



Coordinación del Aislamiento

Prof. Juan Bautista UNI - FIEE

Exposición para uso estrictamente académico y por tanto no se comercializa, y preparada tomando como base el Proyecto de Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Electricista de la candidata: Náthali Morales Mariño, de la Escuela Politécnica Nacional de Quito - Ecuador



Elementos de Protección ante Sobretensiones

Prof. Juan Bautista

Los elementos para protección contra sobretensiones protegen a los equipos eléctricos contra tensiones transitorias, descargando a tierra las corrientes de impulso, permitiendo la circulación de la corriente de frecuencia industrial posterior al transitorio (corriente subsiguiente) y con la capacidad de repetir su función.

Funciones del dispositivo de protección:

- *Comportarse como un aislador* mientras la tensión aplicada no supere un valor determinado, superior a la tensión máxima del sistema.
- *Comportarse como un conductor para descargar a tierra* la onda de corriente producida por la sobretensión.
- *Interrumpir la conducción de la corriente a tierra una vez que la sobretensión ha desaparecido* del sistema y se ha restablecido la tensión nominal.
- *No debe operar con sobretensiones temporales* a frecuencia industrial.

Las tensiones y sobretensiones a considerarse con respecto al uso de los dispositivos de protección son:

- ☐ Tensión normal de funcionamiento (tensión más elevada del sistema).
- ☐ Sobretensiones temporales (TOV),
- ☐ Sobretensiones de frente lento (sobretensiones por maniobra),
- ☐ Sobretensiones de frente rápido (sobretensiones atmosféricas).

Sobretensiones : rangos de duración y amplitud y la relación entre ellas con las tensiones limitadas por el pararrayos y las tensiones soportadas por el aislamiento del equipo.

