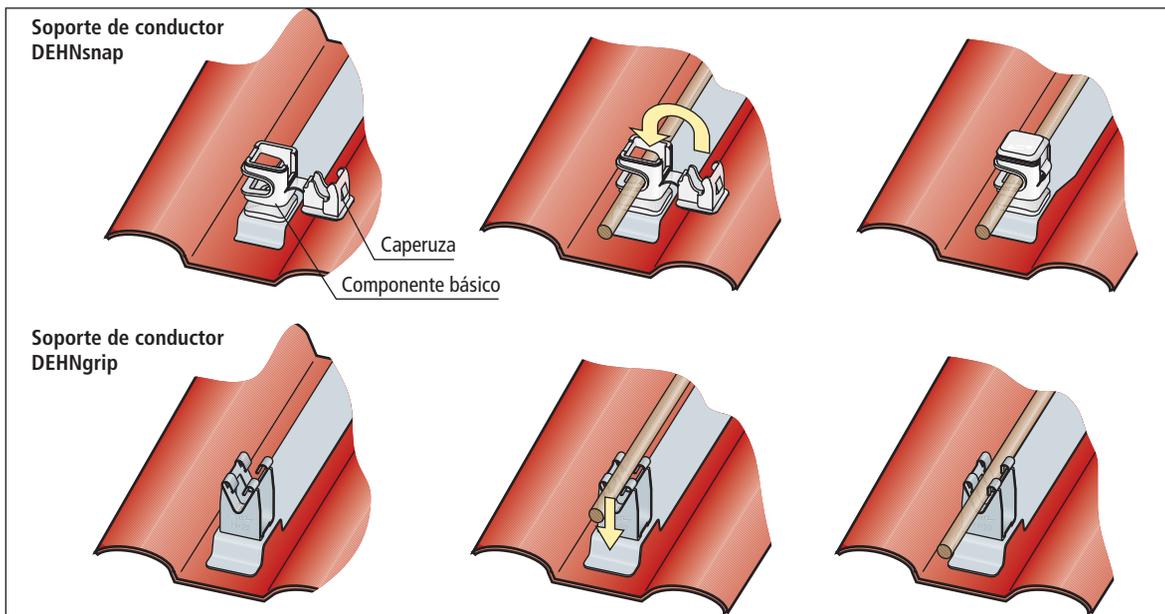


Fig. 5.4.2.2: Soportes de conductor DEHNSnap y DEHNgrip.

5.4.3 Consejos para el montaje de soportes de conductor de tejado

Tejas del caballete:

Ajustar los soportes de conductor de tejado según las dimensiones de las tejas del caballete mediante tornillo de ajuste (Figura 5.4.3.1).

El guiado del conductor puede, además, ajustarse en cualquier momento mediante soportes de conductores, desde el centro superior hasta el lateral inferior.

(Posibilidad de aflojar el soporte de conductor bien

girando el soporte o bien soltando el tornillo de sujeción).

⇒ Soporte de conductor de tejado SPANNsnap con soporte de conductor de plástico DEHNSnap o con soporte de conductor St/St DEHNgrip (Figura 5.4.3.2).

Tensión permanente mediante muelle tensor de S/tSt.

Margen de tensión universal de 180 - 280 mm. con guiado de conductores ajustable lateralmente, para conductores de diámetro 8 mm.

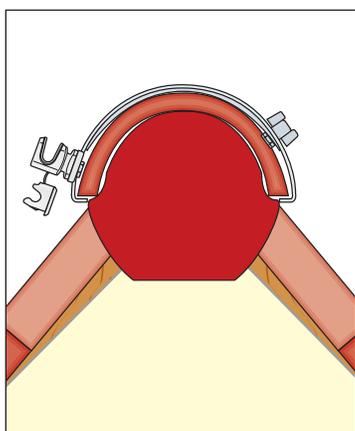


Fig. 5.4.3.1: Soporte de conductor de tejado con DEHNSnap para tejas de caballete.

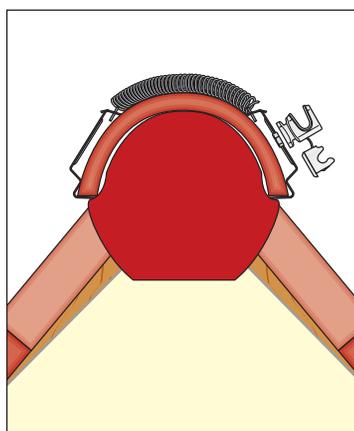


Fig. 5.4.3.2: SPANNsnap con soporte de conductor de plástico DEHNSnap.

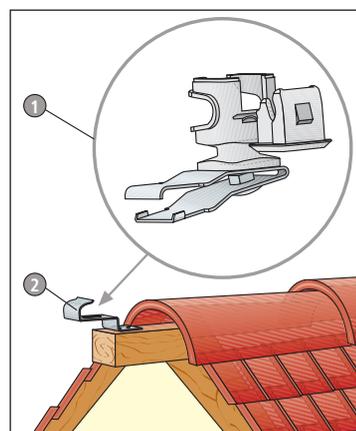


Fig. 5.4.3.3: FIRSTsnap para montaje sobre piezas de caballete ya existentes.

⇒ Soporte de conductor FIRSTsnap con soporte de conductor de plástico DEHNSnap, para colocar sobre abrazaderas de caballete ya existentes, en el caso de caballetes de madera.

El soporte de conductor DEHNSnap (1) (Figura 5.4.3.3) se monta sobre la pieza de caballete existente, (2) en el caso de caballetes de madera y se atornilla a mano (sólo hacer girar el DEHNSnap).

Tejas ranuradas:

El soporte de conductor de tejado UNIsnap con puntal preformado se utiliza para las superficies de tejado. Después de doblarlo a mano, el soporte de conductor se inserta en los listones de tejado. Además, puede clavarse para mayor seguridad (Figura 5.4.3.4).

Tejas planas (Figura 5.4.3.5)

Cubiertas de pizarra:

Cuando se utiliza sobre tejados de pizarra hay que doblar el enganche interior (Figura 5.4.3.6) o bien montar una pieza adicional de apriete (Art.Nr. 204 089).

Tejas con ranuras:

⇒ Soporte de conductor de tejado FLEXIsnap para tejas con reborde, para colocar directamente sobre las ranuras (Figura 5.4.3.7)

El tirante flexible de NIRO se introduce entre las tejas con ranura.

Presionando sobre la teja con ranuras situada en la parte superior, se conforma el tirante flexible de StSt y se ajusta al reborde. De este modo, queda fijo por debajo de la teja.

Está prevista una muesca para la fijación a la ventana en su caso.

Además el puntal del soporte puede clavarse.

⇒ Soporte conductor de tejado con pletina preformada para suspender en la ranura inferior. (Figura 5.4.3.8).

Tejas planas:

El soporte de conductor DEHNSnap (1) (Figura 5.4.3.9) se introduce con su dispositivo de apriete (2) entre las tejas planas (3) o entre las placas y se atornilla a mano (girar solamente el DEHNSnap).

Construcciones solapadas

En este caso (3) (p. ej. planchas y pizarras naturales) el soporte de conductor DEHNSnap con brida de apriete (1) (Figura 5.4.3.10) (2), se introduce lateralmente y, estando el soporte abierto, se fija con ayuda de un destornillador. El DEHNSnap, puede girarse de tal manera que permite un guiado vertical a plomo del conductor.

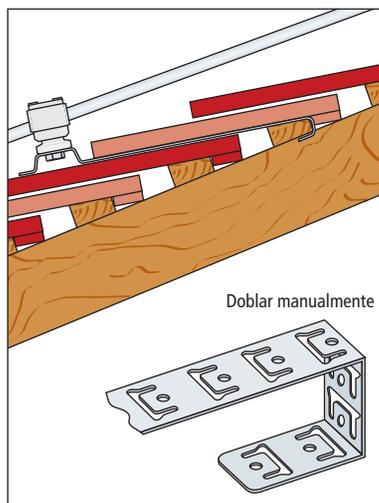


Fig. 5.4.3.4: Soporte de conductor de tejado UNIsnap con puntal preformado. Utilización sobre tejas ranuradas.

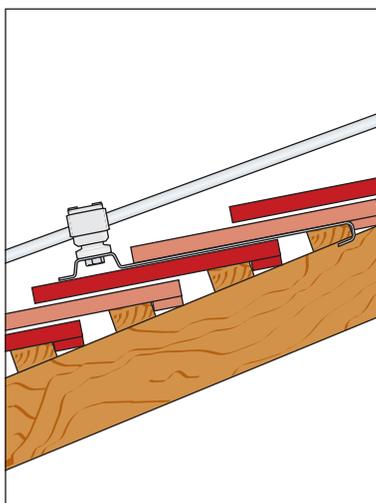


Fig. 5.4.3.5: Soporte de conductor de tejado UNIsnap con puntal preformado. Utilización sobre tejas planas.

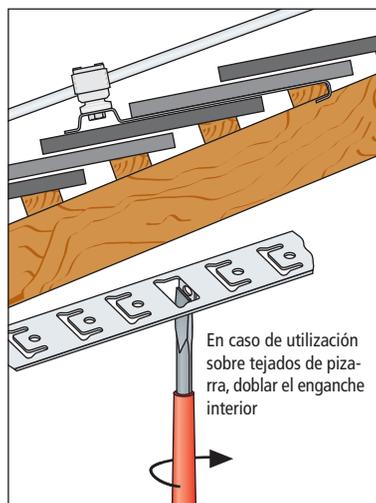


Fig. 5.4.3.6: Soporte de conductor de tejado UNIsnap con puntal preformado. Utilización sobre tejados de pizarra.

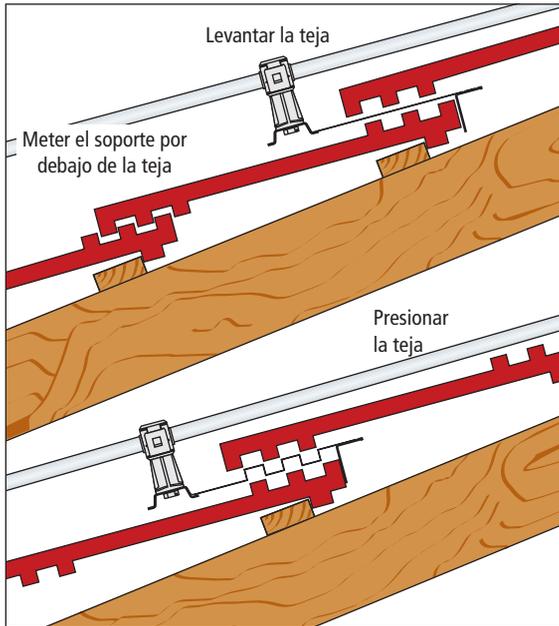


Fig. 5.4.3.7: Soporte de conductor FLEXIsnap para adaptación directa a la junta.

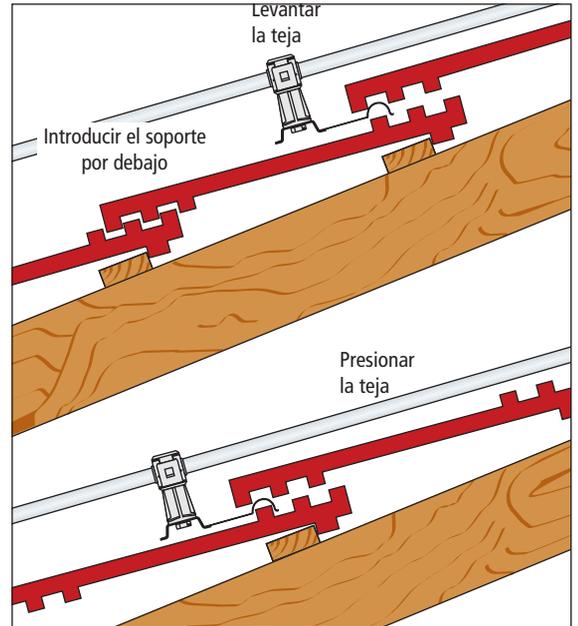


Fig. 5.4.3.8: Soporte de conductor de tejado para instalar en el reborde inferior en cubiertas de teja con ranuras.

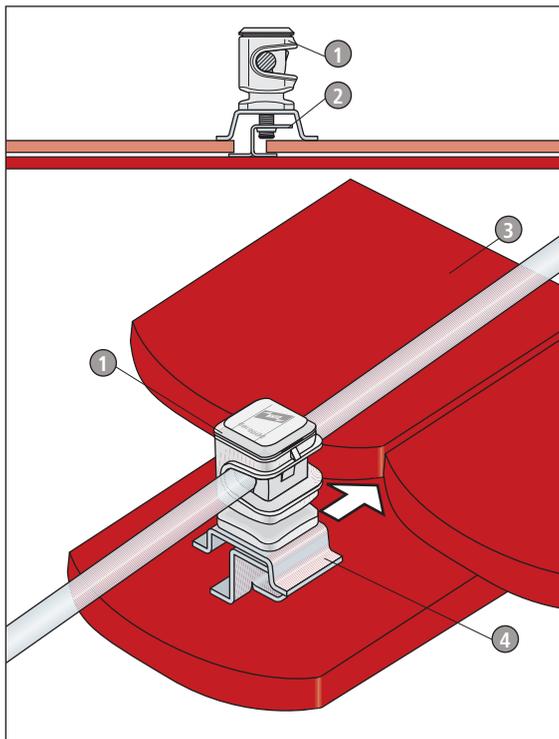


Fig. 5.4.3.9: ZIEGELsnap, para sujeción entre tejas o planchas planas.

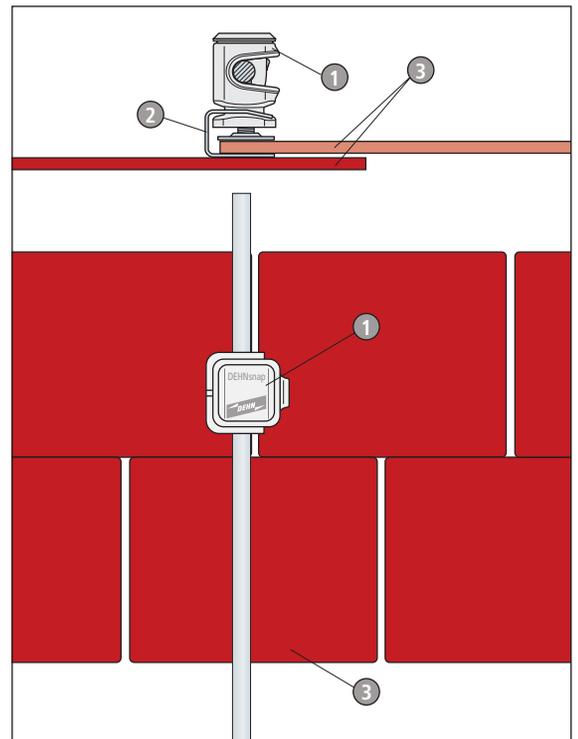


Fig. 5.4.3.10: Soporte de conductor de tejado PLATTENsnap para construcciones solapadas.

5.5 Instalaciones de toma de tierra

Las normas IEC 62305-3, EN 62305-3 y UNE EN 62.305-3 "Protección contra rayos – Daño físico a estructuras y riesgo humano", HD 637 S1 "Instalaciones de energía superiores a 1 kV", IEC 60050-826 "Vocabulario Electrotécnico Internacional Parte 826: Instalaciones eléctricas" e IEC 60363-5-54 "Instalaciones Eléctricas de Edificios – Parte 5-54", contienen una explicación detallada de los conceptos utilizados en la técnica de toma de tierra. En Alemania, además, se aplica la norma DIN 18014 para tomas de tierra de cimientos. A continuación, se expone la terminología utilizada y su significado para facilitar la comprensión de los sistemas que se describen más adelante.

Terminología

Tierra

Es la parte del terreno cuyo potencial eléctrico en cada punto, se pone igual a cero. La palabra "tierra" es también el concepto utilizado, tanto para definir a la tierra como lugar concreto como el material del

que se compone, p. ej., las diversas clase de tierra humus (mantillo), arcilla, arena, grava y rocas.

Tierra de referencia

(tierra neutra) es la parte de la tierra, especialmente de la superficie, fuera de la zona de influencia de una instalación de toma de tierra, en la que entre dos puntos cualquiera no se producen tensiones perceptibles originadas por la corriente en la toma de tierra (Figura 5.5.1).

Toma de tierra

Es uno o varios componentes conductores que se encuentran en contacto con el terreno y que constituyen una conexión eléctrica (se incluyen también las tomas de tierra de cimientos).

Instalación de toma de tierra

Es un conjunto de electrodos de tierra localizados en un emplazamiento limitado y unidos eléctricamente entre sí, así como elementos metálicos que puedan actuar como electrodos de dispersión (p. ej. armados de cimientos de hormigón, revestimientos o armaduras metálicas de cables en contacto con tierra, etc.).

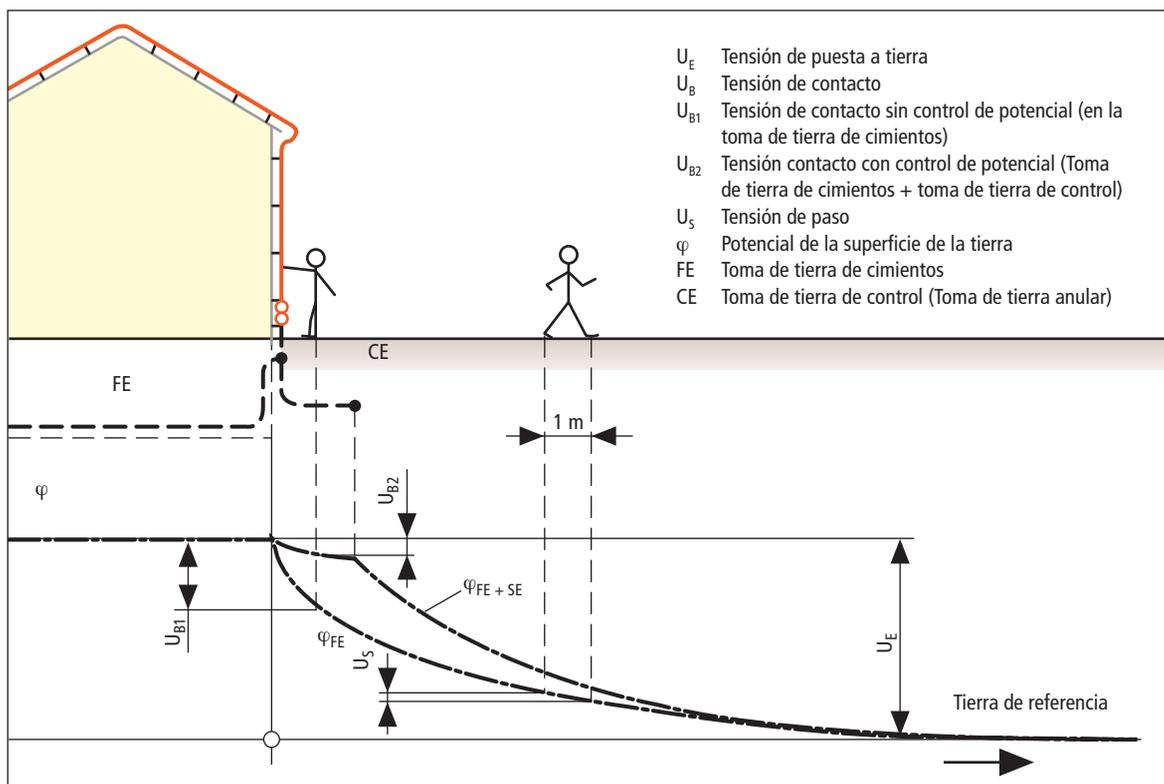


Fig. 5.5.1: Potencial de la superficie del terreno y tensiones en la toma de tierra de cimientos FE y tomas de tierra de control cuando están atravesados por la corriente.

Conductor de tierra

Es un conductor que une una parte de la instalación que se ha de poner a tierra con una toma de tierra y que está tendido sobre el terreno o aislado en el mismo.

Tierra de protección contra rayos

Es la toma de tierra de una instalación de protección contra rayos diseñada e instalada para derivar a tierra una corriente de rayo.

Seguidamente se describen diversos tipos de tomas de tierra y su clasificación según situación, forma y perfil.

Clasificación según situación

Tomas de tierra superficiales

Es una toma de tierra que, por lo general, se introduce a poca profundidad en el terreno, aproximadamente hasta 1 m. Se puede realizar en material conductor redondo o pletinas, pudiendo disponerse en forma radial, en forma anular, malla o combinación de varias de estas formas.

Tomas de tierra de profundidad

Es una toma de tierra que, por lo general, se introduce verticalmente en tierra a mayor profundidad que la anterior (picas de tierra). Como material puede utilizarse conductor redondo o de perfil.

Toma de tierra de cimientos

Se compone de uno o varios conductores que están embebidos en el hormigón de la cimentación y que se encuentran en contacto con el terreno en una gran superficie.

Toma de tierra de control

Es una toma de tierra que por su forma y disposición, está más destinada al control del potencial que al mantenimiento de una determinada resistencia de propagación.

Toma de tierra circular

Toma de tierra que, por debajo o sobre la superficie de la tierra, configura un anillo cerrado alrededor del edificio a proteger.

Toma de tierra natural

Es aquel elemento o componente metálico que se encuentra en contacto directo con tierra o con el agua, o que está dentro del hormigón, y cuyo objetivo o finalidad original no es el de actuar como parte del sistema de puesta a tierra pero que actúa como

tal (armados de cimientos de hormigón, tuberías metálicas, etc.).

Clasificación según forma y perfil.

Se puede diferenciar entre:

Tomas de tierra realizadas con conductor plano (pletinas); tomas de tierra realizadas con conductor de perfil en cruz y tomas de tierra realizadas con conductor redondo (varillas).

Clases de resistencia

Resistencia específica de tierra

ρ_E es la resistencia eléctrica específica de la tierra. Se indica en Ωm y representa la resistencia de un cubo de tierra de 1 m de lado, entre dos planos opuestos de dicho cubo.

Resistencia de propagación

R_A de una toma de tierra es la resistencia de la tierra entre la toma de tierra y la tierra de referencia. R_A es prácticamente una resistencia efectiva (óhmica).

Resistencia de choque de toma de tierra

R_{st} es la resistencia efectiva existente entre un punto de la instalación de toma de tierra y la tierra de referencia al producirse el paso de la corriente de rayo.

Tensiones en instalaciones de toma de tierra atravesadas por la corriente, control de potencial

Tensión de puesta de tierra

U_E es la tensión existente entre una instalación de toma de tierra y la tierra de referencia (Figura 5.5.1).

Potencial de la superficie de tierra

φ es la tensión existente entre un punto de la superficie de tierra y la tierra de referencia (Figura 5.5.1).

Tensión de contacto

U_B es la parte del potencial de la puesta a tierra que puede transmitirse a las personas (Figura 5.5.1), considerándose como vía para la corriente por el cuerpo humano la que va desde la mano hasta el pie (distancia horizontal de la pieza de contacto aproximadamente 1 m) o bien de una mano a otra.

Tensión de paso

U_S es la parte del potencial de la puesta a tierra que puede afectar a las personas al dar un paso de 1 metro de longitud siendo la vía de corriente la que va de un pie al otro pie a través del cuerpo (Figura 5.5.1).

Control de potencial

Es la posibilidad de influir sobre el potencial de tierra, en especial sobre el potencial de la superficie de la tierra, a través de tomas de tierra de control (**Figura 5.5.1**).

Compensación de potencial

Es la conexión de instalaciones metálicas y de sistemas eléctricos con la instalación de protección contra rayos a través de conductores, descargadores de corriente de rayo o de vías de chispas de separación.

Resistencia de propagación / Resistencia específica de toma de tierra

Resistencia de propagación R_A

La derivación de la corriente de rayo a tierra a través del sistema de puesta a tierra no se produce en un solo punto, sino que se pone bajo tensión una determinada zona alrededor de la toma de tierra. La forma de la toma de tierra y la forma del tendido tienen que elegirse de tal manera que las tensiones que actúan sobre la superficie de la tierra (tensiones de contacto y tensiones de paso) no adquieran valores peligrosos. Como mejor puede explicarse en qué consiste la resistencia de propagación R_A de una toma de tierra es con la ayuda de una bola de metal enterrada en el suelo.