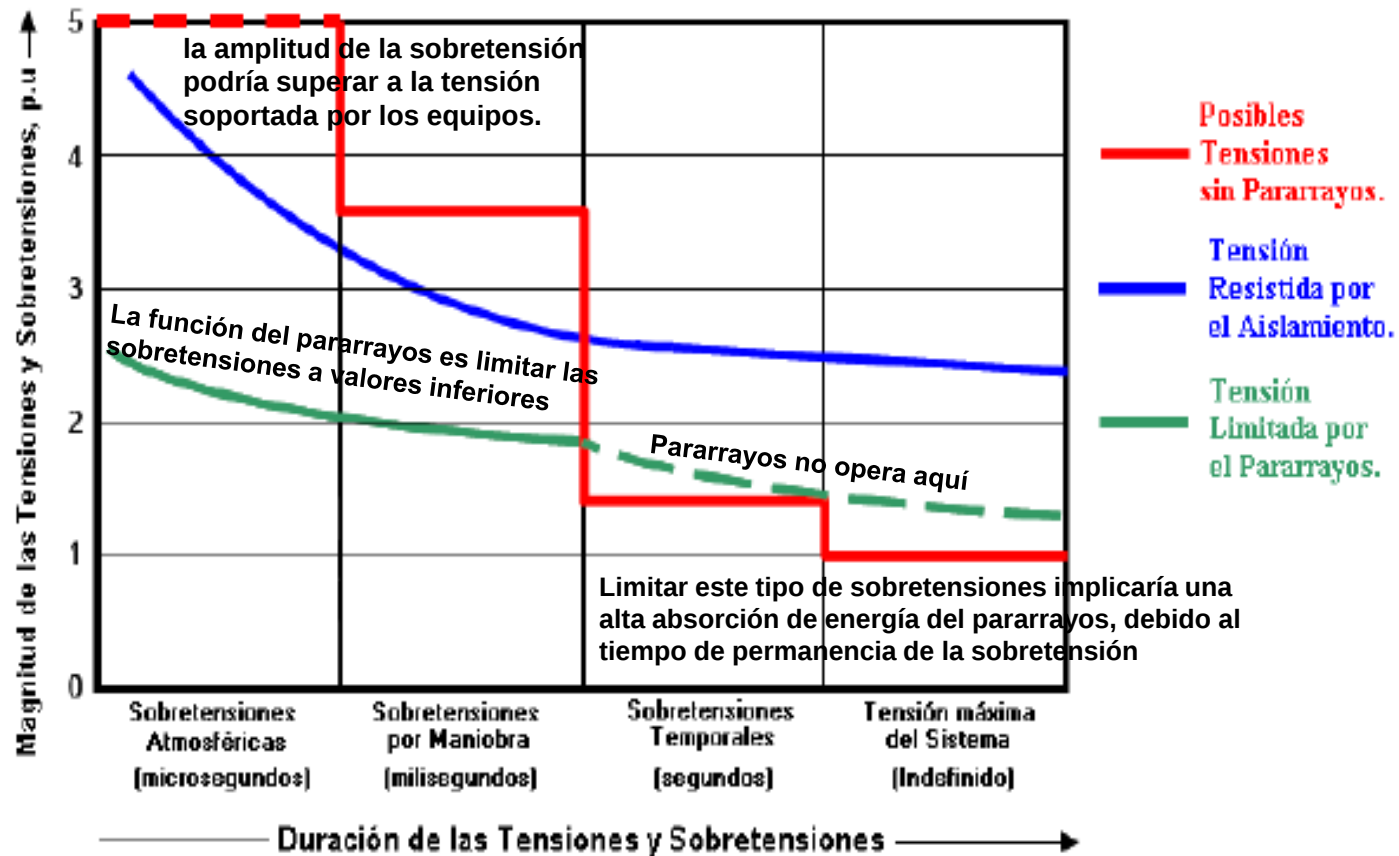


Table 2 – Standard insulation levels for range I
(1 kV < $U_m \leq 245$ kV)

Highest voltage for equipment U_m kV (r.m.s. value)	Standard short-duration power-frequency withstand voltage kV (r.m.s. value)	Standard lightning impulse withstand voltage kV (peak value)
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
17,5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170
52	95	250
72,5	140	325
123	(185) 230	450 550
145	(185) 230 275	(450) 550 650
170	(230) 275 325	(550) 650 750
245	(275) (325) 360 395 460	(650) (750) 850 950 1 050

NOTE – If values in brackets are considered insufficient to prove that the required phase-to-phase withstand voltages are met, additional phase-to-phase withstand tests are needed.

Table 3 – Standard insulation levels for range II
($U_m > 245$ kV)

Highest voltage for equipment U_m kV (r.m.s. value)	Standard switching impulse withstand voltage			Standard lightning impulse withstand voltage kV (peak value)
	Longitudinal insulation (note 1) kV (peak value)	Phase-to-earth kV (peak value)	Phase-to-phase (ratio to the phase-to-earth peak value) kV	
300	750	750	1,50	850 950
	750	850	1,50	950 1 050
362	850	850	1,50	950 1 050
	850	950	1,50	1 050 1 175
420	850	850	1,60	1 050 1 175
	950	950	1,50	1 175 1 300
	950	1 050	1,50	1 300 1 425
	950	950	1,70	1 175 1 300
525	950	1 050	1,60	1 300 1 425
	950	1 175	1,50	1 425 1 550
	950	950	1,70	1 175 1 300
765	1 175	1 300	1,70	1 675 1 800
	1 175	1 425	1,70	1 800 1 950
	1 175	1 550	1,60	1 950 2 100

NOTES

- Value of the impulse component of the relevant combined test.
- The introduction of $U_m = 550$ kV (instead of 525 kV), 800 kV (instead of 765 kV), 1 200 kV, of a value between 765 kV and 1 200 kV, and of the associated standard withstand voltages, is under consideration.

En subestaciones con voltajes correspondientes al Rango II, a diferencia de los sistemas del Rango I, *a más de las sobretensiones por descargas atmosféricas directas sobre las líneas se debe considerar las sobretensiones por maniobra, puesto que éstas alcanzan magnitudes importantes* conforme aumenta la tensión nominal del sistema.

De aquí que, en subestaciones con $U_N=500\text{kV}$, la presencia de sobretensiones atmosféricas o de maniobra pone en riesgo al equipo y por tanto al suministro de energía.

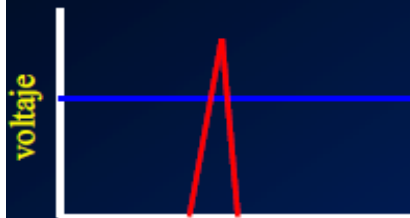
Existen dos tipos de elementos de protección estandarizados de acuerdo con la Norma IEC 71-2:

- ☐ Pararrayos tipo resistencia no lineal con explosores en serie.
- ☐ Pararrayos de oxido metálico (óxido de zinc) sin explosores.

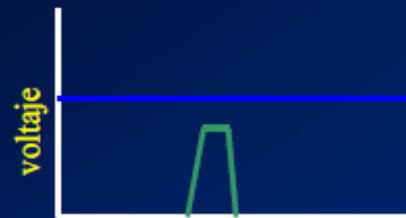
No son la única alternativa de protección.

¿Por qué son necesarios los pararrayos?