Si la bola de metal está enterrada a suficiente profundidad, la corriente fluye de manera regular por toda la superficie de la tierra que la rodea de forma radial. Ver **figura 5.5.2a**. En comparación con ello, en la **figura 5.5.2b** se muestra el caso de una bola enterrada por debajo de la superficie de la tierra a poca profundidad. Los círculos concéntricos alrededor de la superficie de la bola representan superficies de nivel de tensión constante. La resistencia de propagación R_A se compone de la conexión en serie de las resistencias parciales de cada una de las capas que rodean la bola. La resistencia de una de estas capas de bola se calcula según la ecuación siguiente:

$$R = \rho_E \cdot \frac{l}{q}$$

siendo ρ_E la resistencia específica de la tierra considerado como un suelo homogéneo, espesor de una capa de bola supuesta.

y

q superficie media de esta capa de bola.

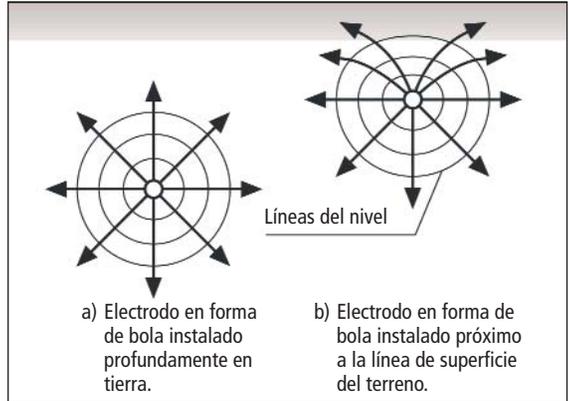


Fig. 5.5.2: Distribución de corriente de una toma de tierra en forma de bola.

Supongamos una bola de metal de 20 cm de diámetro enterrada a 3 m de profundidad, con una resistencia específica de suelo de 200 Ωm .

Al calcular el incremento de la resistencia para las diferentes capas de la esfera en función de la distancia al centro de la bola, se obtiene una curva como la que se muestra en la **figura 5.5.3**.

La resistencia de propagación ρ_A para la toma de tierra en forma de bola se calcula como sigue:

$$R_A = \frac{\rho_E \cdot 100}{2\pi \cdot r_K} \cdot \frac{1 + \frac{r_K}{2t}}{2}$$

siendo:

ρ_E Resistencia específica de la tierra en Ωm

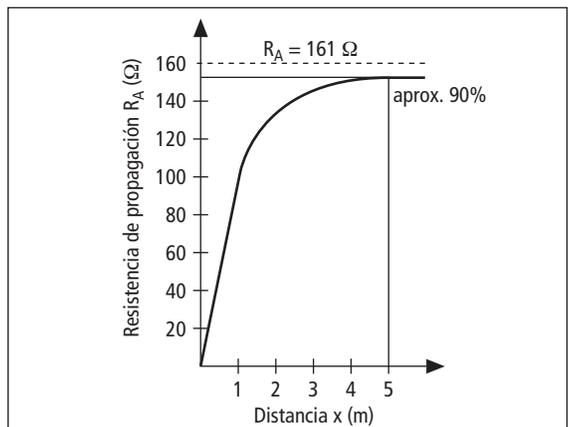


Fig. 5.5.3: Resistencia de propagación R_A de una toma de tierra en forma de bola con diámetro 20 cm, a 3 m de profundidad, siendo $\rho_E = 200 \Omega\text{m}$ dependiente de la distancia con respecto al centro de la bola.

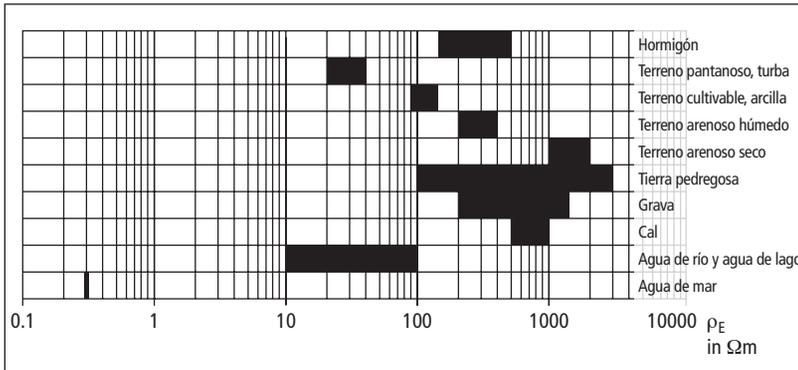


Fig. 5.5.4: Resistencia específica de tierra ρ_E de diferentes tipos de suelo.

t Profundidad de enterramiento en cm.

r_K Radio de la toma de tierra en forma de bola en cm.

En base a esta fórmula se obtiene una resistencia de propagación $R_A = 161 \Omega$, para la toma de tierra en forma de bola.

De la curva expuesta en la **figura 5.5.3** se deduce que la mayor parte de la resistencia de propagación total tiene lugar en la zonas más próximas a la toma de tierra. Así, por ejemplo, a 5 metros de distancia del centro de la bola, se ha alcanzado ya el 90% del total de la resistencia de propagación R_A .

Resistencia específica de tierra ρ_E

La resistencia específica ρ_E , determinante para la magnitud de la resistencia de propagación R_A de una toma de tierra, depende de la composición del suelo, de su humedad y de la temperatura. Puede oscilar entre límites muy amplios.

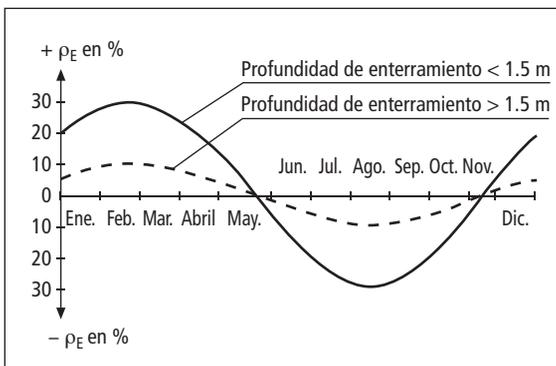


Fig. 5.5.5: Resistencia específica de tierra ρ_E dependiendo de la época del año, sin que influyan sobre ella las precipitaciones (profundidad de enterramiento de la toma de tierra $< 1,5$ m).

Valores para diferentes tipos de suelo

En la **figura 5.5.4** se exponen las amplitudes en las que puede oscilar la resistencia específica del terreno ρ_E para diferentes tipos de suelos.

Fluctuaciones dependientes de la época del año

Numerosas mediciones han demostrado que la resistencia específica de tierra varía de manera notable en función de la profundidad de enterramiento de la toma de tierra. Debido al coeficiente negativo de temperatura del suelo ($\alpha = 0,02 \dots 0,004$) las resistencias específicas de tierra alcanzan un valor máximo en invierno y un valor mínimo en verano. Se recomienda, por lo tanto, calcular los valores de medición de las tomas de tierra de acuerdo con los valores máximos que se pueden esperar, ya que los valores admisibles no deben ser superados ni siquiera bajo las condiciones más desfavorables (temperaturas mínimas). La evolución de la resistencia específica de tierra ρ_E dependiendo de la época del año (temperatura del suelo) puede representarse con bastante aproximación mediante una curva sinusoidal, que tiene su máximo valor aproximadamente a mediados de febrero y el mínimo aproximadamente a mediados de agosto. Asimismo, ensayos realizados han demostrado que, en el caso de tomas de tierra que no están enterradas a más de 1,5 metros de profundidad, las desviaciones máximas de la resistencia

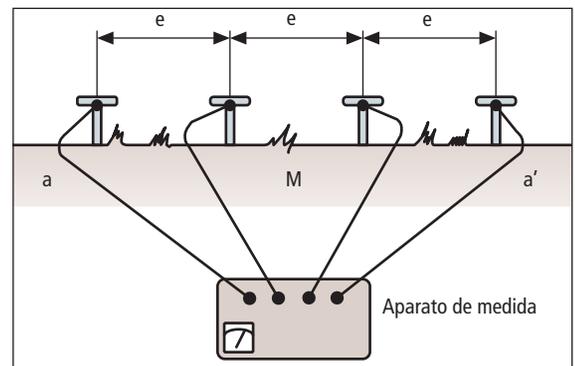


Fig. 5.5.6: Determinación de la resistencia específica de tierra $-E$ con un puente de medida de cuatro bornas según el método WENNER.

específica de tierra respecto a los valores medios llegaban a ser del $\pm 30\%$. (Figura 5.5.5.5).

En tomas de tierra enterradas a mayor profundidad (especialmente en las tomas de tierra de profundidad) la variación supone solamente un $\pm 10\%$.

La resistencia de propagación R_A de una instalación de toma de tierra puede calcularse sobre la base de la curva senoide de la resistencia específica de tierra, medida en un día concreto, para obtener los valores máximos que se pueden esperar (ver figura 5.5.5).

Medición

Para determinar la resistencia específica de tierra ρ_E , se utiliza un puente de medida de resistencia contra tierra con 4 bornas, que trabaja según el método cero.

La figura 5.5.6 reproduce la disposición del dispositivo de medida para este método denominado WENNER. La medición se realiza desde un punto medio

fijo M, que se mantiene para todas las mediciones que se hagan con posterioridad. A lo largo de una línea recta en tierra a-a', se introducen cuatro sondas de medida en el terreno (picas de tierra de 30 ... 50 cm de longitud). Partiendo de la resistencia R obtenida se calcula la resistencia específica de la tierra ρ_E para esa zona del terreno:

$$\rho_E = 2\pi \cdot e \cdot R$$

siendo:

R Resistencia medida en Ω

E Distancia entre sondas en metros.

ρ_E Resistencia específica media de la tierra en Ωm hasta una profundidad correspondiente a la distancia entre las sondas e.

Incrementando la distancia de las sondas "e" y reajustando el punto de medida de toma de tierra, puede determinarse la curva correspondiente a la resis-

Toma de tierra	Fórmula empírica	Magnitud auxiliar
Toma de tierra superficial (Toma de tierra radial)	$R_A = \frac{2 \cdot \rho_E}{l}$	-
Toma de tierra de profundidad (Pica de tierra)	$R_A = \frac{\rho_E}{l}$	-
Toma de tierra anular	$R_A = \frac{2 \cdot \rho_E}{3 \cdot d}$	$d = 1,13 \cdot \sqrt[2]{A}$
Malla de toma de tierra	$R_A = \frac{\rho_E}{2 \cdot d}$	$d = 1,13 \cdot \sqrt[2]{A}$
Toma de tierra en placas	$R_A = \frac{\rho_E}{4,5 \cdot a}$	-
Toma de tierra semiesférica/ Toma de tierra de cimientos	$R_A = \frac{\rho_E}{\pi \cdot d}$	$d = 1,57 \cdot \sqrt[2]{V}$
<p>R_A Resistencia de propagación (W)</p> <p>ρ_E Resistencia específica de tierra (Wm)</p> <p>l Longitud de la toma de tierra (m)</p> <p>d Diámetro de una toma de tierra anular, de la superficie circular equivalente o de una toma de tierra semianular (m)</p> <p>A Superficie (m²) de la superficie rodeada por una toma de tierra anular o por una malla de toma de tierra</p> <p>a Longitud de los cantos (m) de una placa de toma de tierra cuadrada. En placas rectangulares deberá aplicarse $=\sqrt{b \cdot c}$, siendo b y c los lados del rectángulo.</p> <p>V Contenido (m³) de un cimiento único.</p>		

Tabla 5.5.1: Fórmulas de cálculo de la resistencia de propagación R_A para diferentes tomas de tierra.

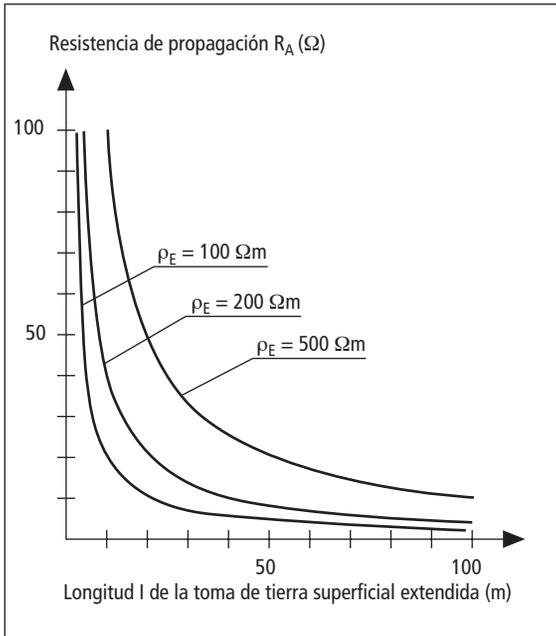


Fig. 5.5.7: Resistencia de propagación R_A en función de la longitud l de la toma de tierra superficial con diferentes resistencias específicas de tierra ρ_E .

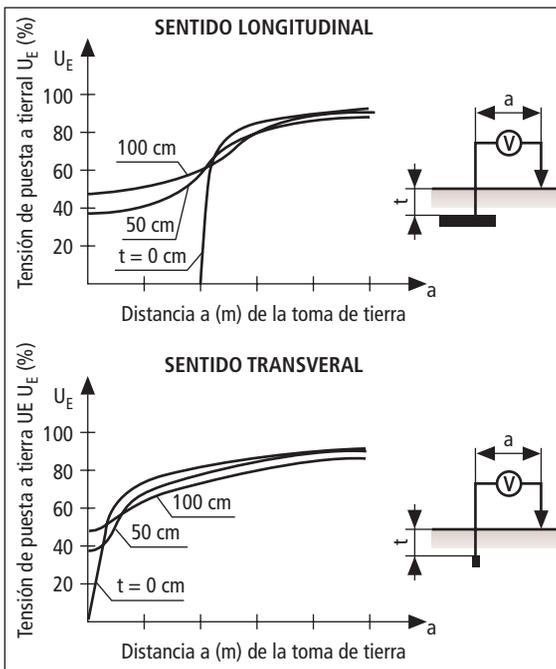


Fig. 5.5.8: Tensión de toma de tierra U_E entre el conductor de tierra y la superficie del terreno en función de la distancia existente hasta la toma de tierra, en una toma de tierra de fleje de 8 m de longitud a diferentes profundidades.

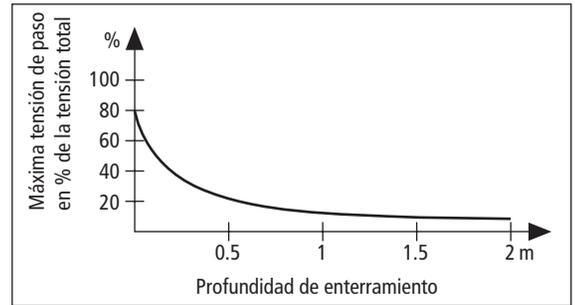


Fig. 5.5.9: Máxima tensión de paso U_S en función de la profundidad de enterramiento para una toma de tierra de fleje extendida.

tencia específica de tierra ρ_E en función de la profundidad.

Cálculo de las resistencias de propagación

En la tabla 5.5.1 se han expuesto las fórmulas para el cálculo de las resistencias de propagación para los tipos de terreno más usuales. En la práctica, estas fórmulas empíricas de cálculo son más que suficientes. Las fórmulas de cálculo exactas pueden encontrarse en los apartados siguientes.

Tomas de tierra superficiales extendidas

Las tomas de tierra superficiales, por lo general, se entierran horizontalmente en el suelo a 0,5... 1 metro de profundidad. Como la capa de terreno situada por encima de la toma de tierra se seca en verano y se congela en invierno, la resistencia de propagación R_A , para este tipo de tomas de tierra superficiales, se calcula como si estuviera situada en la superficie del terreno:

$$R_A = \frac{\rho_E}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{r}$$

siendo:

R_A Resistencia de propagación de una toma de tierra superficial extendida en Ω

ρ_E Resistencia específica de tierra en Ωm

l Longitud de la toma de tierra superficial en m

r Cuarta parte de la anchura del fleje de acero en metros o diámetro del conductor redondo en m

La **figura 5.5.7** muestra cómo puede calcularse la resistencia de propagación R_A en función de la longitud de la toma de tierra.

En la **figura 5.5.8** se ha representado la tensión de puesta a tierra U_E en sentido longitudinal y transversal para una toma de tierra de fleje de 8 metros de

longitud. En esta figura puede verse claramente la influencia de la profundidad de enterramiento sobre la tensión de puesta a tierra.

En la **figura 5.5.9** se ha reproducido la tensión de pasos U_s en función de la profundidad de enterramiento.

En la práctica suele ser suficiente el cálculo realizado según la fórmula empírica de la **tabla 5.5.1**

$$R_A = \frac{2 \cdot \rho_E}{l}$$

Tomas de tierra de profundidad

La resistencia de propagación R_A de una toma de tierra de profundidad se calcula según la fórmula siguiente:

$$R_A = \frac{\rho_E}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{r}$$

- R_A Resistencia de propagación en Ω
- ρ_E Resistencia específica de tierra en Ωm
- l Longitud de la toma de tierra con picas de profundidad en m
- r Radio de las picas de toma de tierra de profundidad en m.

La resistencia de propagación R_A puede calcularse con la fórmula empírica indicada en la **tabla 5.5.1**:

$$R_A = \frac{\rho_E}{l}$$

En la **figura 5.5.10** se representa la resistencia de propagación R_A en función de la longitud de picas l y de la resistencia específica ρ_E .

Combinación de tomas de tierra

Al introducir varias tomas de tierra de profundidad unas junto a otras, la distancia entre las tomas de tierra debe ser, como mínimo, equivalente a la profundidad de enterramiento. Las distintas tomas de tierra de profundidad tienen que interconectarse entre sí.

Las resistencias de propagación calculadas según las fórmulas y los resultados de las medidas representados en los diagramas, son válidos para corriente continua y corriente alterna de baja frecuencia y presuponiendo una extensión relativamente reducida (algunos cientos de metros) de la toma de tierra. En caso de longitudes superiores, por ejemplo tomas de

tierra superficiales, hay que añadir, a la corriente alterna, una parte inductiva.

Por otra parte, las resistencias de propagación calculadas no tienen validez para corrientes de rayo. En estos casos, la parte inductiva adquiere un papel significativo, especialmente en instalaciones de toma de tierra de gran extensión, ya que puede dar lugar a valores mayores de la resistencia de la toma de tierra de choque.

Prolongando tomas de tierra superficiales o tomas de tierra de profundidad por encima de 30 metros, se alcanza una reducción inapreciable de la resistencia de propagación de choque. Por ello resulta más eficaz la combinación de varias tomas de tierra de menor longitud. En este caso, es preciso tener en cuenta que, debido a la interacción de las tomas de tierra, la resistencia de propagación real total es superior que la resistencia de propagación calculada a base de la suma de la conexión en paralelo de cada una de las distintas resistencias.

Tomas de tierra radiales

Las tomas de tierra radiales dispuesta en forma de cruz, son una solución interesante cuando, en terrenos que son relativamente malos conductores, se han de conseguir resistencias de propagación relativamente bajas y con un coste razonable.

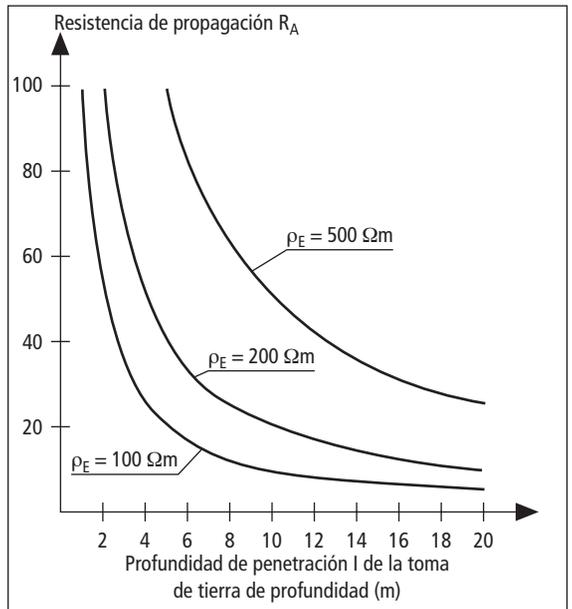


Fig. 5.5.10: Resistencia de propagación R_A de tomas de tierra de profundidad en función de su longitud l con diferentes resistencias específicas de tierra ρ_E .

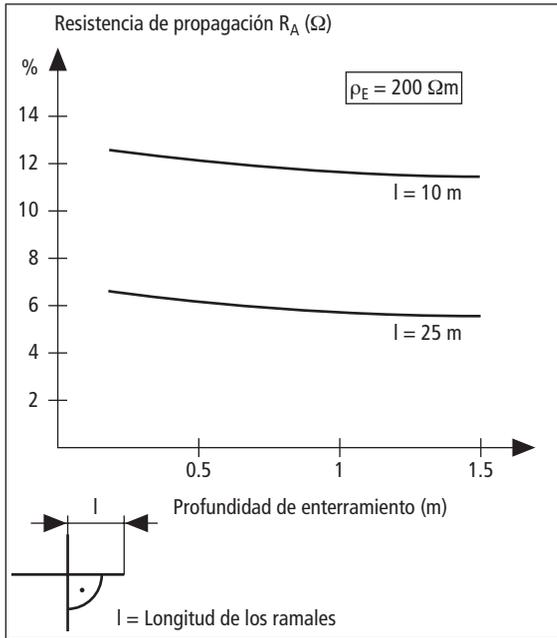


Fig. 5.5.11: Resistencia de propagación R_A de tomas de tierra superficiales en forma de cruz (90°) en función de la profundidad de enterramiento

La resistencia de propagación R_A de una toma de tierra superficial dispuesta en forma de cruz, cuyos ramales están situados en un ángulo de 90° uno respecto al otro, se calcula con la fórmula siguiente:

$$R_A = \frac{\rho_E}{4\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{r} + 1.75$$

siendo:

- R_A Resistencia de propagación de la toma de tierra superficial en forma de cruz, expresado en Ω
- ρ_E Resistencia específica de tierra en Ωm
- l Longitud de los ramales en m
- d Mitad de la anchura del fleje de acero (en metros) o diámetro del conductor redondo (en metros)

Para una aproximación basta, en casos de longitudes de las ramas de la cruz muy grandes ($l > 10$ m), la resistencia de propagación R_A puede calcularse con la longitud total de las ramas según las ecuaciones de la tabla 5.5.1

La figura 5.5.11 muestra la curva de la resistencia de propagación R_A de tomas de tierra superficiales en forma de cruz en función de la profundidad de enterramiento.

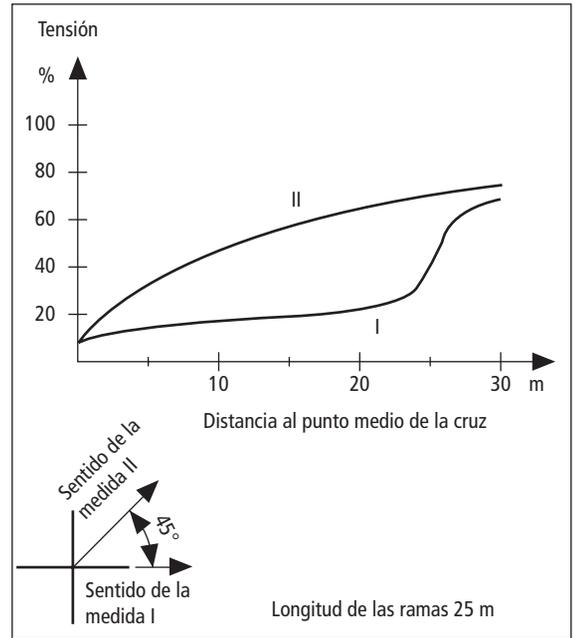


Fig. 5.5.12: Tensión de puesta a tierra U_E entre el conductor de tierra y la superficie del terreno de la toma de tierra superficial en forma radial (90°) en función de la distancia existente al punto de intersección (profundidad de enterramiento 0,5 m).

La figura 5.5.12 muestra las curvas de la tensión de puesta a tierra.

En las tomas de tierra radiales en forma de cruz el ángulo entre los diversos ramales debe ser superior a 60° .

De acuerdo con la figura 5.5.12 para el cálculo de la resistencia de propagación de una malla de toma de tierra se aplica la fórmula siguiente:

$$R_A = \frac{\rho_E}{2 \cdot d}$$

siendo d el diámetro del círculo equivalente a la superficie incluida en la malla de toma de tierra que se calcula como sigue:

En dimensiones rectangulares o poligonales de la malla de toma de tierra:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

Siendo:

- A Superficie de la malla de toma de tierra.



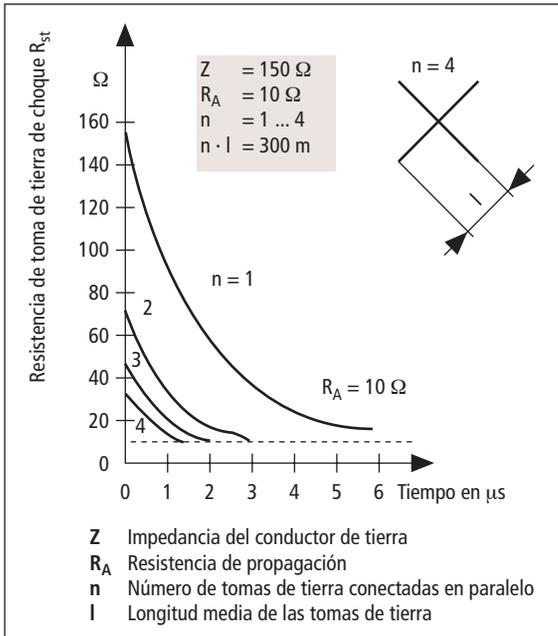


Fig. 5.5.13: Resistencia de toma de tierra de choque R_{st} , de una toma de tierra de superficie con uno y varios ramales de la misma longitud.

Para dimensiones cuadradas (longitud de cantos b):

$$d = 1.1 \cdot b$$

La figura 5.5.13 muestra el desarrollo de la resistencia de propagación de choque de tomas de tierra superficiales, con una y varias ramas, con tensiones de choque rectangulares. Como puede verse en este diagrama resulta más conveniente, para una determinada longitud, tender una toma de tierra de varias ramas en forma radial que una tierra de un solo ramal.

Tomas de tierra de cimientos

La resistencia de propagación de un conductor metálico en cimientos de hormigón puede calcularse aproximadamente utilizando la fórmula para tomas de tierra semiesféricas:

$$R_A = \frac{\rho_E}{\pi \cdot d}$$

siendo aquí "d" el diámetro de la semiesfera de cimientos de superficie equivalente.

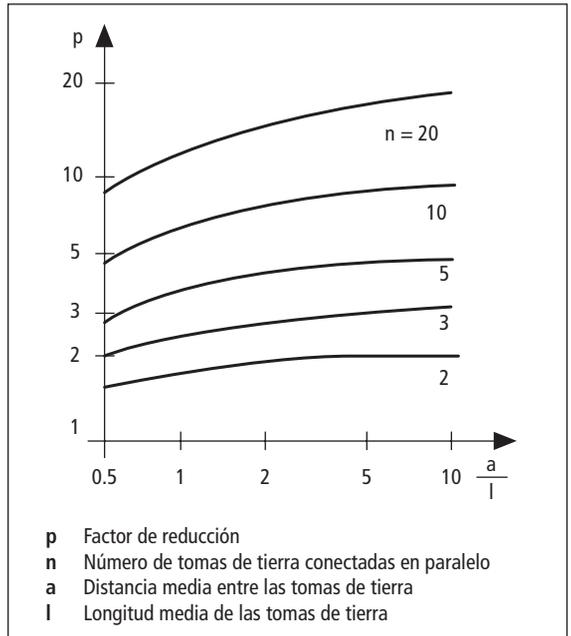


Fig. 5.5.14: Factor de reducción p para el cálculo de la resistencia total de propagación R_A de tomas de tierra de profundidad conectadas en paralelo.

$$d = 1.57 \cdot \sqrt[3]{V}$$

V = volumen del cimiento.

Al efectuar el cálculo de la resistencia de propagación, hay que tener en cuenta que la toma de tierra de cimientos solamente puede ser efectiva si el cuerpo del hormigón se encuentra en contacto directo con una amplia superficie de terreno. Los recubrimientos hidrófugos, aislantes, incrementan considerablemente la resistencia de propagación o incluso aíslan eléctricamente la toma de tierra de cimientos (Ver 5.5.2).

Tomas de tierra de profundidad conectadas en paralelo

Para mantener dentro de los límites aceptables las interferencias e interacciones mutuas en caso de tomas de tierra de profundidad conectadas en paralelo, la distancia entre las mismas no deberá ser inferior a la profundidad de introducción de dichas tomas de tierra.

Si las distintas tomas de tierra se encuentran situadas en círculo y son aproximadamente de la misma longi-

tud, la resistencia de propagación puede calcularse como sigue:

$$R_A = \frac{R_{A'}}{p}$$

R_A es la resistencia media de propagación de cada una de las tomas de tierra. El factor de reducción p puede calcularse según la **figura 5.5.14** en función del número de dichas tomas de tierra, de su longitud y de la distancia existente entre las mismas.

Combinación de tomas de tierra superficiales y tomas de tierra de profundidad

Cuando se trata de tomas de tierra de profundidad con una resistencia de propagación suficiente (por ejemplo en capas profundas impregnadas de agua, en suelos de arena...), la toma de tierra de profundidad debe encontrarse lo más cercana posible al objeto que se desea proteger. Si fuera imprescindible una línea conductora larga, resulta muy conveniente tender en paralelo a la misma una toma de tierra en forma radial compuesta de varios ramales, con el fin de reducir la resistencia durante la elevación de la corriente.

A modo de aproximación, la resistencia de propagación de una toma de tierra superficial con picas de tierra puede calcularse como si la toma de tierra superficial estuviera prolongada por la longitud enterrada de la toma de tierra de profundidad.

$$R_A \approx \frac{\rho_E}{l_{flat\ strip} + l_{eath\ rod}}$$

Tomas de tierra anulares

En anillos de toma de tierra de grandes diámetros ($d > 30$ m), la resistencia de propagación se calcula con la fórmula para tomas de tierra superficiales (en cuyo caso para la longitud de la toma de tierra se toma el perímetro del círculo $\pi \cdot d$):

$$R_A = \frac{\rho_E}{\pi^2 \cdot d} \cdot \ln \frac{\pi \cdot d}{r}$$

siendo:

r = radio del conductor redondo o la cuarta parte de la anchura del fleje de acero de la toma de tierra, en metros.

El cálculo de la resistencia de propagación en anillos de toma de tierra que no tienen forma de círculo, se

realiza utilizando el diámetro de un círculo equivalente de la misma superficie:

$$R_A = \frac{2 \cdot \rho_E}{3 \cdot d}$$

$$d = \sqrt{\frac{A \cdot 4}{\pi}}$$

siendo:

A = Superficie rodeada por la toma de tierra anular.

Ejecución

De acuerdo con la normativas, por cada instalación que se desea proteger, se requiere una instalación propia de toma de tierra que, por sí misma, tiene que ser capaz de funcionar plenamente, incluso sin emplear otros elementos metálicos como tuberías de agua o conductores de la instalación eléctrica puestos a tierra. En el caso de la protección contra rayos, el valor de la resistencia de propagación R_A solamente tiene una importancia secundaria. Lo más importante es que la compensación de potencial esté realizada y consecuentemente la corriente de rayo pueda fluir sin peligro por tierra.

El edificio o estructura a proteger se eleva, a través de la corriente de rayo "i" hasta la tensión de puesta a tierra U_E ,

$$U_E = i \cdot R_A + \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{di}{dt}$$

respecto a la tierra de referencia.

El potencial de la superficie del terreno disminuye conforme aumenta la distancia con la toma de tierra (**Figura 5.5.1**).

La caída de tensión inductiva que se produce en la toma de tierra durante el incremento de la corriente de rayo, solamente tiene que ser tomada en consideración en el caso de instalaciones de toma de tierra de grandes dimensiones (p. ej. las tomas de tierra superficiales de gran longitud son necesarias en suelos que son malos conductores). En general, la resistencia de propagación está determinada solamente por la parte óhmica.

En conductores aislados introducidos en el edificio, el potencial de puesta a tierra U_E adquiere su valor total con respecto a los conductores.

Para evitar el riesgo de perforaciones y saltos de chispas, estos conductores aislados se conectan con la instalación de toma de tierra, en el marco de la compensación de potencial para protección contra rayos, a través de vías de chispas de separación o mediante equipos de protección contra sobretensiones en el caso de conductores con tensión (ver catálogo principal DEHN de protección contra sobretensiones UE).

Para mantener lo más bajas posibles las tensiones de paso y contacto, es necesario reducir la resistencia de propagación. La instalación de toma de tierra puede diseñarse como toma de tierra de cimientos, como toma de tierra anular o, en edificios de grandes superficies, también como mallas de toma de tierra, y en casos especiales, como tomas de tierra aisladas.

En Alemania, las tomas de tierra de cimientos deben dimensionarse según DIN 18014.

La toma de tierra de cimientos debe realizarse como anillo cerrado instalado en la base de los muros exteriores de la edificación o en la cimentación de la losa. En el caso de edificaciones de mayores dimensiones, la toma de tierra de cimientos deberá disponer de conexiones transversales, de manera que el tamaño máximo de las retículas no supere los 20 m x 20 m.

La toma de tierra de cimientos tiene que instalarse de tal manera que esté rodeada de hormigón por todas partes. En caso de pletinas o flejes de acero en hormigón no armado, el electrodo de toma de tierra tiene que disponerse de canto.

Hay que efectuar una conexión entre la toma de tierra de cimientos y la barra de compensación de potencial en la zona de acometida del edificio. Según la norma UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3) una toma de tierra de cimientos debe disponer de banderolas o esperas de conexión para la unión de los derivadores o bajantes de la protección externa contra rayos a la instalación de toma de tierra.

Debido al riesgo de corrosión, en el punto de salida de una banderola de conexión deberá preverse, además, una protección suplementaria contra la corrosión (con revestimiento de PVC o mediante utilización de acero inoxidable).

Las armaduras del hormigón de cimientos pueden utilizarse igualmente como toma de tierra, siempre que cuente con las necesarias banderolas de conexión y el armado del hormigón se conecte entre sí por encima de las juntas de dilatación.

Las tomas de tierra superficiales tienen que instalarse, como mínimo, a una profundidad de 0,5 metros.

La resistencia de puesta a tierra de choque de las instalaciones de toma de tierra depende del valor máximo de la corriente de rayo y de la resistencia específica de tierra. Ver a este respecto también la **figura 5.5.13**. La longitud de las tomas de tierra eficaces en caso de corriente de rayo se calcula, de forma aproximada, como sigue:

Tomas de tierra superficiales:

$$l_{\text{eff}} = 0.28 \sqrt{\hat{i} \cdot \rho_E}$$

Tomas de tierra de profundidad:

$$l_{\text{eff}} = 0.2 \sqrt{\hat{i} \cdot \rho_E}$$

Siendo:

- l_{eff} Longitud efectiva de la toma de tierra en metros
- \hat{i} Valor punta de la corriente de rayo en kA
- ρ_E Resistencia específica de tierra en $\Omega \cdot \text{m}$.

La resistencia de puesta a tierra de choque RST puede calcularse de acuerdo con las fórmulas de la **tabla 5.5.1**, aplicando para la longitud l la longitud efectiva de la toma de tierra l_{eff} .

Desde el punto de vista económico, las tomas de tierra superficiales son siempre más ventajosas que las tomas de tierra de profundidad, cuando las capas superiores del terreno presentan una resistencia específica más pequeña que las capas del subsuelo.

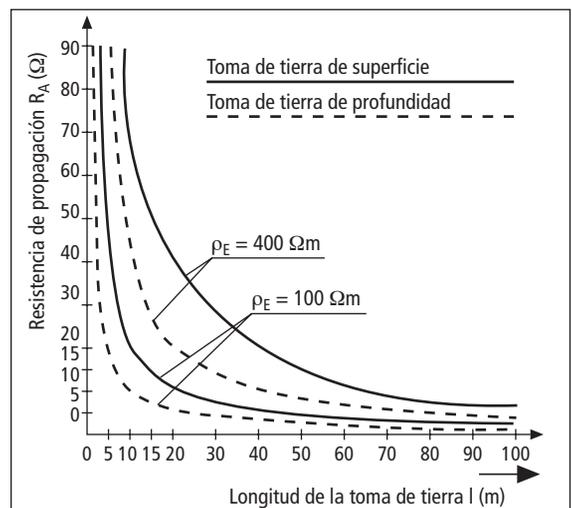


Fig. 5.5.15: Resistencia de propagación R_A de tomas de tierra de superficie y de tomas de tierra de profundidad en función de la longitud de la toma de tierra l .

Cuando el terreno es relativamente homogéneo (es decir cuando la resistencia específica de tierra es aproximadamente igual en la superficie del terreno que en la profundidad del subsuelo), los costes de instalación son similares para ambas.

Según la **figura 5.5.15**, en el caso de una toma de tierra de profundidad, se precisa aproximadamente sólo la mitad de la longitud que en una toma de tierra superficial.

Si el terreno en la zona del subsuelo presenta una mejor conductividad que en la superficie, p.e.j. por presencia de corrientes subterráneas de agua, por lo regular, resulta económicamente más ventajosa una toma de tierra de profundidad que una toma de tierra superficial. La cuestión de si un tipo de toma de tierra u otro resulta más ventajoso, sólo podrá determinarse, en cada caso concreto, por medio de mediciones de la resistencia específica de tierra en función de la profundidad.

Las tomas de tierra de profundidad no precisan de trabajos de excavación, provocan pocos daños en el suelo y sus costes de instalación son, en comparación con una toma de tierra superficial, normalmente bajos. Con estas tomas de tierra se pueden conseguir resistencias de propagación buenas y son muy apropiadas para ampliar y mejorar instalaciones de toma de tierra ya existentes.

5.5.1 Instalaciones de toma de tierra según UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3)

La instalación de toma de tierra es, al fin y al cabo, la prolongación de los dispositivos captadores y derivadores para dispersar la corriente de rayo en el terreno. Otros cometidos de la instalación de toma de tierra son, por un lado, realizar la compensación de potencial entre los derivadores y, por otro, realizar un control del potencial en las proximidades de las paredes del edificio. El sistema de puesta a tierra debe estar conectado a la barra equipotencial.

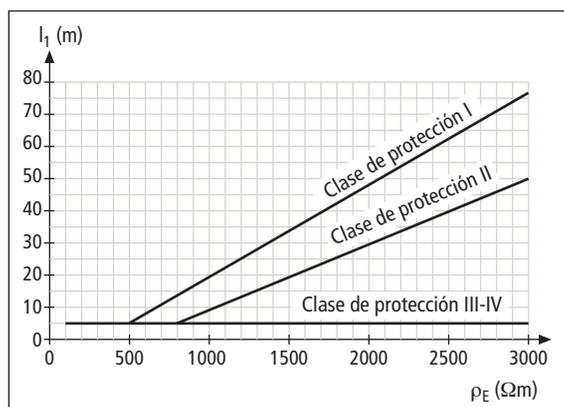


Fig. 5.5.1.1: Longitudes mínimas de electrodos de tierra.

A partir de la norma UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3) se asume la necesaria equipotencialidad del sistema de protección contra rayos. No se requiere ningún valor particular para la resistencia de la puesta a tierra, si bien, se recomienda un valor bajo (inferior a 10Ω , medida con baja frecuencia).

La normativa considera dos disposiciones de puesta a tierra, **Tipo A** y **Tipo B**. Para los dos tipos de tomas de tierra, tipo A y tipo B, la longitud mínima l_1 de cada electrodo de tierra, es determinante para definir la clase de protección (**Figura 5.5.1.1**).

El valor de la resistencia específica de tierra en cada caso, solamente puede determinarse mediante mediciones realizadas "in situ" por el método "WENNER". (Medición de cuatro conductores).

El valor de la resistencia específica de tierra en cada caso, solamente puede determinarse mediante mediciones realizadas "in situ" por el método "WENNER". (Medición de cuatro conductores).

El valor de la resistencia específica de tierra en cada caso, solamente puede determinarse mediante mediciones realizadas "in situ" por el método "WENNER". (Medición de cuatro conductores).

Toma de tierra tipo A

La disposición de tomas de tierra tipo A describe electrodos de tierra en forma de líneas individuales dispuestas horizontalmente (tomas de tierra superficiales) o verticalmente (tomas de tierra de profundidad) que, en cada caso, deben conectarse con un derivador. El número mínimo de electrodos no debe ser inferior a 2.

Para las clases de protección III y IV se exige una longitud mínima de la toma de tierra de 5 metros. Para las clases de protección I y II la longitud de la toma de tierra se fijará en función de la resistencia específica del terreno.

La longitud mínima de la toma de tierra l_1 puede verse en la **figura 5.5.1.1**. La longitud mínima de cada toma de tierra es:

- $l_1 \times 0.5$ para tomas de tierra verticales o inclinadas.
- l_1 para tomas de tierra horizontales.

Estos valores son válidos para cada toma de tierra individual. En caso de combinaciones de diferentes tomas de tierra (verticales y horizontales) debe tenerse en cuenta la longitud total equivalente.

La longitud mínima de la toma de tierra puede no tomarse en consideración cuando se alcanza una resistencia de propagación en tierra inferior a 10Ω (UNE EN 62 305-3).

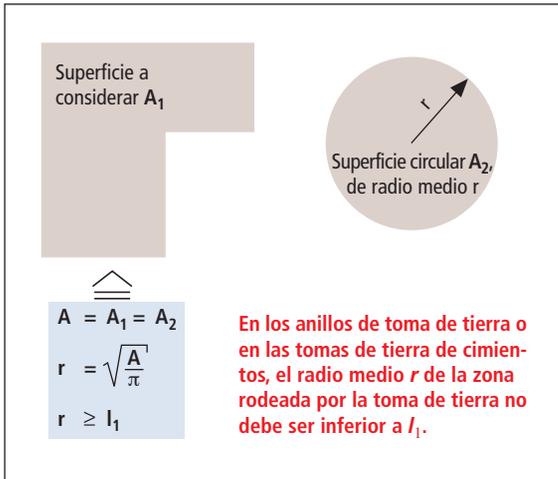


Fig. 5.5.1.2: Toma de tierra tipo B: determinación del radio medio. Ejemplo de cálculo.

Las tomas de tierra de profundidad suelen introducirse verticalmente en el terreno a gran profundidad. Se introducen en terrenos firmes que, regularmente, sólo empiezan a encontrarse por debajo de las cimentaciones. La práctica ha mostrado como muy ventajosas las tomas de tierra de 9 metros. Las tomas de tierra de profundidad tienen la ventaja de que están en contacto con capas del suelo más profundas, cuya resistencia específica, en general, es inferior a la que hay en zonas más cercanas a la superficie.

En zonas de posibles heladas es recomendable no considerar el primer metro de una toma de tierra vertical. La toma de tierra del tipo A no cumple las exigencias de la compensación de potencial entre los derivadores y el control de potencial. Por ello, han de interconectarse entre sí para conseguir una distribución regular de la corriente. Es importante tener en cuenta este aspecto a la hora de realizar el cálculo de la distancia de separación "s". La conexión de este tipo de puesta a tierras puede efectuarse en la superficie o bajo tierra.

Toma de tierra tipo B

Las tomas de tierra tipo B son tomas de puesta a tierra anulares alrededor del objeto a proteger o bien tomas de tierra de cimientos. Las exigencias que se plantean a este tipo de tomas de tierra están descritas en la norma DIN EN 18014.

Si no es posible disponer un anillo cerrado alrededor del edificio, dicho anillo deberá completarse mediante la disposición de conductores en el interior de la

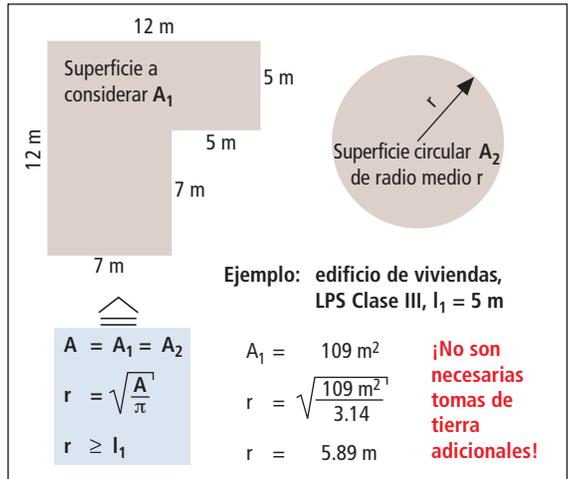


Fig. 5.5.1.3: Toma de tierra tipo B: determinación del radio medio. Ejemplo de cálculo.

edificación o estructura. Para ello pueden utilizarse tuberías o cualquier otro tipo de estructuras metálicas que estén permanentemente conectados. Como mínimo, el 80% de la longitud de la toma de tierra tiene que estar en contacto con el terreno. Las longitudes mínimas de las tomas de tierra, de acuerdo con las disposiciones del tipo B, dependen de los niveles de protección. En los niveles de protección I y II, la longitud mínima de las tomas de tierra se fija, además, en función de la resistencia específica del terreno. (Ver al respecto la figura 5.5.4).

En las tomas de tierra del tipo B, el radio medio "r" de la zona rodeada por la toma de tierra no puede ser inferior a la longitud mínima l_1 indicada. Para determinar el radio medio "r", la superficie a considerar se traslada a una superficie circular equivalente y se determina el radio de acuerdo con las figuras 5.5.1.2 y 5.5.1.3.

Seguidamente presentamos un cálculo a título de ejemplo:

Si el valor exigido l_1 es mayor que el valor de "r" correspondiente a la estructura, es necesario complementar con tomas de tierra radiales o verticales (o tomas de tierra inclinadas) cuyas correspondientes longitudes l_r (radial/horizontal) y l_v (vertical) se deducen de las ecuaciones siguientes:

$$l_r = l_1 - r$$

$$l_v = \frac{l_1 - r}{2}$$

El número de tomas de tierra adicionales no debe ser inferior al número de derivadores, pero como mínimo deben ser 2. Estas tomas de tierra adicionales deben estar distribuidas regularmente por todo el perímetro y han de conectarse con la toma de tierra circular (anillo de toma de tierra).

Si fuera necesario conectar tomas de tierra adicionales a la toma de tierra de cimientos, hay que prestar mucha atención al material que se utilice. En este supuesto es preferible el uso de acero inoxidable, número de material 1.4571 (Figura 5.5.2.1).

Algunos sistemas o instalaciones pueden, a su vez, requerir medias complementarias. Así:

- ⇒ Sistemas eléctricos - Condiciones de desconexión del suministro con respecto al tipo de red correspondiente (Sistemas TN, TT, IT), según normativa IEC 60364-4-41: 2005, mod y HD 60364-4-41:2007
- ⇒ Compensación de potencial según normativa IEC 60364-5-54: 2002 y HD 60364-5-54: 2007.
- ⇒ Sistemas electrónicos - Técnica informática.
- ⇒ Puesta a tierra de antenas.
- ⇒ Compatibilidad electromagnética.
- ⇒ Centros de transformación en o junto a la instalación de obra.

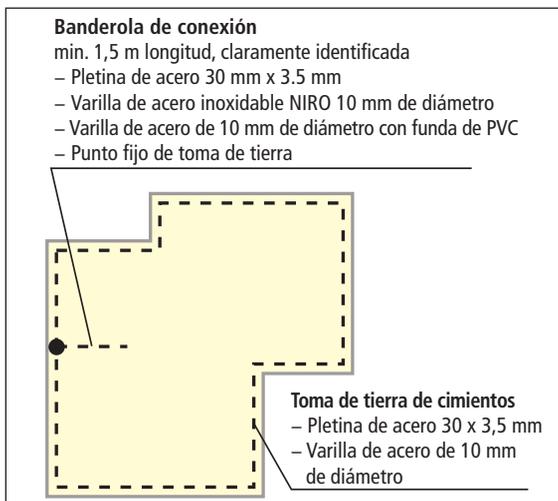


Fig. 5.5.2.1: Malla en tomas de tierra de cimientos.

5.5.2 Instalaciones de tomas de tierra, tomas de tierra de cimientos y tomas de tierra de cimientos en caso de medidas constructivas especiales

Toma de tierra de cimientos - Toma de tierra tipo B

En la norma alemana DIN 18014 "Tomas de tierra de cimientos", se detallan las exigencias o requisitos correspondientes para las tomas de tierra de este tipo.