Sin pararrayos

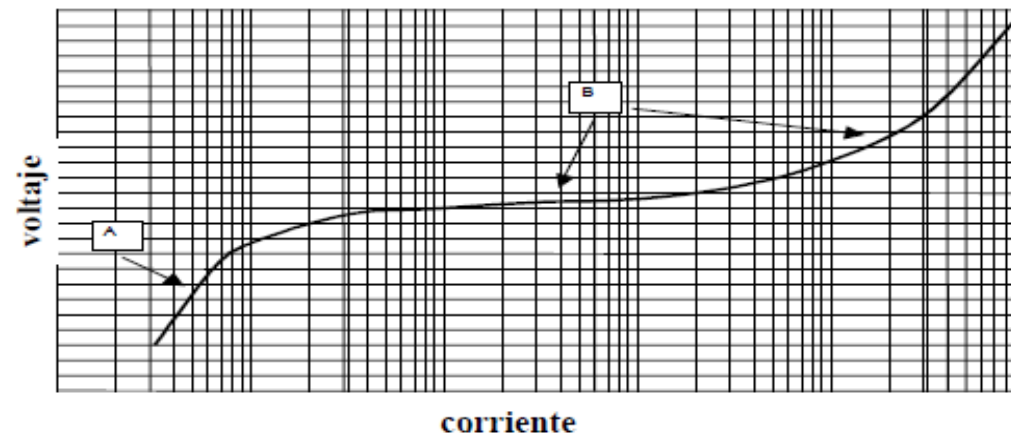


Con pararrayos



- BIL del transformador
- Sobretensión sin pararrayos
- Sobretensión con pararrayos

Característica U-I del Pararrayos de ZnO



En sistemas con neutros sólidamente conectados a tierra y con poca presencia de sobretensiones temporales, el uso de pararrayos de óxido metálico sin explosores se ha extendido en gran manera, debido a su característica de protección superior ante sobretensiones de frente lento.

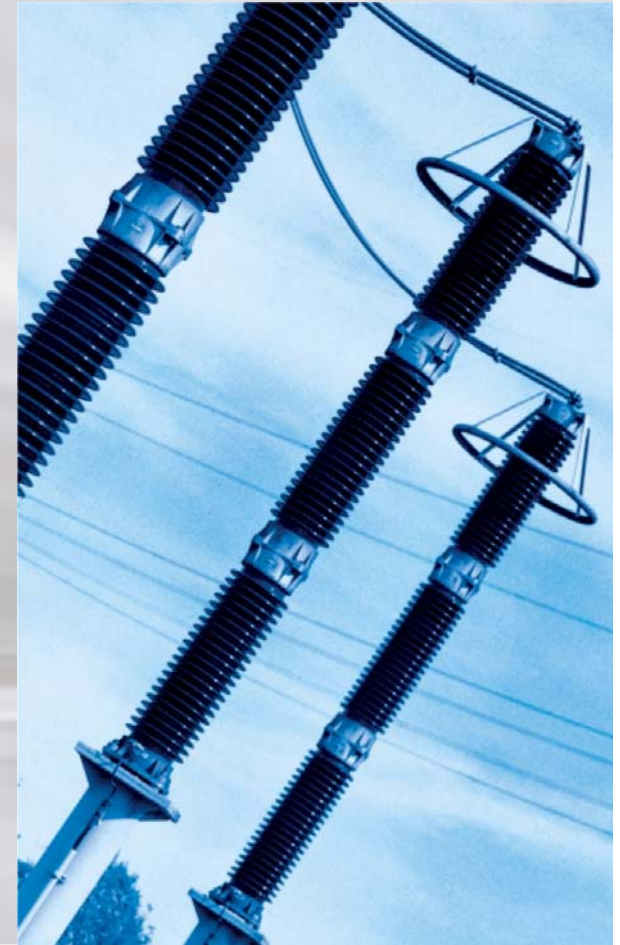
Los pararrayos con explosores se adaptan mejor para la protección de sistemas con neutro aislado o con conexión a tierra resonante, en los que las sobretensiones temporales debidas a fallas a tierra pueden llegar a ser de larga duración. Así como para la protección de redes en el Rango I y en particular en sistemas con tensiones correspondientes a las más bajas de este rango. Sin embargo, en la actualidad los pararrayos de óxido de zinc son los más usados, razón por la cual han desplazado a los pararrayos basados en explosores que casi ya no se fabrican y están saliendo del mercado.