Muchas normas, tanto nacionales como internacionales, especifican que la toma de tierra de cimientos es una de las tomas de tierra preferidas, pues, con una correcta instalación, se consigue que el electrodo de dispersión esté rodeado de hormigón por todos lados y sea, por tanto, además, resistente a la corrosión. Igualmente, las propiedades higroscópicas del hormigón, favorecen que, por lo general, se alcancen valores de resistencia de propagación muy bajos.

La toma de tierra de cimientos debe instalarse, como anillo cerrado, en la fosa de cimentación o en la solera de cimientos encima del denominado hormigón de limpieza (Figura 5.5.2.1) cumpliendo, de este modo, la función de la compensación de potencial. Hay que prestar atención a la distribución de las mallas ≤ 20 m x 20 m, así como a las banderolas de conexión hacia fuera necesarias para la conexión de los derivadores de la protección externa contra rayos, y hacia dentro para la compensación de potencial (Figura 5.5.2.2).

La instalación de una toma de tierra de cimientos es una medida electrotécnica por lo que tiene que ser realizada y supervisada por un técnico.

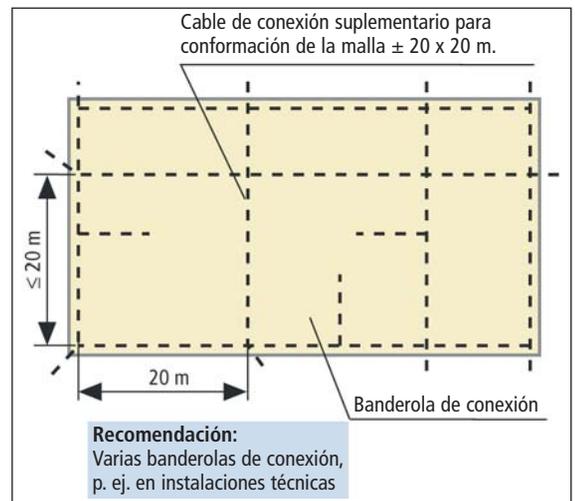


Fig. 5.5.2.2: Toma de tierra de cimientos.



Fig. 5.5.2.3: Toma de tierra de cimientos

Tendido en hormigón no armado

En cimentaciones no armadas, como p. ej. cimientos de edificios de viviendas (**Figura 5.5.2.3**) es preciso utilizar soportes distanciadores. Solamente si se instalan soportes de este tipo a una distancia de 2 metros puede garantizarse que, la toma de tierra de cimientos “este elevada” y, por tanto, quede totalmente rodeada de hormigón.

Tendido en hormigón armado

En caso de utilización de planchas de acero, jaulas de armado o hierros de armado en los cimientos, no sólo puede sino que deben unirse estos componentes naturales metálicos a la toma de tierra de cimientos. De esta manera, la toma de tierra de cimientos es aún más ventajosa. Es este caso, no es necesario utilizar soportes distanciadores.

Con los modernos métodos para la colocación del hormigón, con aplicación inmediata de compactadores/prensadores, está totalmente garantizado que el hormigón “fluya” también por debajo de la toma de tierra de cimientos y que la rodee por todos los lados.

La **figura 5.5.2.4** muestra un ejemplo de aplicación para el tendido horizontal de una pletina como toma de tierra de cimientos. Los puntos de cruce de la toma de tierra de cimientos tienen que estar conectados y ser capaces de soportar la corriente. El acero cincado como material para las tomas de tierra de cimientos es suficiente.

Las banderolas de conexión hacia el exterior en la zona del terreno tienen que protegerse adicionalmente contra la corrosión en los puntos de salida. Para esto es apropiado, por ejemplo, el uso de varillas de acero con revestimiento de plástico (a causa del peligro de rotu-



Fig. 5.5.2.4: Aplicación de tomas de tierra de cimientos.

ra del recubrimiento de plástico a bajas temperaturas es necesario un cuidado especial durante el montaje), acero inoxidable de alta aleación, material Nr. 1.4571 o puntos fijos de puesta a tierra.

Si la instalación está hecha correctamente, la toma de tierra estará rodeada de hormigón por todos los lados y será resistente a la corrosión.

Al instalar la toma de tierra de cimientos han de realizarse mallas con retículas no superiores a 20 m x 20 m. Esta amplitud de mallas no guarda ninguna relación con la clase de protección de la protección externa contra rayos.

En la actual técnica de edificación los diferentes tipos de cimientos se realizan en las más diferentes formas de ejecución y con las más diversas variantes de impermeabilización. La reglamentación sobre protección térmica ha adquirido una notable influencia sobre la ejecución de zapatas y losas de cimentación.

Respecto a las tomas de tierra de cimientos que se construyen en nuevas edificaciones sobre la base de la norma DIN 18014, la impermeabilización o aislamiento tiene repercusiones sobre la colocación y disposición de dichas tomas de tierra.

Perímetros Aislados / Bases Aisladas

Con la expresión “Perímetro” se denomina la zona de muros y terreno de un edificio que está en contacto con la tierra. El aislamiento perimetral es el aislamiento térmico exterior alrededor de la estructura. El aislamiento perimetral situado en el exterior sobre la capa de impermeabilización puede rodear al cuerpo del edificio sin puentes térmicos y constituye una protección adicional de impermeabilización frente a daños mecánicos.

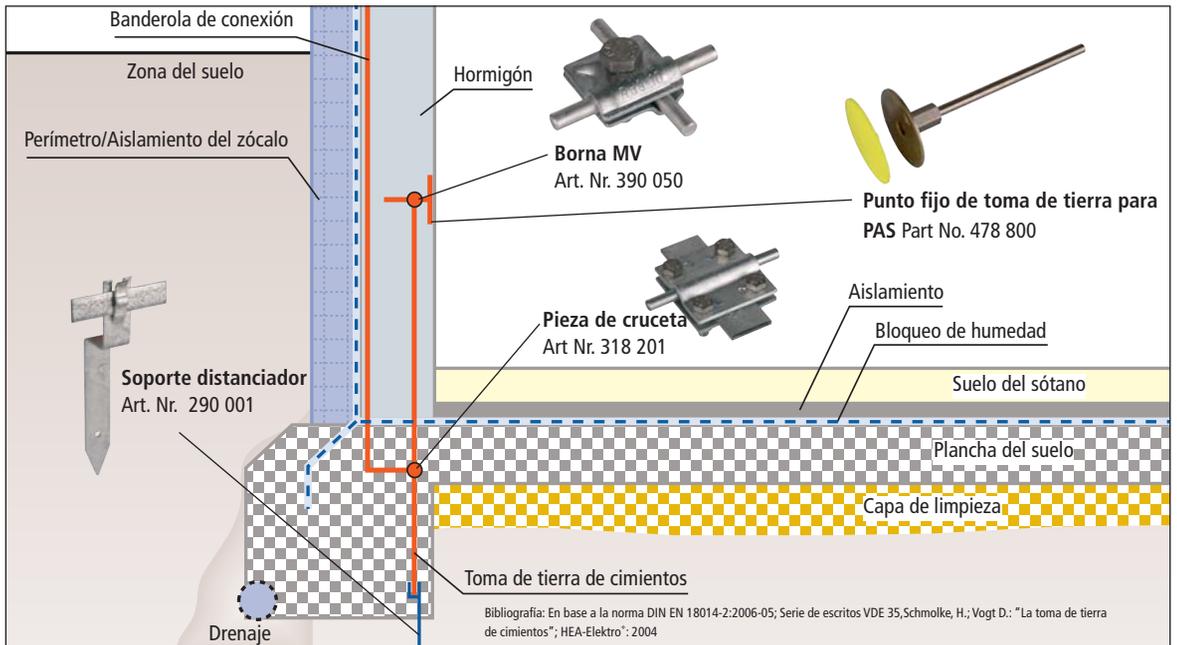


Fig. 5.5.2.5: Disposición de la toma de tierra de cimientos (Pared del sótano aislada).

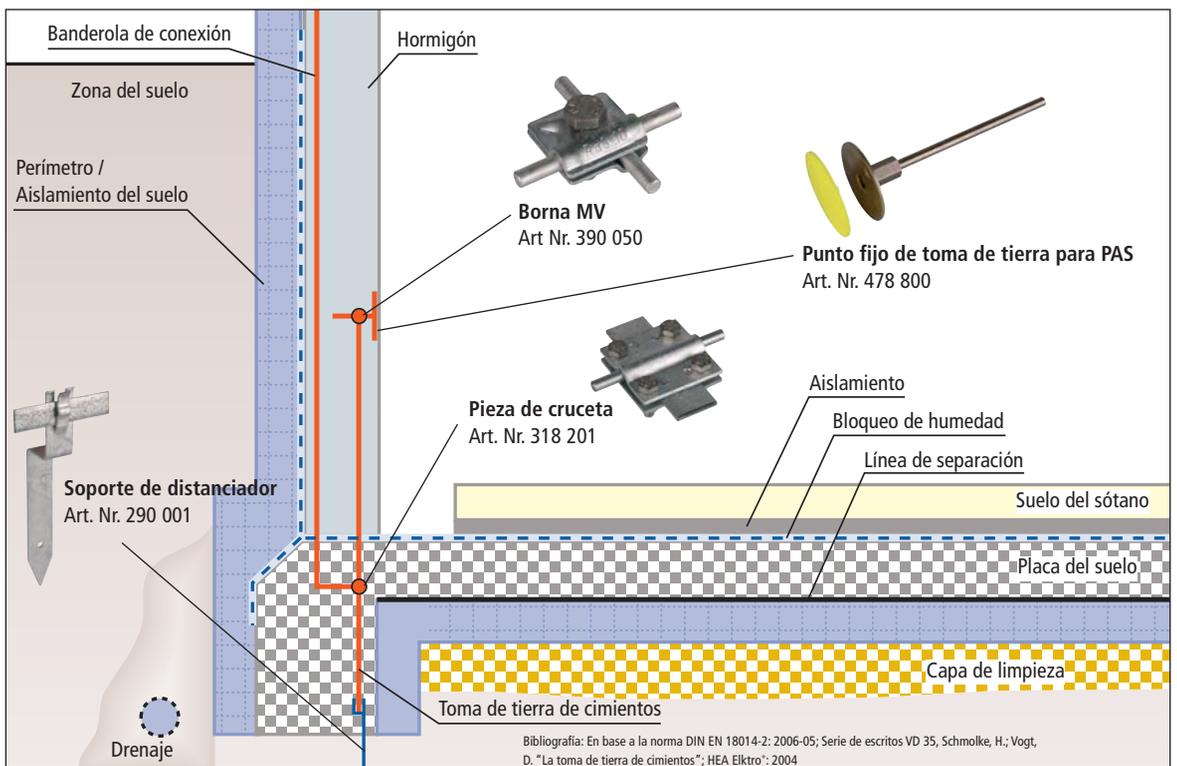


Fig. 5.5.2.6: Disposición de toma de tierra de cimientos (Pared del sótano y plancha de suelo aisladas).

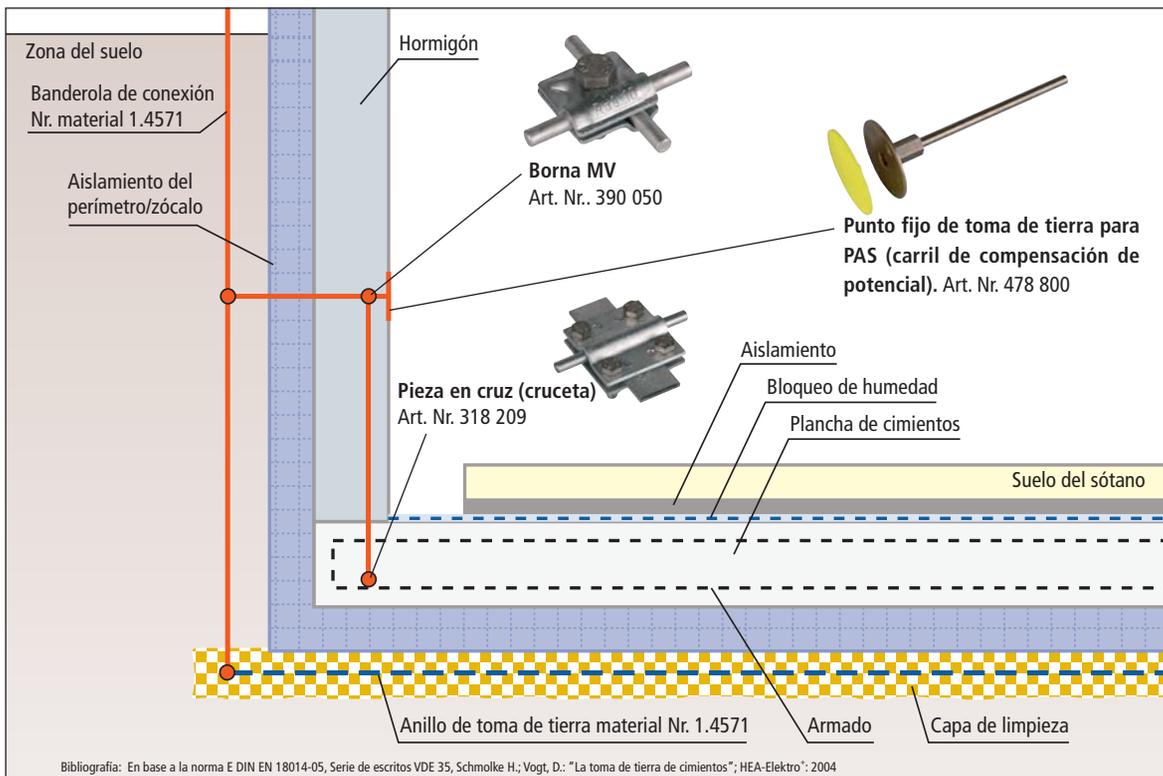


Fig. 5.5.2.7: Disposición de la toma de tierra de cimientos en una plancha de suelo cerrada (completamente aislada).

La resistencia específica de las planchas aislantes perimetrales representa un factor decisivo al considerar las consecuencias del aislamiento perimetral sobre la resistencia de propagación de tomas de tierra de cimientos en ejecución convencional en los cimientos (zapatas de cimentación, losas de cimientos). Así por ejemplo, se indica una resistencia específica $5,4 \cdot 10^{12} \Omega\text{m}$ para una espuma dura de poliuretano con una densidad bruta de 30 kg/m^2 . Frente a esto, la resistencia específica del hormigón se encuentra entre $150 \Omega/\text{m}$ y $500 \Omega/\text{m}$. Sólo en base a estas consideraciones puede deducirse que, con un aislamiento perimetral continuo, una toma de tierra convencional instalada en los cimientos no tiene prácticamente ningún efecto. El aislamiento perimetral también actúa como aislante eléctrico.

Las siguientes figuras muestran las diferentes posibilidades de instalación de tomas de tierra de cimientos en edificios con aislamiento perimetral y aislamiento de base (Figuras 5.5.2.5 hasta 5.5.2.7)

La disposición de la toma de tierra en las zapatas de cimentación, con aislamiento en los lados situados

exteriormente y en la solera de suelo, no debe considerarse crítico (Figuras 5.5.2.5 y 5.5.2.6).

En caso de un aislamiento completo de la losa de cimientos, la toma de tierra debe instalarse por debajo de la capa del terreno. Aquí debería usarse para ello V4A (Nr. de material 1.4571). (Figura 5.5.2.7)



Fig. 5.5.2.8: Punto fijo de toma de tierra.

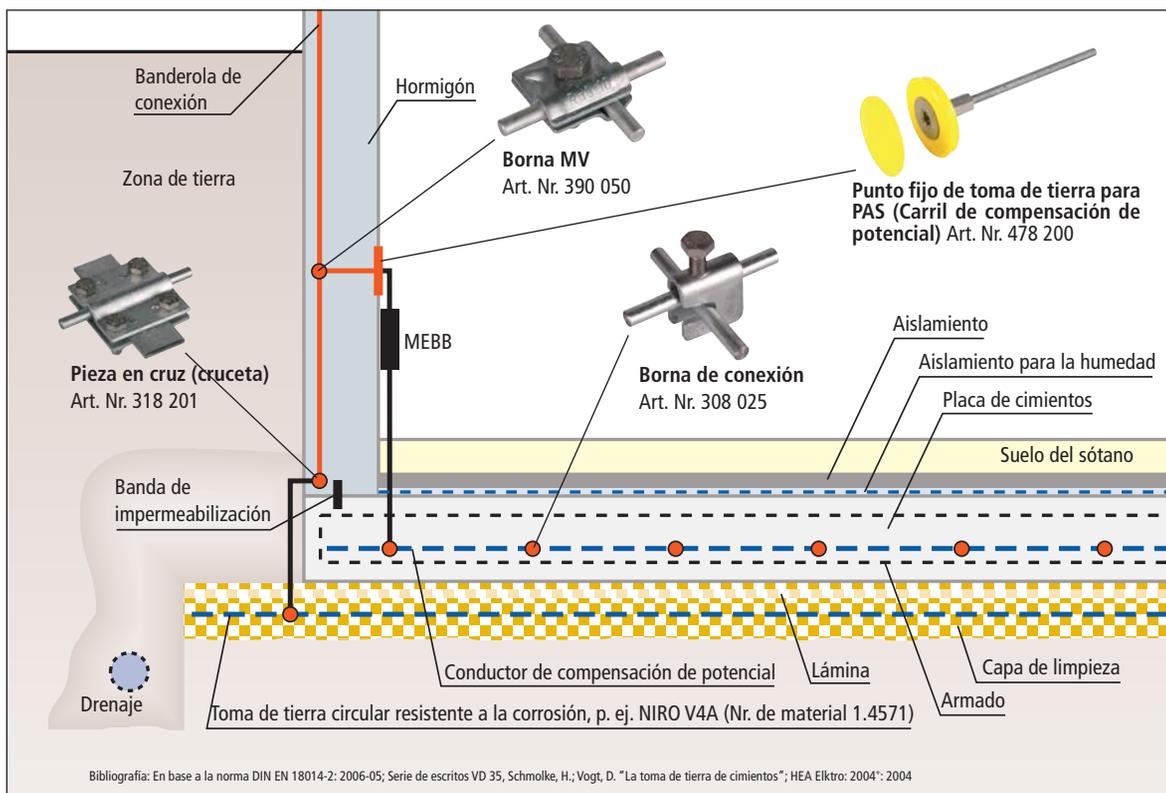


Fig. 5.5.2.9: Disposición de una toma de tierra de cimientos en una cubeta cerrada, ejecución "cubeta blanca".

En la construcción con armados resulta muy conveniente la instalación de puntos fijos de toma de tierra. En este caso hay que prestar especial atención a que la instalación se lleve a cabo de manera correcta durante la fase de construcción (Figura 5.5.2.8).

Cubeta negra, cubeta blanca

En edificios que se construyen en zonas con niveles elevados de aguas subterráneas o emplazamientos con "presión del agua", por ejemplo, edificaciones en laderas, es necesario prever medidas especiales contra la humedad en los sótanos. Las paredes exteriores rodeadas de tierra y las losas de cimientos deben estar selladas contra la penetración de agua de modo que, en el interior de la obra, no puedan formarse humedades peligrosas. En la técnica de edificación, hoy en día, existen los dos procedimientos para efectuar la impermeabilización.

Una cuestión especial al respecto en estos casos, es conocer si el funcionamiento de una toma de tierra de cimientos está garantizado según las medidas de pro-

tección de personas de la norma IEC 60364-4-41 y según las medidas de toma de tierra de protección contra el rayo de la norma UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3).

Tomas de tierra de cimientos en edificios con "cubeta blanca"

El nombre "cubeta blanca" está en contraposición a "cubeta negra": La cubeta blanca no tiene ningún tratamiento adicional en el lado orientado al suelo, es por lo tanto "blanco". Debido a los materiales utilizados en la producción, el cuerpo del hormigón es absolutamente impermeable al agua. Frente a lo que sucedía en años anteriores, en la cubeta blanca ya no se produce la penetración de humedad en un espacio de algunos centímetros. Por esta razón, en los edificios con cubeta blanca debe tenderse una toma de tierra fuera de la cubeta.

La figura 5.5.2.8 muestra la ejecución de una conexión de tierra con un punto fijo de toma de tierra.

La disposición de la toma de tierra de cimientos en una cubeta blanca está representada en la figura 5.5.2.9.



Tomas de tierra en edificios con "cubeta negra"

El nombre "cubeta negra" proviene de las bandas negras de alquitrán de varias capas adosadas exteriormente al edificio en la zona del suelo. El cuerpo del edificio se recubre con masa de alquitrán/brea, sobre la que luego se disponen, por lo regular, hasta 3 capas de bandas de alquitrán.

Un conductor circular instalado en la losa de cimientos por encima de la impermeabilización puede servir como control del potencial en el edificio. Sin embargo, debido al aislamiento de alta impedancia hacia el exterior, el electrodo de tierra es ineficaz.

Para cumplir las exigencias de toma de tierra, según las diversas normas, es necesaria la instalación de una toma de tierra por el exterior y alrededor del edificio o en la capa de limpieza por debajo de todas las impermeabilizaciones.

En edificios con "cubeta negra" la amplitud de retículas debería ser, como máximo de 10 m x 10 m.

Las líneas de entrada de conexión al interior del edificio, procedentes de la toma de tierra exterior, deberán

situarse, siempre que sea posible, por encima de la impermeabilización del edificio (Figura 5.5.2.10) con el fin de garantizar, también a largo plazo, una cubeta del edificio que sea impermeable. Atravesar la "cubeta negra" únicamente puede hacerse con una conducción especial de toma de tierra en el edificio.

Losas de cimientos de hormigón de fibra

El hormigón de fibra es una clase de hormigón que se consigue añadiendo fibras de acero en hormigón líquido. Después del endurecimiento de éste, se forma una losa de hormigón capaz de soportar cargas muy elevadas. Las fibras de acero tienen una longitud aproximada de 6 cm y un diámetro de 1-2 mm. Están ligeramente onduladas y se mezclan uniformemente con el hormigón líquido. La proporción de fibras de acero es aproximadamente de 20-30 kg/m³ de hormigón.

Gracias a esta mezcla, la losa de hormigón no sólo es resistente en gran parte a la presión, sino también a la tracción, y en comparación con una losa de hormigón armado convencional, presenta, además, una elasticidad muy superior.

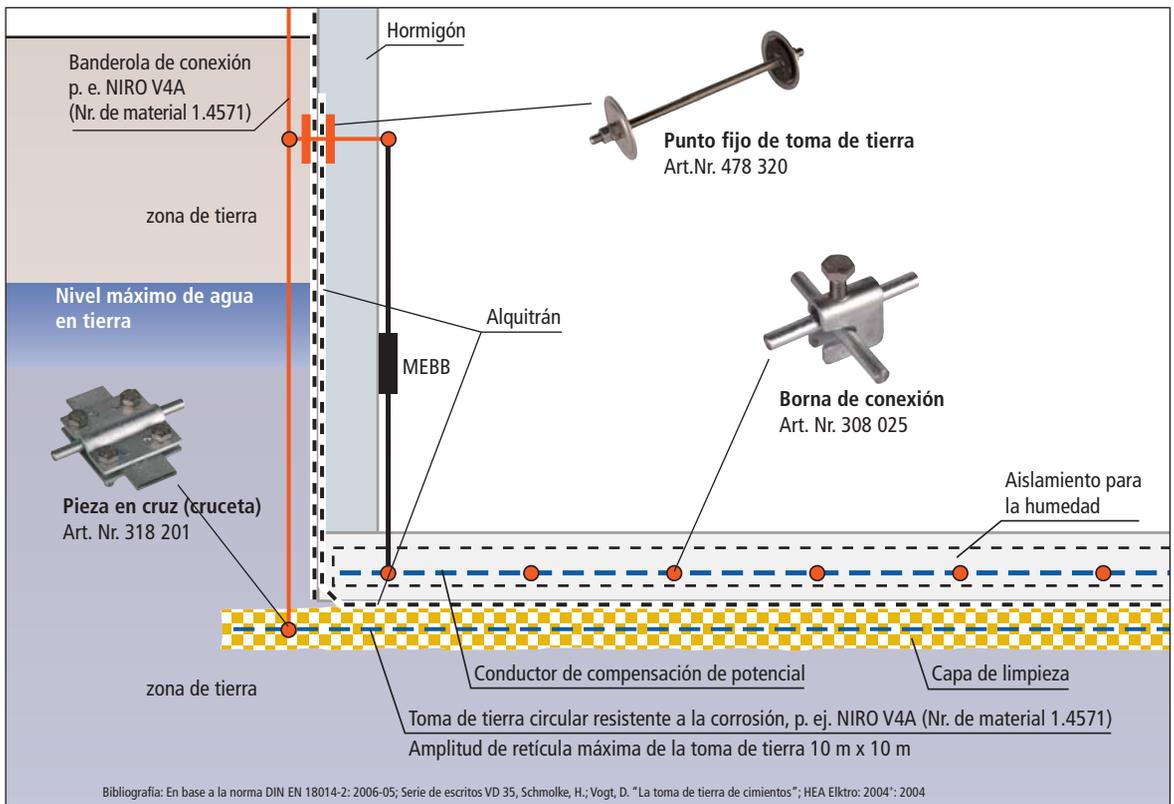


Fig. 5.5.2.10: Disposición de una toma de tierra de cimientos en una cubierta cerrada, ejecución "cubeta negra".

El hormigón líquido es vertido *in situ* y puede conseguirse una superficie muy lisa, sin fisuras, para grandes extensiones. Se utiliza, por ejemplo, para losas de hormigón en cimentaciones de naves industriales de grandes dimensiones.

El hormigón de fibra no tiene armado, de modo que en lo que se refiere a las medidas de toma de tierra hay que instalar adicionalmente un conductor circular o una malla. El electrodo de tierra puede introducirse en el hormigón. Si es de material cincado, tiene que estar cerrado y rodeado de hormigón por todos los lados. Esto es algo que, *in situ* suele ser muy difícil de realizar. Por eso, se recomienda instalar, por debajo de la losa de hormigón, acero inoxidable de alta aleación, resistente a la corrosión (Nr. de material 1.4751). No deben olvidarse las correspondientes banderolas de conexión.

Observación:

El montaje de conductores de toma de tierra y conexiones en hormigón tiene que ser realizado por personal técnico especializado. Si esto no fuera posible, el responsable de la obra puede llevar a cabo esta tarea sólo si el trabajo es supervisado por un especialista.

5.5.3 Toma de tierra anular - Toma de tierra tipo B

En todos los edificios públicos de nueva construcción la norma DIN 18914 prescribe la instalación de una toma de tierra de cimientos. En edificios públicos ya existentes puede realizarse como toma de tierra anular (Figura 5.5.3.1).

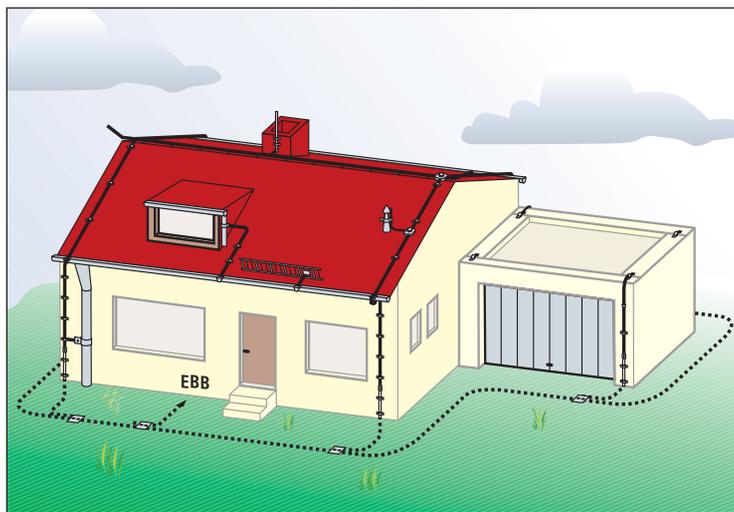


Fig. 5.5.3.1: Anillo perimetral de toma de tierra de un edificio de viviendas.

Estas tomas de tierra tienen que ejecutarse como un anillo cerrado alrededor del edificio y, si esto no fuera posible, habría que disponer una conexión para cerrar el anillo en el interior del edificio.

El 80 por ciento del electrodo de tierra debe estar en contacto con el terreno. Si no se puede llegar a este 80% es necesario comprobar la necesidad de tomas de tierra adicionales tipo A. Han de tenerse en cuenta las longitudes mínimas de las tomas de tierra en función del nivel de protección (Ver capítulo 5.5.1).

Al instalar el anillo de toma de tierra, es preciso asegurarse de que se encuentre instalado a una profundidad de > 0,5 m y a 1 metro de separación del edificio. Si se instala la toma de tierra como acabamos de exponer, se consigue reducir la tensión de paso y, de este modo, puede emplearse como control de potencial alrededor del edificio.

El anillo de toma de tierra deberá tenderse en suelo firme. La instalación debe realizarse en terrenos naturales. Si se hace en zonas de relleno, escombros de obra o grava, la resistencia de propagación de tierra se deteriora.

La corrosión es un aspecto que debe tenerse muy en cuenta a la hora de escoger el material que va a utilizarse en la instalación de puesta a tierra. El empleo de acero inoxidable es muy recomendable. Este tipo de material no sufre corrosión y, por tanto, no precisará en un futuro medidas de saneamiento que pueden resultar muy costosas.

Además las banderolas de conexión tienen que protegerse de forma adecuada contra la corrosión.

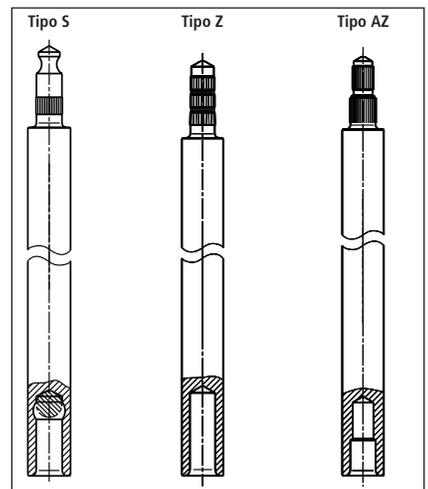


Fig. 5.5.4.1: Tomas de tierra de profundidad autoexpansibles DEHN.



5.5.4 Tomas de tierra de profundidad - Tomas de tierra tipo A

Las tomas de tierra de profundidad autoempalmables, sistema DEHN, se construyen en acero especial y son cincadas al fuego en un baño completo, o bien están realizadas en acero inoxidable de alta aleación de material Nr. 1.4571 (la toma de tierra de acero inoxidable de alta aleación se utiliza en sectores especialmente expuestos al riesgo de la corrosión). Una característica especial identificativa de estas tomas de tierra de profundidad es su punto de acoplamiento, que posibilita la unión de las picas de toma de tierra sin aumentar el diámetro de las mismas. Cada pica tiene, en su extremo inferior, un taladro y en el otro extremo de la barra presenta una espiga (**Figura 5.5.4.1**).

En la toma de tierra tipo "S", durante el proceso de introducción o hincado en tierra, el relleno de metal blando se introduce en el taladro de manera que se logra una unión mecánica y eléctrica extraordinariamente buena.

En la toma de tierra tipo "Z" la elevada calidad de acoplamiento se consigue mediante una espiga moleteada varias veces.



Fig. 5.5.4.2: Introducción de una toma de tierra de profundidad con ayuda de trípode y martillo neumático motocompresor.

En la toma de tierra tipo "AZ" la elevada calidad de acoplamiento se consigue mediante un moleteado doble de la espiga con distinto diámetro.

Las ventajas de las tomas de tierra de profundidad DEHN son:

- ⇒ Acoplamiento especial
- ⇒ Sin incremento del diámetro, de manera que, la toma de tierra de profundidad, en toda su longitud, está en contacto directo con el terreno.
- ⇒ Cierra automáticamente al introducirse las picas
- ⇒ Facilidad de introducción con martillo neumáticos de vibración (**Figura 5.5.4.2**) o martillo manual.
- ⇒ Se alcanzan valores de resistencia constantes, invariables, debido a que las tomas de tierra de profundidad penetran en capas del terreno que no se ven afectadas por las variaciones de humedad y temperatura dependientes de la época del año.
- ⇒ Elevada resistencia a la corrosión gracias a un cincado al fuego en baño completo de inmersión (espesor de la capa de cinc 70 micras).
- ⇒ Los puntos de acoplamiento también están cincados al fuego.
- ⇒ Facilidad de almacenaje y transporte, gracias a la longitud de cada una de las picas de 1,5 m ó 1 m.

5.5.5 Tomas de tierra en suelos rocosos

En terrenos rocosos o de piedra, las tomas de tierra superficiales son, con mucha frecuencia, la única posibilidad real para realizar la instalación de una toma de puesta a tierra. Al instalar la toma de tierra, la pletina o el redondo a utilizar se ha de disponer sobre las rocas o piedras del terreno, y posteriormente debe cubrirse con grava, hormigón, tierra vegetal o similar.

Es muy conveniente utilizar material de acero inoxidable, Nr. de Material 1.4571. Los puntos de enclavamiento deben realizarse con especial cuidado y ser protegidos contra la corrosión.

5.5.6 Interconexión de tomas de tierra

Una instalación de puesta a tierra puede tener múltiples finalidades.

La tarea de la toma de tierra de protección es conectar instalaciones eléctricas y equipos de servicio de forma segura con el potencial de tierra y, en caso de un fallo eléctrico, garantizar la seguridad de personas e instalaciones.

La toma de tierra de protección contra rayos se encarga de recoger, con seguridad, la corriente de las bajantes y dispersarla en el terreno.

La toma de tierra de servicios tiene como cometido garantizar que las instalaciones eléctricas y electrónicas funcionan de un modo seguro.

La instalación de toma de tierra de protección debe ser común para todos los elementos y equipos que deban estar conectados a ella. En otro caso podrían surgir diferencias de potencial entre equipamientos/elementos puestos a tierra en diferentes toma de tierra.

Anteriormente, en la práctica se utilizaba, para la toma de tierra de sistemas electrónicos, una "tierra limpia" separada de la protección contra rayos y de la toma de tierra protección. Sin embargo, esta disposición es poco aconsejable e incluso puede resultar peligrosa. Por la acción de rayos, en la instalación de toma de tierra, aparecen diferencias de potencial muy elevadas, hasta de algunos cientos de kV, lo que puede llegar a ocasionar la destrucción de instalaciones eléctricas e incluso suponer un grave peligro para las personas.

Por lo tanto, las normas UNE EN 62305-3 y -4 (IEC 62305-3 y -4) recomiendan una compensación de potencial continua dentro de una instalación. La toma de tierra de equipos puede realizarse en el interior de un edificio, en forma radial, central o mallada. Una dis-

posición en forma de malla es lo más aconsejable. En todo caso, esto depende tanto del entorno electromagnético como de las características de los sistemas electrónicos.

En una instalación de grandes dimensiones, con diferentes edificios interconectados con conductores eléctricos y líneas de datos, la combinación de los distintos sistemas de puesta a tierra puede reducir la resistencia (total) de tierra. (Figura 5.5.6.1). De este modo, se reducen notablemente las diferencias de potencial existentes entre los diversos edificios. Al mismo tiempo se disminuyen los esfuerzos por cargas de tensión de los diferentes conductores de conexión eléctricos y de datos. En cualquier caso, las uniones de los distintos sistemas de toma de tierra de los edificios, deben constituir entre sí una red mallada. Esta red mallada de toma de tierra deberá estar realizada de tal modo que se una con la instalación de toma de tierra allí donde también se conectan las derivaciones verticales. Las diferencias de potencial entre edificios, en caso de una descarga de rayo, son tanto más pequeñas cuanto más estrechas sean las retículas de la red mallada de toma de tierra. Esto, por otra parte, depende de la superficie total de la edificación. Se ha demostrado que retículas de malla de 20 m x 20 hasta 40 m x 40 m son efectivas y económicamente ventajosas. Si, por ejemplo, existen chimeneas de aireación muy elevadas (puntos preferidos para las descargas de rayo), alrededor de las partes

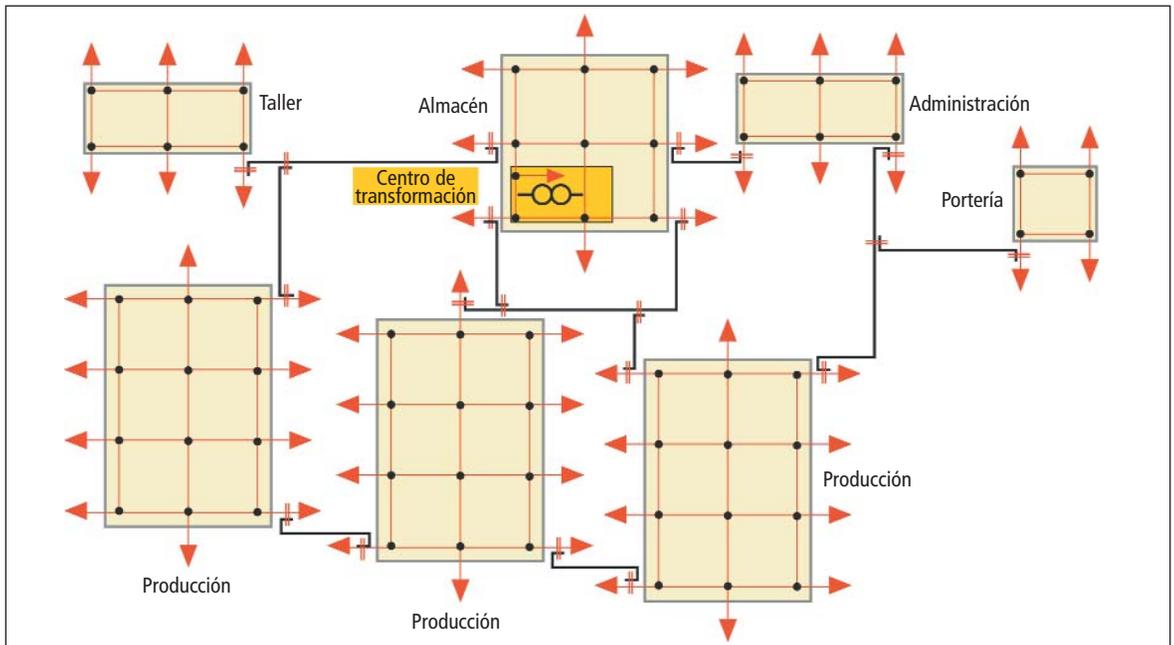


Fig. 5.5.6.1: Instalación de toma de tierra en forma de malla de una instalación industrial.

de la edificación correspondientes, las uniones deberían ser más estrechas y, a ser posible, realizarse en forma radial con conexiones transversales circulares (Control de potencial). Al elegir el material a utilizar como electrodos de la malla de puesta a tierra es preciso tener en cuenta su resistencia a la corrosión y la compatibilidad de los mismos.

5.5.7 Corrosión de las tomas de tierra

5.5.7.1 Sistemas de puesta tierra con especial consideración a la corrosión

Los metales en contacto directo con el suelo o el agua (electrolitos) pueden sufrir corrosión por causa de corrientes parásitas, suelos corrosivos y la formación de celdas voltaicas. No es posible proteger a los electrodos de puesta a tierra de la corrosión aislándoles completamente, es decir, separando los metales del terreno, pues todas los revestimientos convencionales que se emplearon hasta ahora han tenido una alta resistencia eléctrica y, por lo tanto, invalidan el efecto de los electrodos de puesta a tierra.

Los electrodos de puesta a tierra fabricados con un material uniforme pueden estar expuestos al riesgo de corrosión por suelos agresivos y a la formación de celdas de concentración. El riesgo de corrosión depende de la naturaleza del material y del tipo y composición del terreno.

Cada vez aumentan más los daños por corrosión debido a la formación de celdas voltaicas. Esta formación de celdas entre diferentes metales con potenciales de metal/electrolitos ampliamente diferentes se conoce desde hace muchos años. Sin embargo, lo que aún es desconocido es que las armaduras del hormigón de cimentación también pueden convertirse en el cátodo de una celda y, de esta manera, causar corrosión a otras instalaciones.

Con los cambios en las técnicas de construcción de edificios -estructuras de hormigón armado más grandes y áreas de metal libre más pequeñas en tierra – la relación de superficie ánodo/cátodo es cada vez más desfavorable y el riesgo de corrosión de los metales más básicos se incrementa inevitablemente.

El aislamiento eléctrico de las instalaciones que actúan como ánodos para evitar la formación de estas celdas sólo es posible en casos excepcionales. Hoy en día, el objetivo es integrar todos los electrodos de puesta a tierra, incluidas las instalaciones metálicas conectadas a tierra para poder lograr la equipotencialidad y, en consecuencia, la máxima seguridad contra tensiones

con riesgo de choque por fallas o por impactos de rayos.

En las instalaciones de alta tensión, los electrodos de puesta a tierra de protección se conectan a electrodos de puesta a tierra que operan a baja tensión, de conformidad con la norma HD 63751. Asimismo, la norma IEC 60364-4-41 2005 modificada y la HD 60364-41(2007) requieren de la integración de conductos y demás instalaciones en las medidas de protección contra riesgo de choque eléctrico. Así, la única manera de prevenir o, por lo menos, reducir el riesgo de corrosión de los electrodos de puesta a tierra y demás instalaciones en contacto con ellos, es eligiendo materiales adecuados para la fabricación de electrodos de puesta a tierra.

La norma DIN VDE 0151 titulada "Materiales y dimensiones mínimas de electrodos de puesta a tierra respecto de la corrosión" está disponible desde junio de 1986 como documento oficial. Además de décadas de experiencia en el campo de la tecnología de puesta a tierra, esta norma incluye, también, los resultados de extensivos exámenes preliminares. Hay muchos resultados interesantes disponibles que resultan importantes para los electrodos de puesta a tierra, incluidos los de los sistemas de protección contra rayos.

A continuación, se explican los procesos fundamentales que llevan a la corrosión.

De los conocimientos adquiridos por el grupo de Trabajo VDE "materiales de la puesta tierra" se derivan las medidas prácticas anticorrosivas y de conservación del buen estado del material, especialmente en lo que respecta a los electrodos de puesta tierra para la protección contra las descargas atmosféricas.

Términos empleados en protección contra la corrosión y en las medidas de protección contra corrosión

Corrosión

Reacción de un material metálico con el entorno que lleva al deterioro de las características de dicho material y/o de su entorno. Por lo general, la reacción es de carácter electroquímico.

Corrosión electroquímica

Corrosión durante la cual tienen lugar procesos electroquímicos. Se producen exclusivamente en presencia de un electrolito.

Electrolito

Medio corrosivo conductor de iones (como por ejemplo, suelo, agua, sales fundidas).

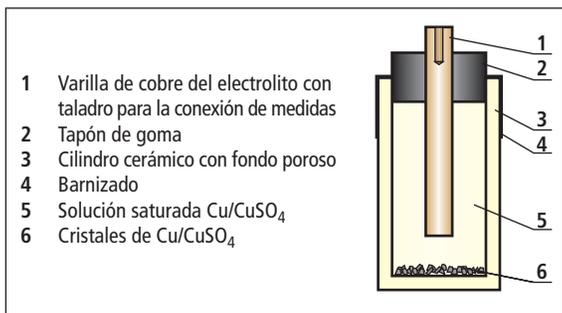


Fig. 5.5.7.1.1: Ejemplo de aplicación de un electrodo de medida no polarizado (electrodo de cobre-sulfato de cobre) para adquirir un potencial dentro del electrolito (vista sección transversal).

Electrodo

Material conductor de electrones en un electrolito. El sistema de electrodo y electrolito forma una media celda.

Ánodo

Electrodo desde el cual una corriente continua ingresa al electrolito.

Cátodo

Electrodo desde el cual una corriente continua deja el electrolito.

Electrodo de referencia

Electrodo de medición para determinar el potencial de un metal en el electrolito.

Electrodo de cobre / sulfato de cobre

Electrodo de referencia que apenas puede polarizarse, fabricado de cobre en una solución saturada de sulfato de cobre.

El electrodo de sulfato de cobre es la forma más común del electrodo de referencia para la medición del potencial de objetos metálicos subterráneos (Fig. 5.5.7.1.1).

Celda de corrosión

Celda voltaica con diferentes densidades locales de corrientes parciales para disolver el metal. Pueden formarse ánodos y cátodos de la celda de corrosión:

⇒ En el material

Por diferentes metales (corrosión por contacto) o por diferentes componentes estructurales (corrosión selectiva o intercrystalina).

⇒ En el electrolito

Por diferentes concentraciones de determinados materiales con características estimulantes o inhibitorias para disolver el metal.

Potenciales

Potencial de referencia

Potencial de un electrodo de referencia respecto del electrodo de hidrógeno estándar.

Potencial eléctrico de un metal

Potencial eléctrico de un metal o de un sólido conductor de electrones en un electrolito.

5.5.7.2 Formación de celdas voltaicas, corrosión

Los procesos de corrosión pueden explicarse claramente con la ayuda de una celda voltaica. Si, por ejemplo, se sumerge una varilla de metal en un electrolito, los iones con carga positiva pasan al electrolito y, a la inversa, los iones positivos se absorben del electrolito desde la banda de metal. En este contexto, se habla de "presión de la solución" del metal y de "presión osmótica" de la solución. Dependiendo de la magnitud de ambas presiones, o bien, los iones del metal de la varilla pasan a la solución (por lo que la varilla se convierte en negativa respecto de la solución) o los iones del electrolito se agrupan en grandes números en la varilla (la varilla se torna positiva respecto del electrolito). Así, se crea una tensión entre dos varillas de metal en el electrolito.

En la práctica, los potenciales de los metales en tierra se miden con la ayuda de un electrodo de sulfato de cobre. Ello consiste en una varilla de cobre que se

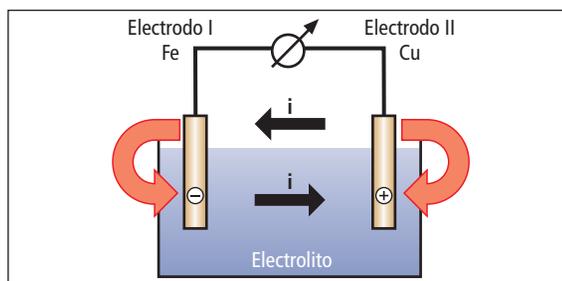


Fig. 5.5.7.2.1: Celda galvánica: hierro/cobre.

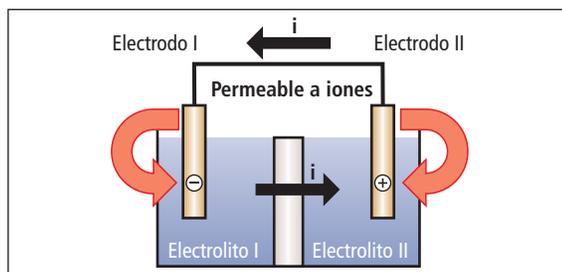


Fig. 5.5.7.2.2: Celda de concentración.

sumerge en una solución saturada de sulfato de cobre (el potencial de referencia de este electrodo de referencia permanece constante).

Considérese el caso de dos varillas fabricadas con diferentes metales que se sumergen en el mismo electrolito. Se crea ahora una tensión de determinado valor en cada varilla del electrolito. Puede emplearse un voltímetro para medir la tensión entre varillas (electrodos); esta es la diferencia entre los potenciales de los electrodos individuales respecto del electrolito.

¿De qué manera surge ahora que la corriente fluye en el electrolito y, por lo tanto, que el material se transporta, es decir, se produce la corrosión?

Si, según se muestra en este documento, los electrodos de cobre y hierro se conectan mediante un amperímetro fuera del electrolito, por ejemplo, se verifica lo siguiente en el circuito exterior, la corriente i fluye de + a -, es decir, del electrodo de cobre "más noble" de acuerdo con la **Tabla 5.5.7.2.1**, al electrodo de hierro. (**Figura 5.5.7.2.1**).

Por otro lado, en el electrolito, la corriente i debe fluir del electrodo de hierro "más negativo" al electrodo de cobre para cerrar el circuito. Esto significa que los iones positivos pasan del polo más negativo al electrolito y, por lo tanto, se convierte en el ánodo de la celda voltaica, es decir, se disuelve. La disolución del metal tiene lugar en estos puntos, donde la corriente ingresa al electrolito.

También puede surgir una corriente de corrosión a partir de una celda de concentración (**Figura 5.5.7.2.2**). En este caso, dos electrodos del mismo tipo de metal se sumergen en diferentes electrolitos. El electrodo en el electrolito II que tiene la mayor concentración de iones de metal se torna eléctricamente más positivo que el otro. La conexión de ambos electrodos permite que la corriente i fluya y el electrodo, que es más negativo desde el punto de vista electroquímico, se disuelve.