Por ejemplo si el sistema en estudio corresponde a 500 kV (Rango II), y con neutro sólidamente conectado a tierra, el dispositivo de protección contra sobretensiones compatible con las características del sistema es el pararrayos de óxido metálico sin explosores.

1. PARARRAYOS DE ÓXIDO METÁLICO SIN EXPLOSORES. (SEGÚN NORMAS IEC)

Se basan en el uso de resistencias de óxido metálico, en su gran mayoría, óxido de zinc.

La principal característica de las resistencias de óxido metálico es la extrema no linealidad de su relación voltaje – corriente.

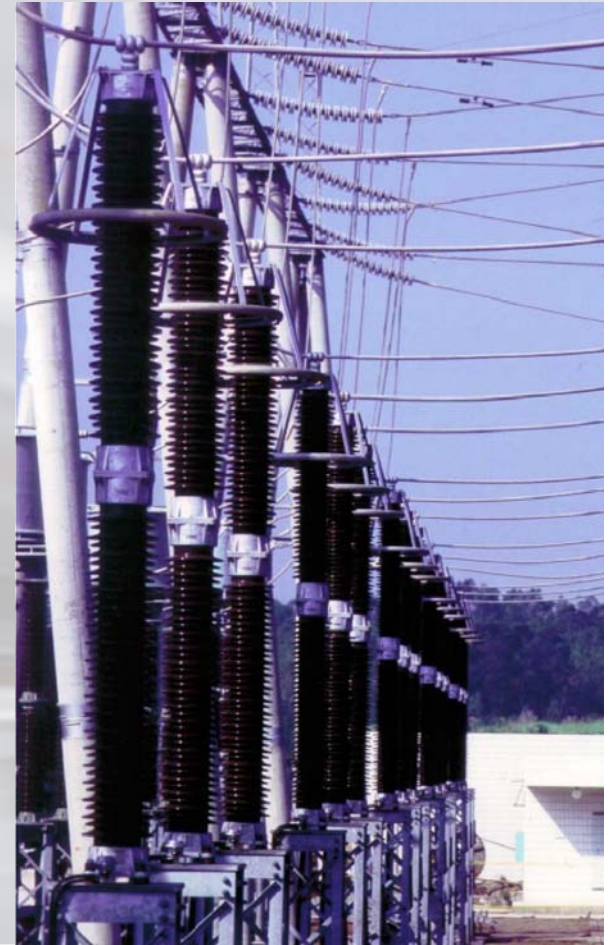


Por tanto, el comportamiento del pararrayos varia según la corriente que circule a través de él.

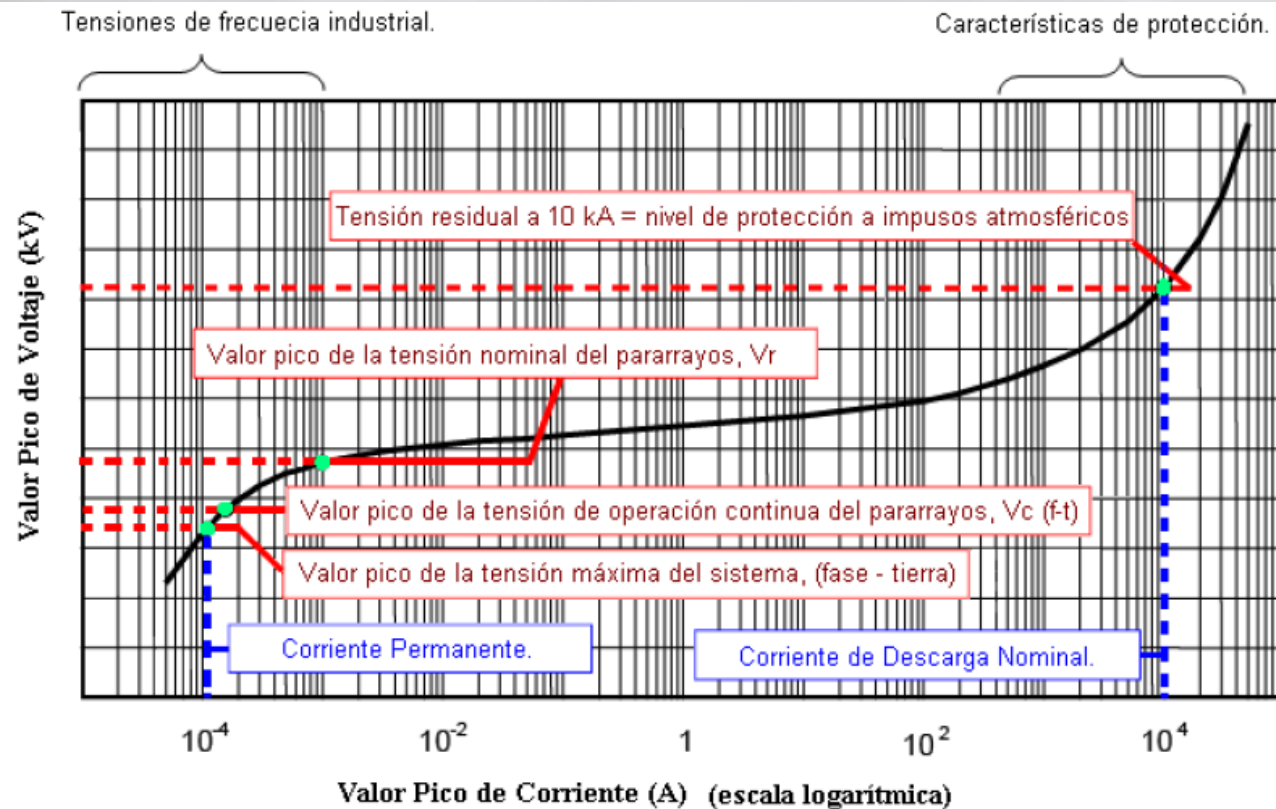
Y las corrientes a través del pararrayos en condiciones de tensión de frecuencia industrial serán tan pequeñas que se comporta como un aislador.