Puede formarse una celda de concentración de este tipo, por ejemplo, por dos electrodos de hierro, uno de los cuales se fija en el hormigón; mientras el otro queda en tierra (**Figura 5.5.7.2.3**).

	Definición	Símbolo(s)	Unidad de medición	Cobre	Plomo	Latón	Hierro	Zinc
1	Potencial de corrosión libre en el suelo ¹⁾	$U_{M-Cu/CuSO_4}$	V	De 0 a -0,1	De -0,5 a -0,6	De -0,4 a -0,6 ²⁾	De -0,5 a -0,8 ³⁾	De -0,9 a -1,1 ⁵⁾
2	Potencial de protección catódica en el terreno ¹⁾	$U_{M-Cu/CuSO_4}$	V	-0,2	- 0,65	-0,65 ²⁾	-0,85 ⁴⁾	-1,2 ⁵⁾
3	Equivalentes electroquímico	$K = \frac{\Delta m}{It}$	Kg/(A·año)	10.4	33.9	19.4	9.1	10.7
4	Velocidad de corrosión lineal a $J = 1 \text{ mA/dm}^2$	$W_{lim} = \frac{\Delta s}{t}$	mm/año	0,12	0,3	0,27	0,12	0,15
1)	Medida con el electrodo de cobre/sulfato de cobre saturado (Cu/Cu SO ₄)							
2)	Valores verificados en ensayos realizados recientemente. El potencial del cobre revestido en latón depende del espesor del recubrimiento de latón. Los recubrimientos de latón comunes hasta el presente representan una pocos μm y, por lo tanto, se encuentran entre los valores del latón y el cobre en el suelo.							
3)	Estos valores también se aplican a tipos de hierro de menor aleación. El potencial del acero en el hormigón depende considerablemente de influencias externas. Medido con un electrodo saturado de cobre/sulfato de cobre, generalmente representa de -0,1 a 0,4 V. En el caso de conexiones conductoras de metal con amplias instalaciones subterráneas de metal con potencial más negativo, es polarizado catódicamente y, por lo tanto, alcanza valores de hasta aproximadamente -0,5V.							
4)	En suelos anaeróbicos, el potencial de protección debería ser de -0,95V.							
5)	Acero galvanizado por inmersión en caliente, con recubrimiento de zinc, de acuerdo con la tabla antes mencionada, que posee una capa de zinc pura externa y cerrada. El potencial del acero galvanizado por inmersión en caliente en el suelo, por lo tanto, corresponde aproximadamente a el valor indicado de zinc en el suelo. En caso de pérdida de la capa de zinc, el potencial se hace más positivo. Con esta corrosión completa, puede alcanzar el valor del acero. El potencial del acero galvanizado por inmersión en caliente en el hormigón posee aproximadamente los mismos valores iniciales. Con el tiempo, el potencial se hace más positivo. Sin embargo, todavía no se hallaron valores más positivos de aproximadamente -0,75V. El cobre energicamente galvanizado por inmersión en caliente con una capa de zinc de, por lo menos, 70 μm también posee una capa externa cerrada de zinc puro. El potencial del cobre galvanizado por inmersión en caliente del suelo, por lo tanto, corresponde a aproximadamente el valor indicado de zinc en el suelo. En el caso de una capa de zinc más delgada o de corrosión de la capa de zinc, el potencial se hace más positivo. Aún no se han definido los valores límite.							

Tabla 5.5.7.2.1: Valores de potenciales y tasas de corrosión de materiales de metal común.

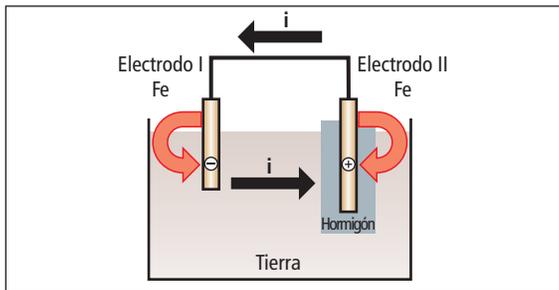


Fig. 5.5.7.2.3: Celda de concentración: Hierro en tierra / Hierro en hormigón.

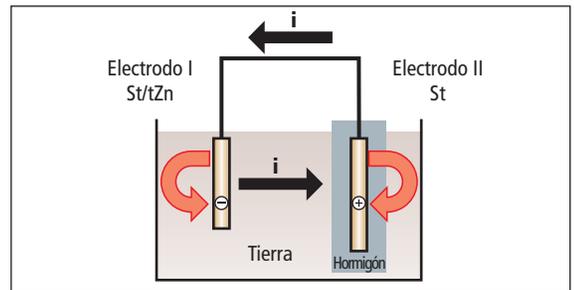


Fig. 5.5.7.2.4: Celda de concentración: Acero galvanizado en tierra/acero (negro) en hormigón.

Al conectar estos electrodos, el hierro en el hormigón se convierte en el cátodo de la celda de concentración y el de tierra se convierte en el ánodo; por lo tanto, este último se destruye por pérdida de iones.

Para la corrosión electroquímica, cuanto más grandes son los iones y menor es su carga, mayor es el transporte de metal asociado al flujo de corriente i (es decir, i es proporcional a la masa atómica del metal).

En la práctica, los cálculos se realizan con corrientes que fluyen durante un período de tiempo determinado, por ejemplo, un año. La **Tabla 5.5.7.2.1** indica valores que expresan el efecto de la corriente de corrosión (densidad de corriente) en términos de la cantidad de metal disuelto. Así, las mediciones de la corriente de corrosión posibilitan el cálculo por adelantado de cuántos gramos de un metal erosionarán durante un período de tiempo considerado.

Sin embargo, más práctica es la predicción de si, y durante qué período de tiempo, la corrosión causará orificios o picaduras en los electrodos de puesta a tierra, tanques de acero, cañerías, etc.

Por lo tanto, resulta importante si el ataque de la presunta corriente tendrá lugar de manera difusa o uniforme.

Para el ataque corrosivo, no es sólo la magnitud de la corriente de corrosión la que resulta decisiva, sino también y en especial, su densidad, es decir, la corriente por unidad del área de descarga.

A menudo no se puede determinar directamente esta densidad de corriente. En esos casos, se maneja con mediciones de potencial desde los cuales puede tomarse el grado de "polarización" disponible. El comportamiento de los electrodos respecto de la polarización sólo se expone básicamente en este documento.

Considérese el caso de una pletina de acero galvanizado situada en tierra y conectada a la armadura de acero (negro) del hormigón de cimiento (**Figura 5.5.7.2.4**). De acuerdo con nuestras mediciones, se producen las siguientes diferencias de potencial respecto del electrodo de sulfato de cobre:

Acero (desnudo) en hormigón: -200 mV.
Acero galvanizado en arena: -800 mV.

Así, existe una diferencia de potencial de 600 mV entre estos dos metales. Si ahora se los conecta sobre tierra, fluye una corriente i en el circuito exterior desde el hormigón armado hasta el acero en la arena y en el suelo desde el acero en la arena hasta el acero en el refuerzo.

La magnitud de la corriente i ahora es una función de la diferencia de tensión, la conductividad del suelo y la polarización de los dos metales.

Por lo general, se observa que la corriente i en tierra es generada por cambios en el material.

Sin embargo, un cambio en el material también significa que la tensión de los metales individuales cambia respecto del suelo. Esta variación de potencial causada por la corriente de corrosión i se denomina polarización. La resistencia de la polarización es directamente proporcional a la densidad de la corriente. Ahora, los fenómenos de polarización tienen lugar en los electrodos negativos y positivos. Sin embargo, las densidades de corriente en ambos electrodos son muy diferentes.

A modo de ilustración, consideraremos el siguiente ejemplo:

Se conecta un tubería de gas de acero, con un buen aislamiento de tierra, a electrodos de cobre de puesta a tierra.

Si la tubería aislada sólo posee unos pequeños puntos donde falta material, existe una mayor densidad

de corriente en estos puntos como resultado de la corrosión rápida del acero.

En oposición, la densidad de corriente es baja en el área más grande de los electrodos de puesta a tierra de cobre donde ingresa la corriente.

Así, la polarización es mayor en el conductor de acero aislado más negativo que en los electrodos de puesta a tierra de cobre positivos. El potencial del conductor de acero cambia a valores más positivos. Así, también disminuye la diferencia de potencial entre los electrodos. Por lo tanto, la magnitud de la corriente de corrosión es también una función de las características de polarización de los electrodos.

La resistencia de polarización puede estimarse midiendo los potenciales de los electrodos de un circuito dividido. El circuito se divide para evitar la caída de tensión en el electrolito. Por lo general, para dichas mediciones se utilizan instrumentos de registro, ya que frecuentemente existe una rápida despolarización inmediatamente después de interrumpida la corriente de corrosión.

Si ahora se mide la fuerte polarización en el ánodo (el electrodo más negativo), es decir, si hay un cambio obvio a potenciales más positivos, habrá un alto riesgo de corrosión del ánodo.

Volvamos a nuestra celda de corrosión – acero (desnudo) en hormigón/acero, galvanizado en la arena (Figura 5.5.7.2.4). Con respecto a un electrodo de sulfato de cobre distante, es posible medir un potencial de celdas interconectadas de entre -200 y -800 mV. El valor exacto depende de la relación del área anódica a catódica y de la polaridad de los electrodos.

Si, por ejemplo, el área del cimientado de hormigón armado es muy grande en comparación con la superficie del conductor de acero galvanizado, se producirá en el último una densidad de corriente anódica alta, que se polariza a prácticamente el potencial de la armadura de acero y se destruye en un período de tiempo relativamente corto. Así, una polarización positiva alta indica siempre un mayor riesgo de corrosión.

En la práctica, obviamente, es importante conocer el límite sobre el cual un cambio de potencial positivo significa un riesgo elevado de corrosión. Lamentablemente para este caso, no es posible indicar un valor preciso que puede aplicarse, debido a que la influencia de las características del terreno es demasiado elevada. Sin embargo, sí es posible determinar los márgenes de desviación del potencial para suelos naturales.

Resumen:

Una polarización por debajo de +20 mV, por lo general, no es peligrosa. Los cambios de potencial que exceden de +100 mV son definitivamente peligrosos. Entre 20 y 100 mV siempre habrá casos en los que la polarización causará fenómenos de corrosión considerables.

A modo de resumen se puede concluir lo siguiente:

La condición previa para la formación de celdas de corrosión (celdas voltaicas) es siempre la presencia de ánodos y cátodos de metal conectados y electrolíticos que cierran el circuito conductivo.

Los ánodos y cátodos se forman a partir de:

⇒ Materiales

- Diferentes metales o diferentes condiciones de superficies de un metal (corrosión por contacto).
- Diferentes componentes estructurales (corrosión selectiva o intercrystalina).

⇒ Electrolitos:

- Diferente concentración (como por ejemplo, salinidad, ventilación).

En las celdas de corrosión, los campos anódicos siempre poseen un potencial de metal/electrolito más negativo que los campos catódicos.

Los potenciales de metal/electrolito se miden utilizando un electrodo de cobre/sulfato de cobre saturado dispuesto en los alrededores inmediatos del metal en el terreno o sobre éste. Si existe una conexión conductora metálica entre el ánodo y el cátodo, la diferencia de potencial produce una corriente continua en el electrolito que pasa desde el ánodo y se introduce en el electrolito disolviendo el metal antes de reingresar al cátodo.

Con frecuencia se aplica la “regla de superficies” para estimar la densidad de corriente anódica promedio I_A :

$$J_A = \frac{U_C - U_A}{\varphi_C} \cdot \frac{A_C}{A_A} \text{ in A/m}^2$$

J_A densidad media de la corriente anódica.

U_A, U_C Potenciales de ánodo o cátodo en V.

φ_C Resistencia de polarización específica del cátodo en m^2 .

A_A, A_C Superficies de ánodo o cátodo en m^2 .

La resistencia de polarización es la relación de la tensión de polarización y la corriente total de un electrodo mixto (un electrodo donde tiene lugar más de una reacción de electrodo).

En la práctica, es posible determinar las tensiones de excitación de celda $U_A - U_C$ y el tamaño de las superficies A_C y A_A como una aproximación para estimar la tasa de corrosión. Sin embargo, no se dispone con exactitud suficiente, de los valores de φ_A (resistencia de polarización específica de ánodo) y φ_C , sino que dependen de los materiales de los electrodos, los electrolitos y las densidades de corriente anódica y catódica.

Los resultados de los exámenes disponibles hasta ahora permiten concluir que φ_A es mucho más pequeño que φ_C .

Para φ_C se aplica lo siguiente:

Acero en tierra	Aprox. $1 \Omega m^2$
Cobre en tierra	Aprox. $5 \Omega m^2$
Acero en hormigón	Aprox. $30 \Omega m^2$

De la regla de superficies puede deducirse claramente que aparecen fuertes manifestaciones de corrosión tanto en conductores de acero recubiertos y depósitos de acero con pequeños puntos de fallo donde falta material en el recubrimiento protector conectados a con tomas de puesta a tierra de cobre, como en conductores de toma de tierra de acero cincado conectados a instalaciones de toma de tierra muy extensas de cobre o en cimientos de hormigón armado muy grandes.

Mediante la elección de materiales apropiados, pueden evitarse o reducirse considerablemente los riesgos por corrosión para tomas de tierra. Para conseguir una durabilidad suficiente hay que respetar las dimensiones mínimas de los materiales (Tabla 5.5.8.1).

5.5.7.3 Elección de los materiales para los electrodos de puesta a tierra

En la tabla 5.5.8.1 se enumeran los materiales y dimensiones mínimas que habitualmente se emplean en la actualidad en los electrodos de puesta a tierra.

Acero galvanizado por inmersión en caliente

El acero galvanizado por inmersión en caliente también es adecuado para empotrar en el hormigón. Las tomas de tierra de cemento, los electrodos de puesta a tierra y las conexiones equipotenciales de acero galvanizado en el hormigón, pueden conectarse con las armaduras metálicas.

Acero con revestimiento de cobre

En el caso del acero con recubrimiento de cobre, para el material del revestimiento se aplican las mismas observaciones que para el cobre desnudo. Sin embargo, el eventual daño que se infiera al recubrimiento de cobre, supone un elevado riesgo de corrosión del núcleo de acero; de ahí que siempre deba existir una capa de cobre cerrada completa y de grosor suficiente.

Cobre desnudo

El cobre desnudo es muy resistente debido a su posición en la calificación de aislamiento electrolítico. Asimismo, en combinación con electrodos de puesta a tierra u otras instalaciones en tierra realizadas con materiales "menos nobles", como por ejemplo, el acero, posee una protección catódica adicional. Ahora bien, a costa de los metales más "básicos".

Aceros inoxidables

Determinados aceros inoxidables de alta aleación de acuerdo con la norma EN 10088 son inertes y resistentes a la corrosión en el terreno. El potencial de corrosión libre de estos materiales en terrenos normalmente aireados se encuentra, en la mayoría de los casos, próximo al valor del cobre. Los materiales de tomas de tierra superficiales de acero inoxidable en el espacio de pocas semanas se comportan de forma neutral frente a otros materiales (nobles y menos nobles).

En base a múltiples mediciones se ha deducido que, únicamente un acero inoxidable de alta aleación con, por ejemplo el material número 1.4571, es suficientemente resistente a la corrosión en tierra.

Otros materiales

Se pueden utilizar otros materiales, si en determinados entornos son especialmente resistentes a la corrosión o si son equivalentes, como mínimo, a los materiales especificados en la tabla 5.5.8.1.

5.5.7.4 Combinación de tomas de tierra de diferentes materiales

La densidad de corriente de la celda resultante de la combinación de dos metales diferentes instalados en tierra para ser eléctricamente conductores lleva a la corrosión del metal que actúa como ánodo (Figura 5.5.7.4.1). Ello depende esencialmente de la relación entre el tamaño de la superficie catódica A_C respecto al tamaño de la superficie anódica A_A .

El proyecto de investigación "Comportamiento frente a la corrosión de materiales de tomas de tierra" ha

dado los siguientes resultados para la elección del material de la toma de tierra, especialmente en lo que se refiere a la interconexión de diferentes materiales:

Se espera un mayor grado de corrosión si la relación de las superficies es la siguiente:

$$\frac{A_C}{A_A} > 100$$

En general puede partirse del supuesto de que, el material con el potencial más positivo pasa a ser cátodo. El ánodo de un elemento de corrosión, efectivamente existente, puede reconocerse por el hecho de que, tras separarse la unión metálica conductora, presenta el potencial más negativo.

En conexión con instalaciones de acero tendidas en tierra (en terrenos que forman varias capas), los siguientes materiales de tomas de tierra, se comportan siempre catódicamente:

- cobre desnudo.
- cobre cincado.
- acero inoxidable de alta aleación.

Armados de acero del hormigón de cimentación

El armado de acero del hormigón de cimientos puede presentar un potencial muy positivo (similar al cobre). Por ello, las tomas de tierra y los conductores de tomas de tierra que se unen directamente con los armados del hormigón de grandes cimentaciones, deberían ser de acero inoxidable o cobre.

Esto es válido, sobre todo, para conductores de conexiones cortas situadas junto a los cimientos.

Instalación de vías de chispas de separación

Como ya hemos citado, es posible interrumpir la co-

Material con pequeña superficie	Material con gran superficie			
	Acero galvanizado	Acero zinc removal	Acero en hormigón	Cobre Acero inox.
Acero galvanizado	+	+	-	-
Acero	+	+	-	-
Acero en hormigón	+	+	+	+
Acero con rev. de Cu	+	+	+	+
Cobre/acero inox.	+	+	+	+
+ combinable		- no combinable		

Tabla 5.5.7.4.1 Combinaciones de material de sistemas de puesta a tierra para diferentes relaciones de superficie ($A_C > 100 \times A_A$).

nexión eléctrica entre instalaciones tendidas en tierra con potenciales muy diferentes, mediante el montaje de vías de chispas de separación. Normalmente, ya no es posible que fluyan corrientes de corrosión. Al producirse una sobretensión, se activa la vía de chispas de separación y conecta las instalaciones entre sí durante el tiempo que dure dicha sobretensión. Sin embargo, en las tomas de tierra de protección y de servicio no debe instalarse estas vías de chispas de separación, ya que estas tomas de tierra tienen que estar conectadas siempre con las instalaciones de servicio.

5.5.7.5 Otras medidas de protección contra la corrosión

Conductores de conexión de acero cincado de tomas de tierra de cimientos hacia conductores de bajada o derivadores.

Los conductores de conexión de acero cincado de tomas de tierras de cimientos hacia los derivadores o bajantes deben llevarse siempre en hormigón o en mampostería hasta por encima de la superficie del suelo.

Si los cables de unión se llevan por el terreno hay que utilizar acero cincado con revestimiento de hormigón o con recubrimiento de plástico, o bien habrá que utilizar banderolas de conexión con cable NYY, de acero inoxidable o puntos fijos de toma de tierra.

Los cables de toma de tierra pueden llevarse por dentro de la mampostería sin protección contra la corrosión.

Entradas en tierra de acero cincado

Las entradas en tierra de acero cincado tienen que protegerse contra la corrosión desde la superficie de la tierra hacia arriba y hacia abajo como mínimo 0,3 m.

Por lo general, las capas de asfalto no son suficientes. Sí ofrecen protección revestimientos que no absorban humedad, como por ejemplo, bandas de caucho o fundas termorretráctiles.

Conexiones y uniones subterráneas

Las superficies de corte y los puntos de conexión en el terreno tienen que estar diseñados de tal modo que sean equivalentes en su resistencia a la corrosión, con la capa de protección contra la corrosión del material de las tomas de tierra. Por eso los puntos de unión en la zona del suelo tienen que estar provistos de una capa protectora adecuada, por ejemplo recubrimiento con una banda de protección contra la corrosión.

Material	Configuración	Dimensiones mínimas			Observaciones
		Pica de Tierra Ø (mm)	Conductor de tierra	Placa de Tierra (mm)	
Cobre	Cableado ³⁾		50 mm ²		Diámetro mínimo de un alambre 1,7 mm
	Barra maciza redonda ³⁾		50 mm ²		Diámetro 8 mm
	Placa maciza ³⁾		50 mm ²		Espesor 2 mm
	Barra maciza redonda	15 ⁸⁾			
	Tubería	20			Espesor mínimo de pared 2 mm
	Placa maciza			500 x 500	Espesor mínimo 2 mm
	Placa tipo rejilla			600 x 600	25 mm x 2 mm de sección. Longitud mínima de una placa tipo rejilla: 4,8 m
Acero	Barra redonda maciza galvanizada ^{1), 2)}	16 ⁹⁾	Diámetro 10 mm		
	Tubería galvanizada ^{1), 2)}	25			Espesor mínimo de pared 2 mm
	Plancha galvanizada ¹⁾		90 mm ²		Espesor mínimo 3 mm
	Placa maciza galvanizada ¹⁾			500 x 500	Espesor mínimo 3 mm
	Placa tipo rejilla galvanizada ¹⁾			600 x 600	30 mm x 3 mm de sección.
	Barra redonda revestida en cobre ⁴⁾	14			Revestimiento de cobre 99,9% 250 µm
	Barra redonda desnuda ⁵⁾		Diámetro 10 mm		
	Placa maciza desnuda o galvanizada ^{5), 6)}		75 mm ²		Espesor mínimo 3 mm
Cableado galvanizado ^{5), 6)}		70 mm ²		Diámetro mínimo de un alambre 1,7 mm	
Acero Inoxidable ⁷⁾	Barra maciza redonda	15	Diámetro 10 mm		
	Placa maciza		100 mm ²		Espesor mínimo 2 mm

¹⁾ Los revestimientos deben ser lisos, continuos y libres de fundentes y manchas residuales, con un espesor mínimo de 50 µm para las barras redondas y 70 µm para las placas.
²⁾ Los materiales deben ser mecanizados antes del galvanizado.
³⁾ Puede ser también revestido en estaño.
⁴⁾ Es conveniente que el cobre esté unido al acero de forma íntima.
⁵⁾ Admitido solamente si se embuten completamente en el hormigón.
⁶⁾ Admitido solamente para la parte de la cimentación en contacto con la tierra, si se conecta correctamente por lo menos cada 5 m con las armaduras naturales de acero de la cimentación...
⁷⁾ Cromo ≥ 16%, níquel ≥ 5%, molibdeno ≥ 2%, carbono ≤ 0,08%.
⁸⁾ En algunos países, son admisibles valores de 12 mm.
⁹⁾ En algunos países, se utiliza el electrodo de tierra para conectar el conductor de bajada en el punto de entrada a tierra.

Tabla 5.5.8.1: Material, configuración y dimensiones mínimas de los electrodos de puesta a tierra, de acuerdo la Tabla 7 de la norma UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3)

Residuos agresivos

Al efectuar el relleno de zanjas y fosas en las que hay tendidas tomas de tierra, los electrodos de dispersión no deben entrar en contacto directo con escombros, residuos ni carbón.

5.5.8 Materiales y dimensiones mínimas para tomas de tierra

En la tabla 5.5.8.1 se exponen las secciones mínimas, formas y materiales para tomas de tierra.

5.6. Aislamiento eléctrico de la protección externa contra rayos – Distancia de separación

Existe un riesgo de descarga incontrolada (chispas) desde los elementos de la protección externa contra rayos a las instalaciones eléctricas y metálicas en el interior del edificio cuando no existe suficiente distancia entre los dispositivos captadores o derivadores y dichas instalaciones.

Instalaciones metálicas, como por ejemplo, tuberías de agua, conducciones de aire acondicionado, cables eléctricos, etc... originan tensiones de choque por bucles de inducción en el interior del edificio como consecuencia de la rápida evolución magnética del campo del rayo. Hay que impedir que, como consecuencia de estas tensiones de choque, se produzca una descarga incontrolada que pueda dar origen a un incendio.

Como consecuencia de una descarga, por ejemplo sobre un cable eléctrico, pueden originarse daños enormes en la instalación y en los consumidores a ella conectados. La **figura 5.6.1** representa el principio de la distancia de separación.

La fórmula para el cálculo de la distancia de separación no es fácil de aplicar.

La fórmula es:

$$s = k_i \frac{k_c}{k_m} \cdot l(m)$$

donde

k_i depende del nivel de protección elegido para la instalación de protección (Factor de inducción).

k_c depende de la disposición geométrica (coeficiente de distribución de la corriente).

k_m depende del material en el punto de aproximación (Factor de material).

l (m) Longitud a todo lo largo del dispositivo captador, o de la derivación, desde el punto a partir del cual se ha de determinar la distancia de separación hasta el punto más próximo de la compensación de potencial.