Al contrario, si las corrientes que circulan a través del pararrayos son corrientes de impulso en el orden de kAmp, (corrientes debido sobretensiones atmosféricas o de maniobra), el pararrayos se comporta como un conductor, descargando a tierra estas corrientes y haciendo que la tensión resultante en sus terminales no sea excesivamente alta.



Curva voltaje – corriente para un pararrayos de óxido metálico, en donde se puede apreciar la no linealidad.



Característica voltaje – corriente de un pararrayos con nivel de protección a impulsos atmosféricos a corriente de descarga de 10 kA [15].

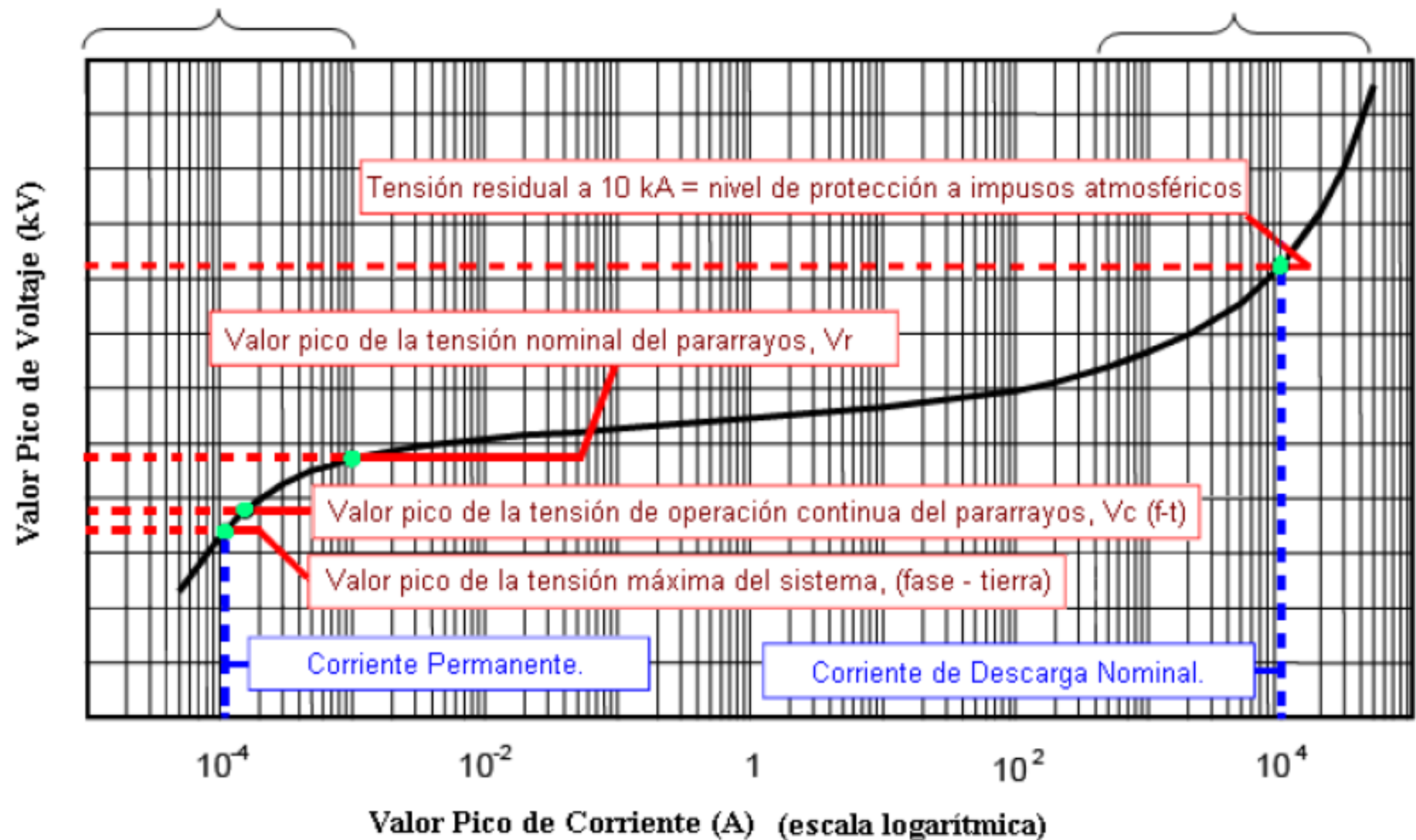


En la Figura siguiente se identifican dos zonas de operación del pararrayos, la primera esta relacionada con tensiones de frecuencia industrial en la zona de bajas corrientes y la otra corresponde a la zona de protección, en donde se tiene corrientes altas (orden de kA), debidas a las sobretensiones.

Pararrayos 800kV

Tensiones de frecuencia industrial.

Características de protección.



Característica voltaje – corriente de un pararrayos con nivel de protección a impulsos atmosféricos a corriente de descarga de 10 kA