El coeficiente k_i (Factor de inducción) se aplica de acuerdo con el riesgo derivado de la pendiente de la corriente y en función del nivel de protección que corresponda.

El factor k_c toma en consideración la distribución de la corriente entre los diferentes derivadores de la protección externa contra rayos. En la norma se indican diferentes fórmulas para determinar k_c . Para conseguir, en la práctica, que se puedan obtener las distancias de separación sobre todo en edificios de mucha altura, se recomienda la instalación de anillos conductores, es decir, una malla de los derivadores. Con esta malla se consigue una simetría en el flujo de la corriente, lo que influye para la reducir la distancia de separación necesaria.

El factor de material k_m tiene en cuenta las características de aislamiento del entorno. A las características de aislamiento eléctrico del aire, en estos cálculos, se le asigna el factor 1. Todos los restantes materiales utilizados en la construcción (por ejemplo, mampostería,

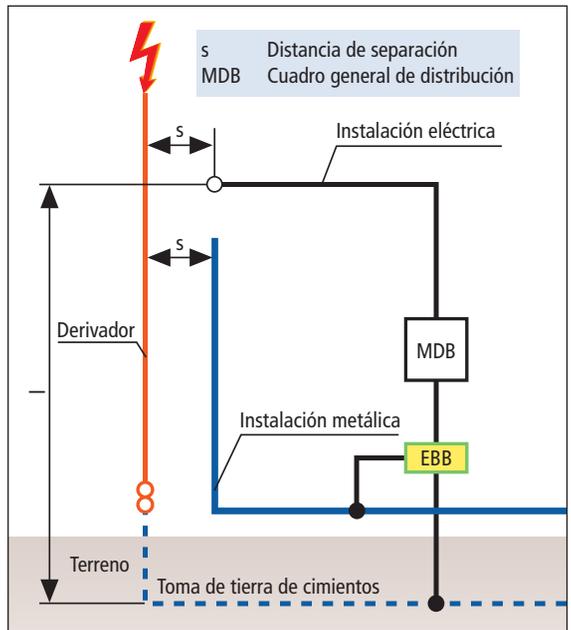


Fig. 5.6.1: Distancia de separación.

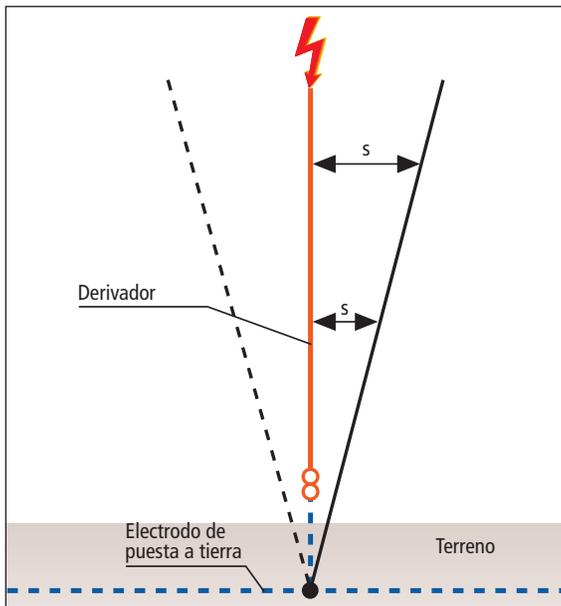


Fig. 5.6.2: Diferencia de potencial al aumentar la altura.

madera etc.) tienen una características de aislamiento inferior que el aire, de la mitad.

No se citan otros factores de material. Los valores que difieran de lo especificado tienen que demostrarse con ensayos técnicos. Para el material GFK (plástico reforzado con fibra de vidrio) utilizado en los productos de los dispositivos captadores aislados de DEHN + SÖHNE (Soporte de distanciador DEHNiso, DEHNiso Combi) se especifica el factor 0,7. Este factor puede aplicarse para los cálculos igual que otros factores de materiales.

La longitud "l" es la longitud real a lo largo del dispositivo captador o derivador, desde el punto que se ha de determinar la distancia de separación hasta la compensación de potencial más próxima, o hasta el nivel más próximo de compensación de potencial para la protección contra rayos.

Los edificios con equipotencialidad de protección contra rayos tienen próxima a la superficie del suelo una superficie equipotencial de la toma de tierra de cimientos o de la toma de tierra. Esta superficie es el nivel de referencia para la determinación de la distancia "l".

En el caso de edificios muy elevados, es necesario crear un nivel equipotencial de protección contra rayos, por ejemplo, a una altura de 20 m, realizando dicha compensación equipotencial para todos los cableados tan-

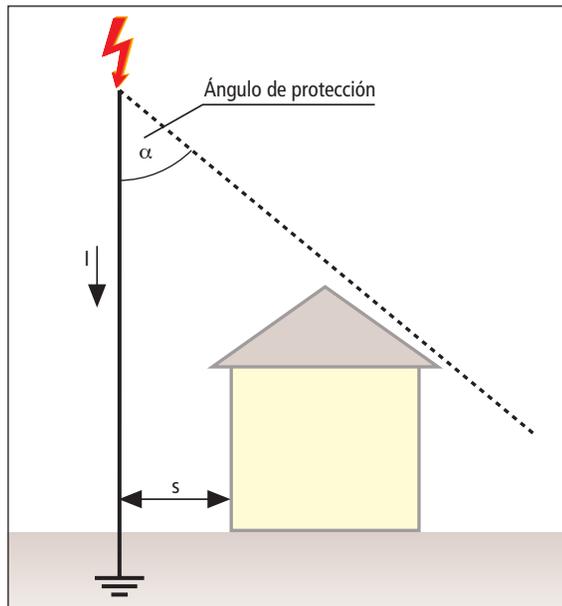


Fig. 5.6.3: Terminal de captación con $k_c = 1$.

to en líneas eléctricas como de datos, así como en todas las instalaciones metálicas. La equipotencialidad debe realizarse con dispositivos de protección del tipo 1.

Por lo demás, también en edificios elevados, como base para la longitud "l", debe utilizarse la superficie equipotencial de la toma de tierra de cimientos/toma de tierra como punto de referencia. Debido a estas elevadas alturas, en algunos edificios es difícil mantener las distancias de separación requeridas.

La diferencia de potencial entre las instalaciones del edificio y las derivaciones es igual a cero cerca de la superficie del suelo. Al aumentar la altura se incrementa la diferencia de potencial. Esto puede representarse como un cono invertido sobre la punta (**Figura 5.6.2**).

Por lo tanto, la distancia de separación que se ha de mantener, es mayor en la cubierta del edificio y va reduciéndose al aproximarse a la instalación de toma de tierra. Por este motivo, puede resultar necesario calcular varias veces la distancia con los derivadores dando como resultado distancias distintas.

El cálculo del coeficiente de distribución de la corriente k_c es a menudo complicado de realizar, a causa de diferentes estructuras. Si, por ejemplo, se instala un sólo terminal de captación junto a la edificación, toda la corriente del rayo fluye por este terminal captador y derivador. El factor k_c es por lo tanto igual a 1. La corriente de rayo, en este caso, no puede repartirse y

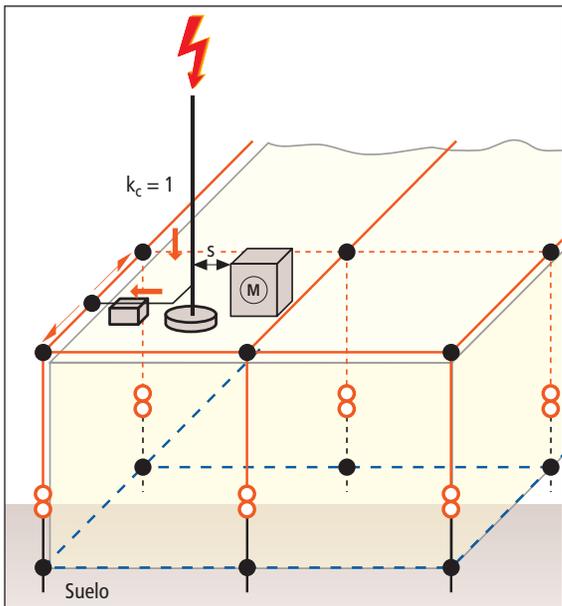


Fig. 5.6.4: Protección equipo de ventilación en cubierta.

por eso muchas veces resulta difícil mantener la distancia de separación. En la **figura 5.6.3** se muestra como puede lograrse si el terminal de captación se instala alejado del edificio.

La misma situación se da también en el caso de puntas captadoras para protección de estructuras en cubierta. La corriente de rayo sigue este camino definido al

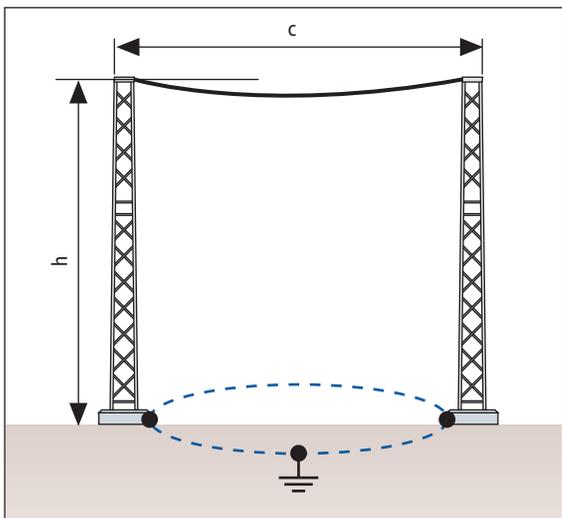


Fig. 5.6.5: Cálculo de K_c en caso de dos mástiles captadores conectados mediante un cable y toma de tierra del tipo B.

100% ($k_c = 1$) hasta la conexión más próxima de la punta captadora a la instalación captadora o a los derivadores.

Si se disponen dos mástiles captadores, la corriente de rayo puede repartirse por dos vías (**Figura 5.6.5**). La distribución o reparto no tiene lugar al 50% para cada vía, debido a las diferentes impedancias (longitudes) y debido a que el rayo no siempre descarga en el centro del dispositivo captador.

El caso más desfavorable es considerado en la fórmula con el cálculo del factor " k_c ". En este cálculo se considera una instalación de toma de tierra del tipo B. Si existen también tomas de tierra aisladas del tipo A, éstas deben conectarse entre sí.

$$k_c = \frac{h + c}{2h + c}$$

- h Longitud del derivador.
- c Distancia de los mástiles captadores entre sí.

El ejemplo siguiente muestra el cálculo del coeficiente en un tejado a dos aguas con dos derivadores (**Figura 5.6.6**). Existe una instalación de toma de tierra del tipo B (Toma de tierra circular o toma de tierra de cimientos).

$$k_c = \frac{9 + 12}{2 \cdot 9 + 12} = 0.7$$

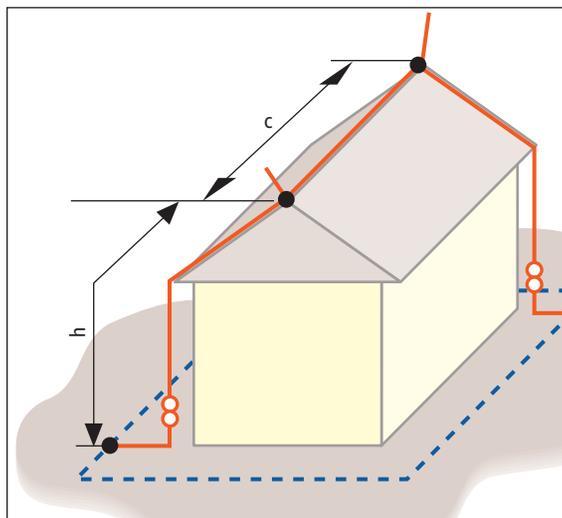


Fig. 5.6.6: Cálculo de K_c en caso de un tejado a dos aguas con 2 derivadores.

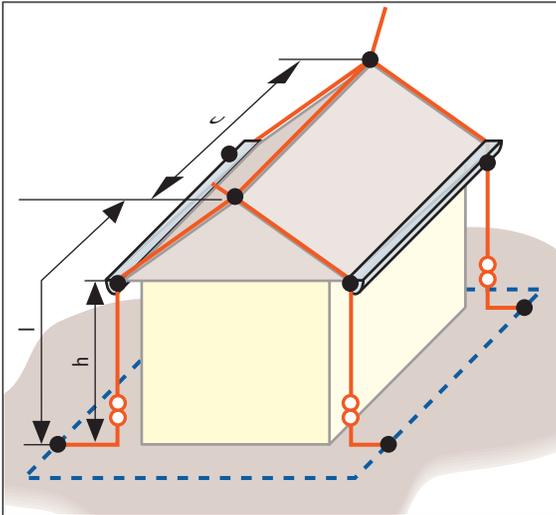


Fig. 5.6.7: Tejado a dos aguas con 4 derivadores.

La disposición de los derivadores según **figura 5.6.6**, no debería instalarse en una vivienda unifamiliar. Con la incorporación de otros dos derivadores, un total de 4, el coeficiente de distribución de corriente mejora notablemente (**Figura 5.6.7**).

Para el cálculo se aplica la fórmula siguiente:

$$k_c = \frac{1}{2n} + 0.1 + 0.2 \sqrt[3]{\frac{c}{h}}$$

siendo:

- h Longitud del derivador hasta el canalón del tejado del edificio, como punto más desfavorable para un impacto de rayo.
- c Distancia de los derivadores entre sí.
- n Número total de derivadores.

$$k_c = \frac{1}{2 \cdot 4} + 0.1 + 0.2 \sqrt[3]{\frac{12}{4}}$$

Resultado: $k_c \approx 0,51$

En edificaciones con tejados planos, el coeficiente de distribución de la corriente se calcula como sigue.

Se considera una disposición de toma de tierra tipo B (**Figura 5.6.8**).

$$k_c = \frac{1}{2n} + 0.1 + 0.2 \sqrt[3]{\frac{c}{h}}$$

siendo:

- h Distancia o altura sobre conductores circulares.
- c Distancia de un derivador al siguiente.
- n Número total de derivadores.

Las distancias entre las derivaciones se consideran iguales. Si la distancia es diferente, ha de tomarse como "c" la distancia mayor.

Si sobre el tejado plano se encuentran dispositivos eléctricos o lucernarios (**Figura 5.6.9**), deberán tenerse en cuenta dos coeficientes de distribución de la corriente para el cálculo de la distancia de separación. Para los captadores hasta la punta captadora siguiente se tiene un $k_c = 1$. El cálculo de los coeficientes de distribución de la corriente k_c para el recorrido posterior de los dispositivos captadores y derivaciones se efectúa como hemos expuesto arriba.

Para una mejor comprensión vamos a analizar la distancia de separación s para un tejado plano con estructuras sobre él.

Ejemplo:

En un edificio con un nivel de protección III se han construido lucernarios con accionamientos eléctricos.

Datos del edificio:

- ⇒ Largo 40 m.
- ⇒ Ancho 30 m.
- ⇒ Alto 14 m.
- ⇒ Sistema de puesta a tierra, toma de tierra de cimientos tipo B.
- ⇒ Número de derivadores: 12.
- ⇒ Distancia de las derivadores:
 - mínima: 10 m.
 - máxima: 15 m.
- ⇒ Altura de los lucernarios con accionamiento eléctrico: 1,5 m.

El cálculo del coeficiente de distribución de la corriente k_c para el edificio es como sigue:

$$k_c = \frac{1}{2 \cdot 12} + 0.1 + 0.2 \sqrt[3]{\frac{15}{14}}$$

Resultado: $k_c \approx 0,35$

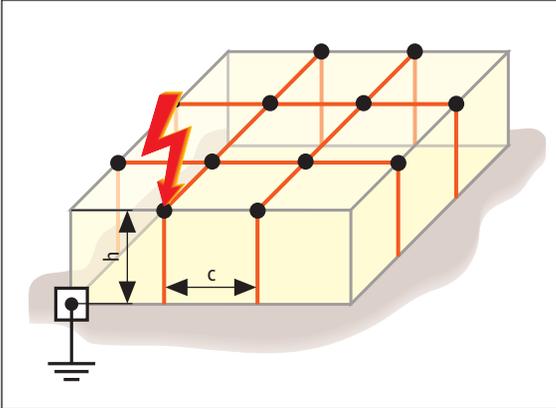


Fig. 5.6.8: Valores del coeficiente K_c en caso de una malla captadora y una toma de tierra tipo B.

El factor k_c para la barra captadora no tiene que calcularse, $k_c = 1$.

En relación con la distribución de corriente se considera que la punta captadora está posicionada sobre el borde del tejado y que no se encuentra dentro de la malla captadora. Si la punta captadora está dentro de la malla, deberá tenerse en cuenta adicionalmente la distribución de la corriente y la longitud mínima de la malla.

Cálculo de la distancia de separación para el borde superior del tejado del edificio:

Como factor de material k_m se supone material de construcción sólido $k_m = 0,5$.

$$s = 0.04 \frac{0.35}{0.5} 14(m)$$

Resultado: $s \approx 0,49m$

Cálculo de la distancia de separación para la punta captadora:

Por la posición de la punta captadora sobre el tejado plano, el factor de material es: $k_m = 0,5$

$$s = 0.04 \frac{1}{0.5} 1.5(m)$$

Resultado: $s \approx 0,15 m$

Esta distancia de separación calculada sería correcta si la punta captadora estuviera emplazada sobre la

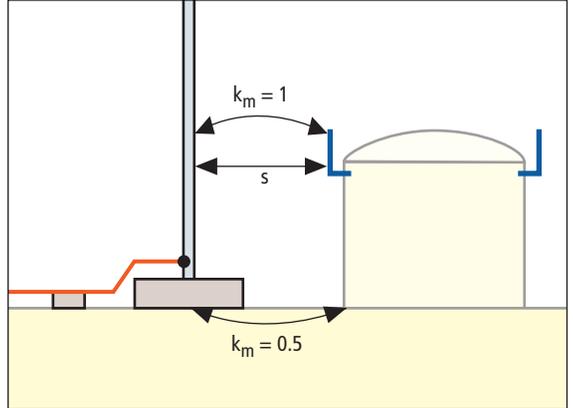


Fig. 5.6.9: Factores del material en una punta captadora sobre tejado plano.

superficie del terreno (Nivel de equipotencialidad para protección contra rayos).

Para obtener una distancia de separación completa y correcta, hay que sumar la distancia de separación del edificio.

$$S_{ges} = S_{edificio} + S_{barra\ captadora} = 0,49 m + 0,15 m$$

$$S_{ges} = 0,64 m.$$

Según este cálculo, en el punto más alto del lucernario hay que mantener una distancia de separación de 0,64 m en el aire. Este valor se ha determinado con el factor de material 0,5 para materiales sólidos y se ha efectuado la conversión para al aire.

Debido a la instalación de la punta captadora en un zócalo de hormigón sobre un techo (materiales sólidos), en el pie de la barra captadora no se da la "propiedad total de aislamiento" del aire. (Figura 5.6.9). En el pie del zócalo de hormigón, es suficiente una distancia de separación del edificio de 0,39 m (material sólido).

Si en edificios de gran altura se crean niveles de equipotencialidad de protección contra rayos a diferentes alturas, conectando para ello todas las instalaciones metálicas y todos los conductores eléctricos y de datos mediante descargadores de corriente de rayo (DPS tipo I), puede aplicarse el cálculo siguiente. Esto implica el cálculo de distancias hacia conductores que están tendidos en un nivel equipotencial, así como hacia los que están instalados a lo largo de varios niveles.

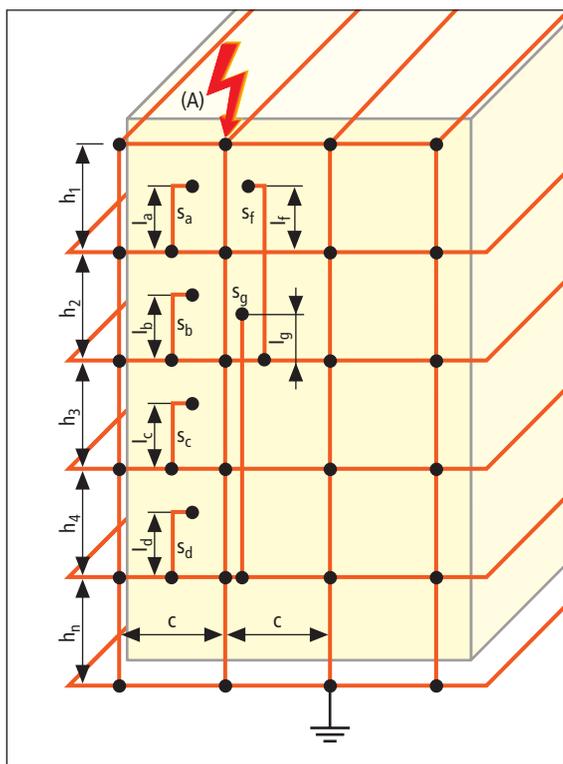


Fig. 5.6.10: Valores del coeficiente K_c en caso de una malla captadora, anillos perimetrales que unen los derivadores y una toma de tierra tipo B.

Esto supone un sistema de puesta a tierra en forma de toma de tierra de cimientos o anillo de tierra (tipo B) o una red mallada (Figura 5.6.10).

Como ya se ha indicado, pueden instalarse adicionalmente varios anillos perimetrales alrededor del edificio para un mejor reparto de la corriente de rayo y de este modo tener un efecto positivo sobre la distancia de separación. La figura 5.6.10 ilustra el principio de anillos perimetrales al edificio sin que se establezca un nivel equipotencial de protección contra rayos a la altura de los anillos mediante la utilización de descargadores de corrientes de rayo.

A cada uno de los segmentos se les asigna distintos coeficientes de distribución de corriente k_c . Si se desea determinar la distancia de separación para una estructura sobre el tejado, hay que basarse en la longitud total desde la superficie equipotencial de la toma de tierra hasta la parte superior de la estructura de tejado (suma de las longitudes parciales). Si se

pretende calcular la distancia total de separación S_{tot} hay que efectuar los cálculos con la fórmula siguiente:

$$S_{tot} = \frac{k_i}{k_m} (k_l \cdot l_{tot} + k_{c3} \cdot l_3 + k_{c4} \cdot l_4)$$

Con esta forma de ejecución de anillos perimetrales adicionales alrededor del edificio, no se conduce ningún tipo de corrientes parciales de rayo al interior del edificio.

Si, debido a un número elevado de derivadores y a los numerosos anillos perimetrales adicionales, no se pudiera mantener la distancia de separación para toda la instalación, existe la posibilidad de definir el perímetro superior del edificio como superficie equipotencial de protección contra rayos (+/-0). Esta superficie equipotencial sobre el nivel del cubierta, suele realizarse, por lo regular, en edificios muy elevados, donde es físicamente imposible mantener la distancia de separación.

En estos casos se incluyen en la compensación de potencial todas las instalaciones metálicas y todos los conductores eléctricos y de datos, mediante descargadores de corriente de rayo Tipo 1. Esta compensación de potencial se conecta también directamente con la protección externa contra rayos. Mediante estas medidas, descritas anteriormente, se igualan a cero las distancias de separación en el borde superior del edificio. El inconveniente de esta forma de ejecución es que, todos los conductores, instalaciones metálicas (p. ej. armados), carriles de ascensores, y también los descargadores son portadores de corriente de rayo. Las repercusiones y consecuencias de estas corrientes sobre sistemas eléctricos y de datos tienen que ser tenidas muy en cuenta al planificar la protección interna contra rayos.

5.7. Tensión de paso y de contacto

En las normas UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3) se hace referencia expresa a que, en casos especiales, fuera del edificio y en las proximidades de los derivadores, la tensión de contacto y la tensión de paso pueden ser peligrosas para la vida de las personas, aún cuando el sistema de protección contra rayos haya sido proyectado de acuerdo con el estado actual de la normativa.

Casos especiales, a título de ejemplo, son zonas con gran afluencia de personas, como teatros, cines, centros comerciales, guarderías infantiles, en los que, en ocasiones los derivadores e incluso las tomas de tierra se encuentran situados muy próximos a las personas.