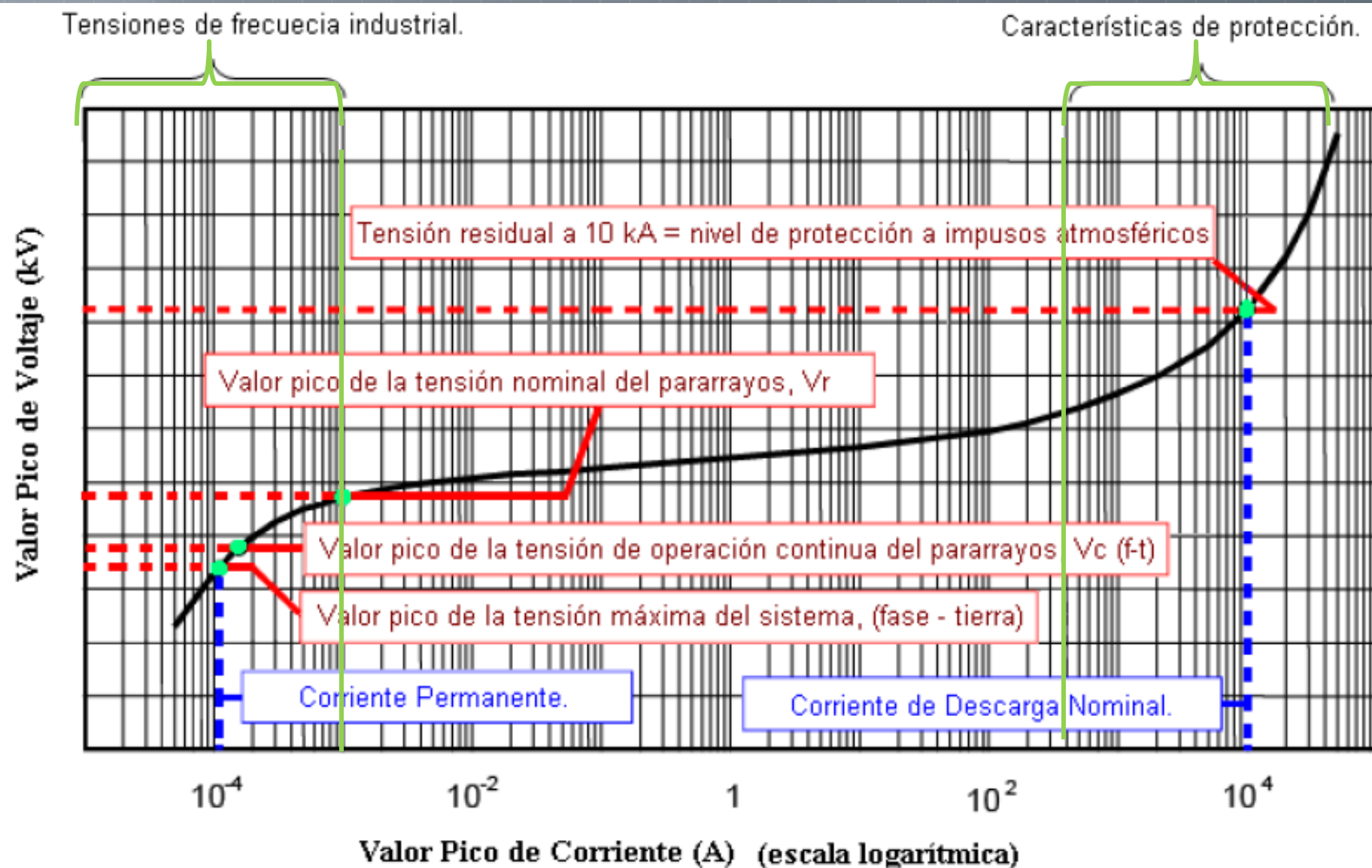


Figura 2.18. Característica voltaje – corriente de un pararrayos con nivel de protección a impulsos atmosféricos a corriente de descarga de 10 kA [15].