En instalaciones de libre acceso o de pública concurrencia que estén especialmente expuestas al riesgo de descargas de rayos, puede ser necesario tomar medidas especiales para la limitación de las tensiones de paso y contacto.

En estos casos, se aplican controles de potencial, aislamiento de los emplazamientos y otras medidas que a continuación se van a describir. Estas medidas pueden combinarse entre sí.

Definición de tensión de contacto

La tensión de contacto es la tensión que actúa sobre una persona entre la superficie de posicionamiento sobre el terreno al tocar un derivador.

La vía de corriente va desde la mano, a través del cuerpo, hasta los pies (Figura 5.7.1).

El riesgo de una tensión de contacto elevada no existe en el caso de edificaciones construidas en estructuras de acero o de hormigón armado, siempre que los armados estén interconectados entre sí de forma segura o los derivadores estén instalados en el hormigón.

Asimismo, en el caso de fachadas metálicas, la tensión de contacto puede desprejarse si las fachadas están integradas en la compensación de potencial y/o se utilizan como componentes naturales de las derivaciones.

Si en zonas de riesgo (exterior de la instalaciones) hay hormigón armado bajo la superficie de tierra, el conexionado de este armado de manera segura a la toma de tierra de cimientos, permitirá mejorar considerablemente el desarrollo del embudo de potencial y actuar como control del potencial. Con esta medida es posible no tener que tomar en consideración la tensión de paso.

El riesgo de que una persona sufra daños al tocar un derivador, puede reducirse mediante las medidas siguientes:

⇒ Recubrir el derivador con de material aislante (mínimo 3 mm de polietileno

reticulado con una resistencia a la tensión de choque vertical de 100 kV 1,2/50 μ s).

⇒ Modificar la posición de los derivadores. Por ejemplo, no deben estar en la zona de acceso a la instalación.

⇒ Poner carteles de aviso o carteles de prohibición así como pensar en cierres o bloqueos de acceso.

⇒ Conseguir que la resistencia específica de la capa de superficie de la tierra a una distancia de hasta 3 metros alrededor del derivador no sea inferior a 5000 Ohmios m. Normalmente, esto se logra con una capa de asfalto de 5 cm de espesor o una capa de grava con un grosor de 15 cm.

⇒ Reducir el reticulado de las mallas de puesta a tierra mediante - Control de potencial.

Observación

Una canalón de recogida de aguas de lluvia, aún cuando esta tubería no esté definido como derivador, puede suponer un peligro para las personas en caso de contacto. En estos casos debe sustituirse la tubería metálica, por ejemplo, por una tubería de PVC (Altura: 3 m).

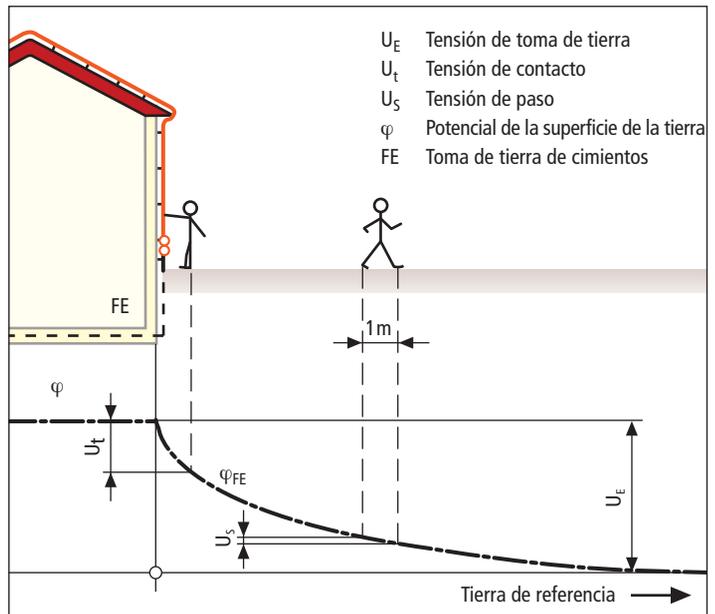


Fig. 5.7.1: Ilustración de la tensión de paso y de contacto.

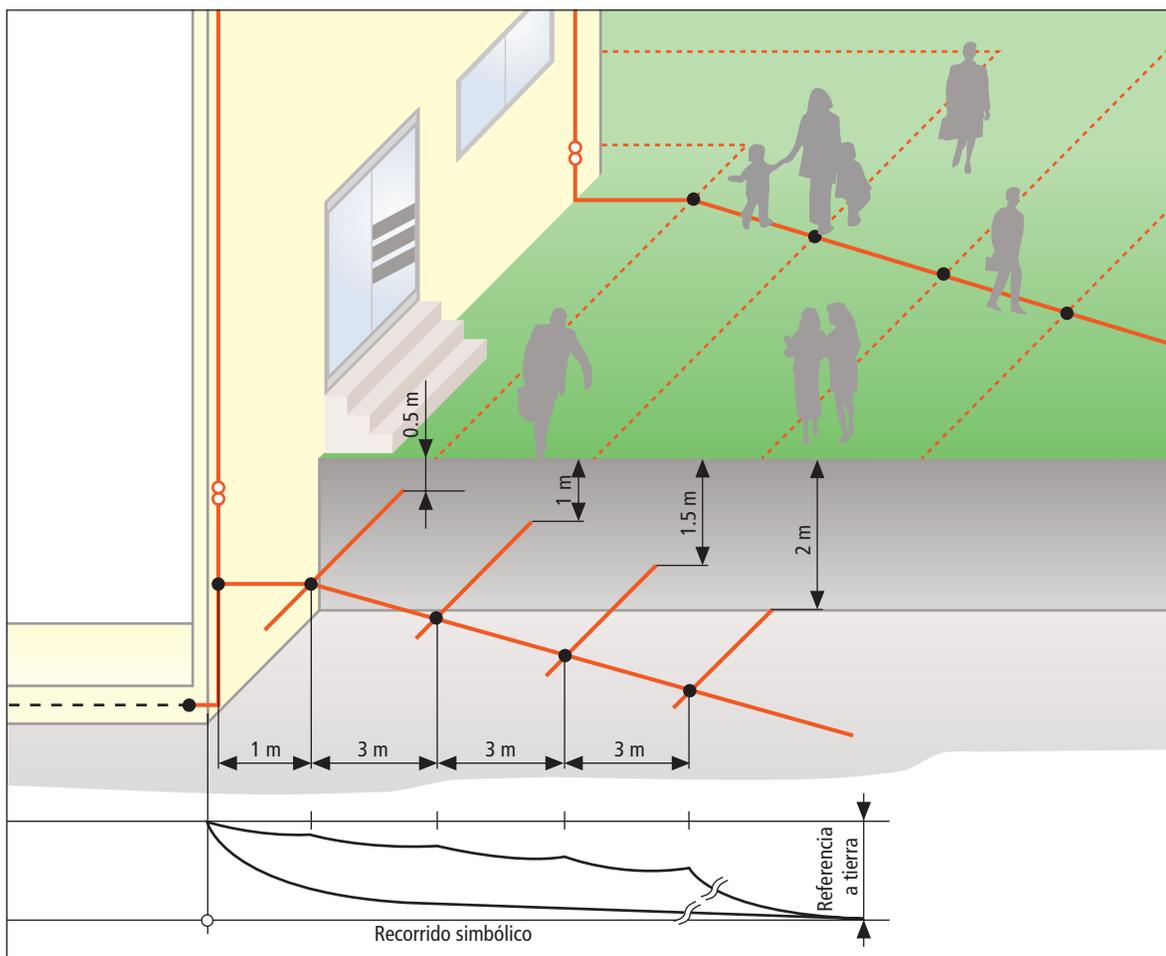


Fig. 5.7.2: Control de potencial. Ilustración y recorrido simbólico del área del gradiente.

Definición de la tensión de paso

La tensión de paso es la parte de la tensión de toma de tierra que puede aparecer en un cuerpo humano, al dar un paso de 1 metro de longitud, en cuyo caso la vía de corriente discurre a través del cuerpo humano desde un pie hasta el otro pie (Figura 5.7.1).

La tensión de paso depende de la forma del embudo de potencial.

Como puede verse en la ilustración, la tensión de paso decrece al aumentar la distancia al edificio. Con ello, el riesgo para personas se reduce al aumentar la distancia a la instalación.

Para la reducción de la tensión de paso pueden adoptarse las medidas siguientes:

- ⇒ Impedir el acceso de personas a las zonas de riesgo, por ejemplo mediante prohibición de paso o bloqueo de accesos.
- ⇒ Reducir el reticulado de las mallas de puesta a tierra mediante - Control de potencial.
- ⇒ Conseguir que la resistencia específica de la capa de superficie de la tierra a una distancia de hasta 3 metros alrededor del derivador no sea inferior a $5000 \Omega\text{m}$. Normalmente, esto se logra con una capa de asfalto de 5 cm de espesor o una capa de grava con un grosor de 15 cm.

Cuando en una zona peligrosa en las cercanías del edificio que se pretende proteger suelen reunirse con frecuencia muchas personas, debería preverse un

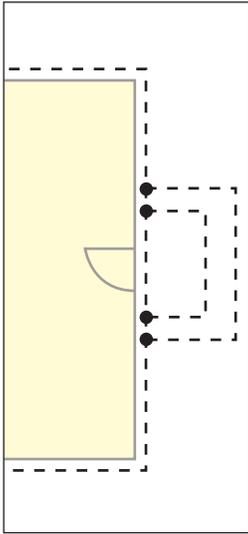


Fig. 5.7.3: Posible control de potencial en la zona de acceso a una instalación de obra.

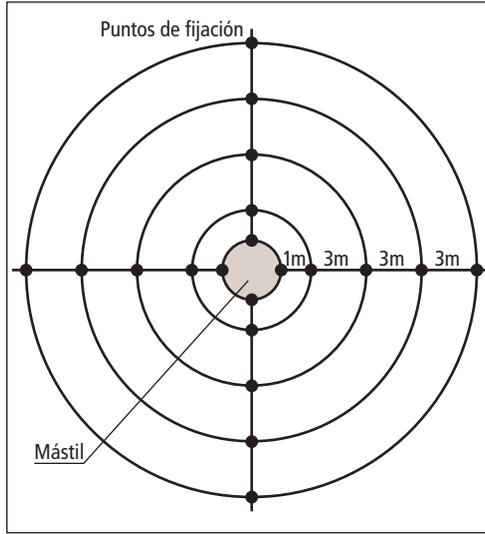


Fig. 5.7.4: Ejecución del control de potencial para torre de iluminación o para una torre de antenas de telefonía móvil.

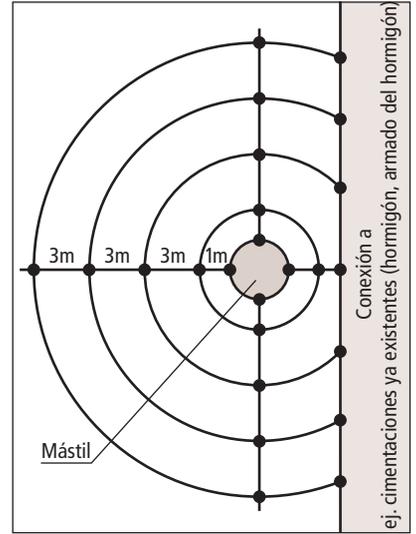


Fig. 5.7.5: Control de conexión al anillo de toma de tierra/toma de tierra de cimientos.

control de potencial para protección de estas personas.

El control de potencial es suficiente cuando la caída de tensión en la superficie de la tierra de la zona a proteger no supone más de 1 "Ohmio/m. Para ello debería instalarse, adicionalmente a una toma de tierra de cimientos existente, una toma de tierra circular a una distancia de 1 metro y a una profundidad de 0,5 metros.

Si en la edificación ya existe una instalación de toma de tierra perimetral, ésta ya puede considerarse como el "primer anillo" del control de potencial.

No obstante, se deberán instalar otros anillos de toma de tierra a una distancia de 3 metros de la primera toma de tierra y de las demás tomas de tierra. Será necesario un incremento de la profundidad de

	Distancia al edificio	Profundidad
1 anillo	1 m	0.5 m
2 anillo	4 m	1.0 m
3 anillo	7 m	1.5 m
4 anillo	10 m	2.0 m

Tabla 5.7.1: Distancia de los anillos y profundidades de los controles de potencial.

0,5 m en cada nueva tierra, en sentido creciente desde el edificio (Ver tabla 5.7.1).

Si se realiza un control de potencial para una instalación, deberá instalarse según se indica en las figuras 5.7.2 y 5.7.3).

Los derivadores han de conectarse con todos los anillos del control de potencial.

La conexión de cada uno de los anillos tiene que realizarse, como mínimo, dos veces (Figura 5.7.4).

Si los anillos de toma de tierra (tomas de tierra de control) no pueden ejecutarse en forma circular, deberán conectarse sus extremos con los otros extremos de las tomas de tierra circulares. Deben realizarse, al menos, dos conexiones en el interior de cada anillo (Figura 5.7.5).

Al elegir los materiales para los anillos de toma de tierra es necesario tener muy en cuenta la posible carga ocasionada por la corrosión (Capítulo 5.5.7).

Teniendo en cuenta los procesos galvánicos de los elementos entre las tomas de tierra de cimientos y de los anillos de toma de tierra, una opción muy recomendable es el empleo de material NIRO V4A (Nr. de material 1.4571).

Las anillos de toma de tierra pueden realizarse como conductor redondo o varilla de 10 mm de diámetro o pletinas de de 30 mm x 3,5 mm.

5.7.1 Control de la tensión de contacto en derivadores de instalaciones de protección contra rayos

La zona de riesgo en términos de tensiones de paso y de contacto para personas que se encuentren fuera de un edificio, viene definida por una distancia de 3 metros al mismo y por una altura máxima de otros tres. Esta zona a proteger se corresponde en su altura con la máxima altura alcanzable por una persona con el brazo extendido más una distancia de separación adicional. (Figura 5.7.1.1).

En zonas de acceso con gran afluencia de personas, como teatros, cines, centros comerciales, guarderías infantiles, etc... en los que se encuentran situados muy próximos derivadores y tomas de tierra, se requieren medidas especiales de protección.

En instalaciones especialmente expuestas (al riesgo de rayos), que sean de libre acceso (por ejemplo refugios), puede ser necesario tomar medidas especiales para la limitación de las tensiones de contacto.

Por otra parte, en el análisis de riesgos de una instalación, según UNE EN 62305-3 (IEC 62305-3) es necesario considerar el riesgo de personas como parámetro L1 (Lesiones o muerte de personas).

El peligro derivado de las tensiones de contacto puede reducirse adoptando las medidas siguientes:

- ⇒ Recubrir los derivadores con material aislante (mínimo 3 mm de polietileno reticulado con una resistencia a la tensión de choque vertical de 100 kV 1,2/50 μ s).

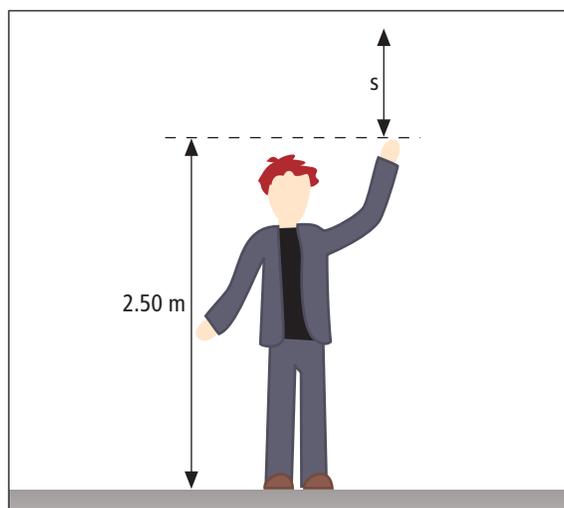


Fig. 5.7.1.1: Zona a proteger para una persona.

- ⇒ Modificar la posición de los derivadores. Así, por ejemplo, no deben instalarse en la zona de acceso a la instalación.
- ⇒ Conseguir que la resistencia específica de la capa de superficie de la tierra a una distancia de hasta 3 metros alrededor del derivador será como mínimo de 5000 Ohmios m.
- ⇒ Reducir la probabilidad del agrupamiento de personas mediante carteles de aviso o carteles de prohibición. También es posible pensar en cierres o bloqueos de acceso.

Las medidas de protección contra tensiones de contacto no siempre son suficientes para una protección efectiva de las personas en cada caso. Así, por ejemplo, la exigencia de un revestimiento con un aislamiento resistente eléctrico a altas tensiones, para un derivador expuesto, no es suficiente si, al mismo tiempo, no se adoptan medidas de protección contra saltos de chispa en la superficie del aislamiento. Esto tiene especial relevancia cuando las influencias medioambientales como la lluvia (humedad) también deben tenerse en cuenta.

Al igual que en un derivador desnudo, en un derivador aislado se produce una elevada tensión en caso de una descarga de rayo. Esta tensión, sin embargo, se mantiene separada de las personas por su aislamiento.

Como el cuerpo humano puede considerarse un buen conductor en comparación con el material aislante, la capa de aislamiento es sometida prácticamente a toda la tensión de contacto. Si el aislamiento no soporta la tensión, una parte de la corriente de rayo puede fluir a tierra a través del cuerpo humano, igual que en el caso de un derivador desnudo. Para garantizar una protección segura de las personas frente a tensiones de contacto, es absolutamente imprescindible impedir, tanto la penetración a través del aisla-

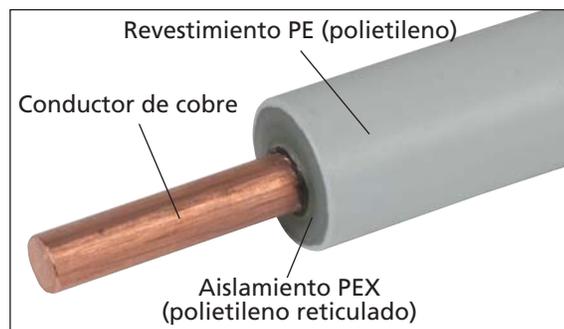


Fig. 5.7.1.2: Estructura del conductor CUI.



Fig. 5.7.1.3: Prueba de tensión vertical bajo lluvia.

miento como un salto de chispa por el recorrido del mismo.

Una solución a este problema es el conductor CUI que cumplen con las exigencias de resistencia de aislamiento y saltos de chispa requeridas para la protección contra tensiones de contacto.

Estructura del conductor CUI

El conductor CUI está formado por un conductor interior de cobre con una sección de 50 mm², y recubierto por una capa aislante de polietileno (PEX) reticulado resistente a tensiones de choque con un grosor de aprox. 6 mm (Figura 5.7.1.2).

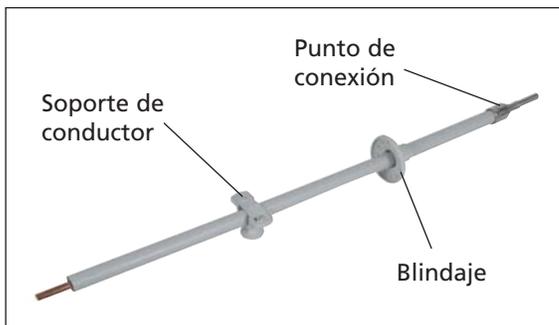


Fig. 5.7.1.4: Conductor CUI.

Para dotarle de una protección contra influencias externas, el conductor aislado está recubierto adicionalmente con una delgada capa de polietileno (PE). El derivador aislado se tiende por toda la zona de riesgo, es decir, 3 metros por encima de la superficie de la tierra. El extremo superior del conductor se conecta con el derivador procedente del dispositivo captador, mientras que el extremo inferior se conecta a la instalación de toma de tierra.

Además de la resistencia eléctrica de aislamiento, hay que considerar asimismo el riesgo de saltos de chispas entre el punto de conexión a los derivadores desnudos y la mano de la persona que lo toca. Este problema de salto de chispa, ya conocido en la técnica de alta tensión, se agrava aún más en caso de lluvia. Mediante ensayos se ha demostrado que, un derivador aislado, sin medidas adicionales, en un tramo de más de 1 metro puede sufrir saltos de chispas en caso de lluvia. Con la disposición de un blindaje apropiado en el derivador aislado, se crea en el conductor CUI una zona suficientemente seca que impide el salto de chispas a lo largo de la superficie del aislamiento. Con las pruebas de tensión vertical bajo la lluvia según IEC 60060-1 se demostró la seguridad de servicio del conductor CUI, tanto en lo que se refiere a la seguridad frente aislamiento eléctrico, como al saltos de chispa con tensiones de impulso de hasta 100 kV (1,2/50 Micros). Para estas pruebas de lluvia, se rocía sobre el conductor una cantidad definida de agua con una conductividad determinada y con un ángulo de rociado de aprox. 45°.

El conductor CUI está prefabricado con un elemento de conexión para conectar al derivador (punto de separación), y puede acortarse en la propia instalación para la conexión con la toma de puesta a tierra. Este producto puede adquirirse con una longitud de 3,5 m y 5 m y con los soportes de anclaje necesarios en plástico o metálicos. (Figura 5.7.1.4).

Con el conductor especial CUI, las medidas para el control de las tensiones de contacto en derivadores resultan sencillas y con reducidos gastos de instalación, minimizando considerablemente el peligro para personas en zonas especialmente expuestas.

Acoplamiento inductivo con grandes pendientes de corriente

En relación con el riesgo para las personas, debe tenerse también en cuenta el campo magnético del dispositivo y las repercusiones sobre el entorno más próximo del derivador.

En bucles de instalación muy extensos pueden aparecer en las proximidades de la derivación, tensiones de varios 100 kV, que pueden ocasionar elevadas pérdidas económicas. También el cuerpo humano, debido a sus características conductivas, forma un bucle junto con el derivador y la zona del terreno conductora con una inductancia mutua M , en la que se pueden inducir tensiones muy elevadas U_i . (Figuras 5.7.1.5a. y 5.7.1.5b). En esta situación el sistema derivador - persona actúa como un transformador.

Esta tensión acoplada se encuentra en el aislamiento, ya que el cuerpo humano y la zona del suelo, en principio, pueden suponerse como conductores. Si la carga de tensión es demasiado elevada, puede originar una descarga o salto de chispas del aislamiento. La tensión inducida conduce entonces por este bucle una corriente, cuya magnitud depende de las resistencias y de la propia inductividad del bucle, pudiendo resultar mortalmente peligrosa para la persona afectada. El aislamiento, por tanto, tiene que poder soportar estas cargas de tensión. Los valores de la norma de 100 kV en 1,2/50 micros, incluyen impulsos de tensión, muy elevados pero muy cortos, que únicamente están aplicados durante la elevación de la

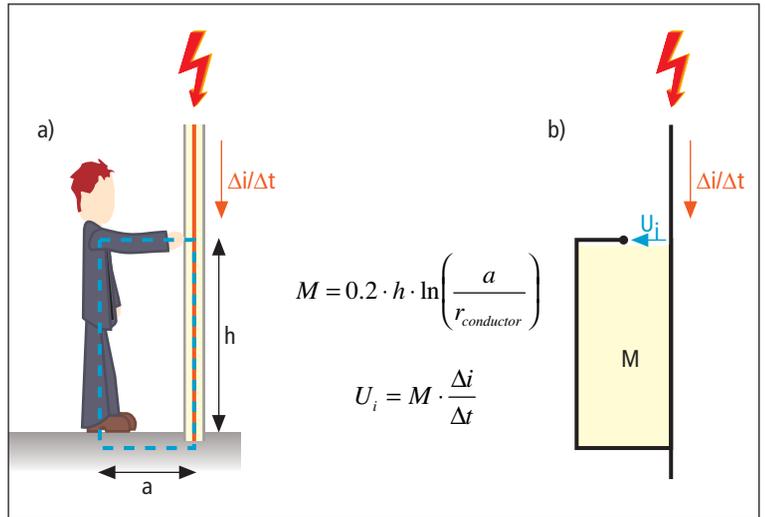


Fig. 5.7.1.5: a) Bucle derivador-persona
 b) Inductancia mutua M y tensión inducida U_i .

corriente (0,25 micros con rayo consecutivo negativo). Al aumentar la profundidad de empotramiento de los derivadores aislados, el bucle se hace más grande y con ello la inductancia mutua. De este modo se incrementa, en la medida correspondiente, la tensión inducida y los esfuerzos a que es sometido el aislamiento. Tras estas consideraciones el acoplamiento inductivo es algo que debe ser tenido muy en cuenta.