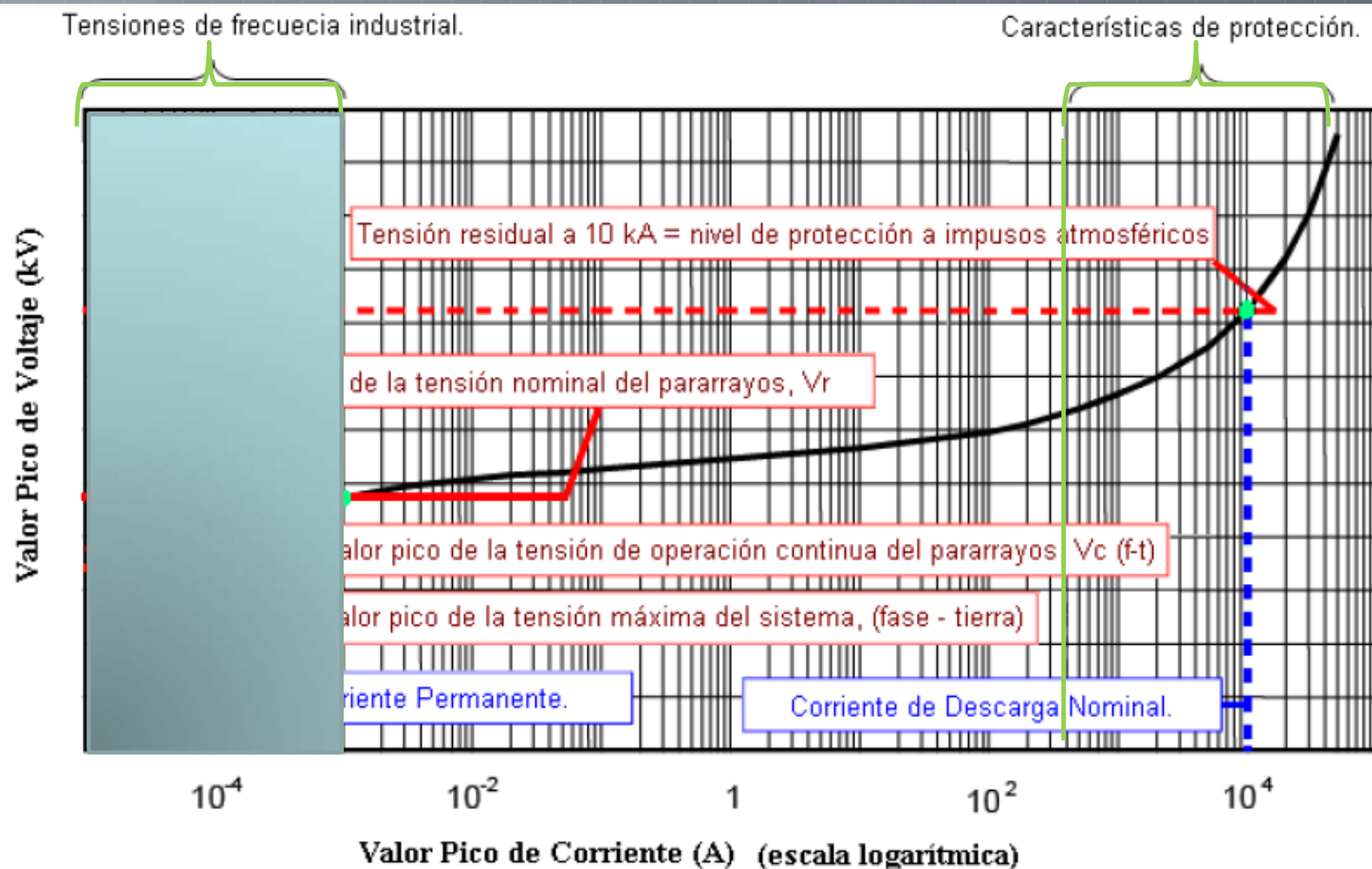


Figura 2.18. Característica voltaje – corriente de un pararrayos con nivel de protección a impulsos atmosféricos a corriente de descarga de 10 kA [15].

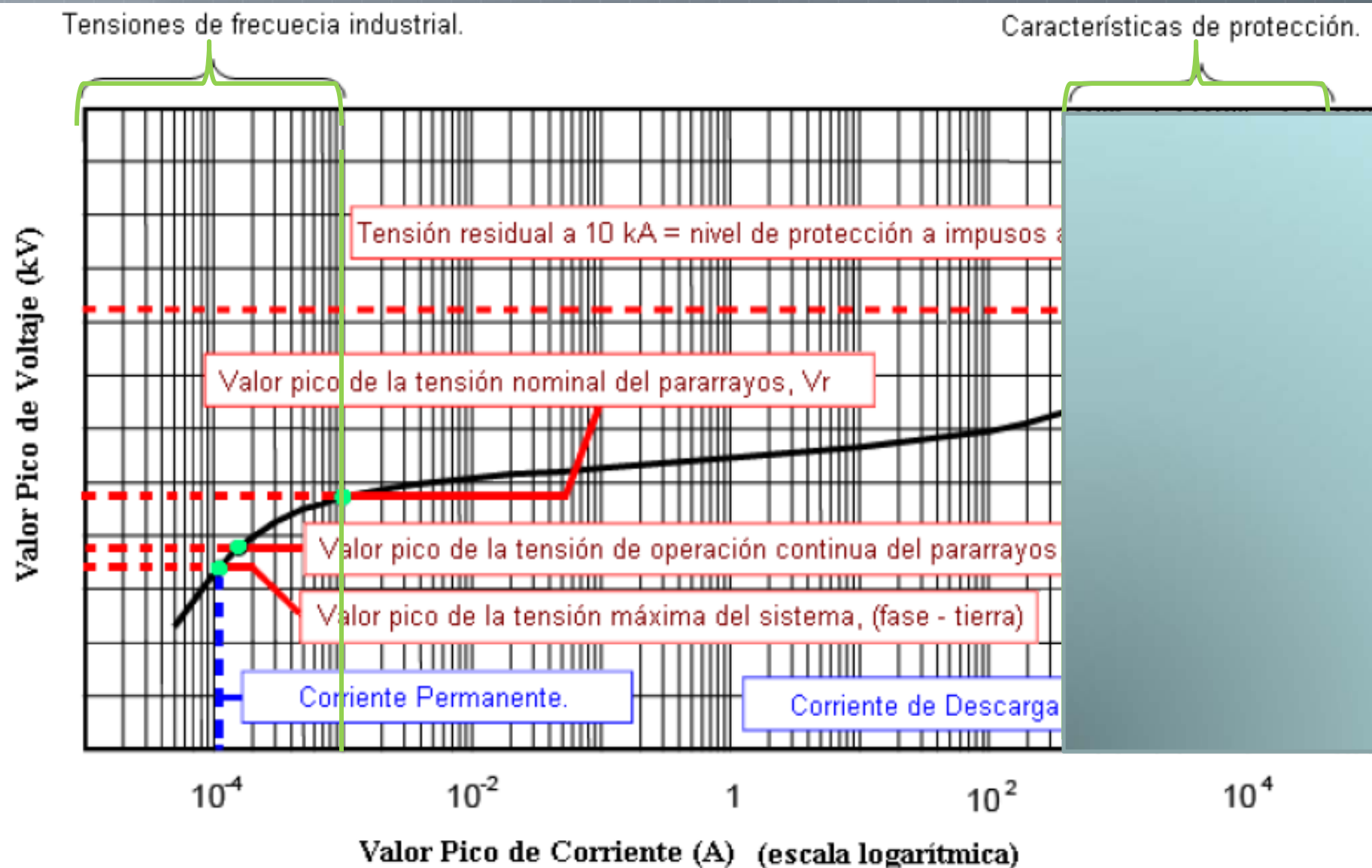


Figura 2.18. Característica voltaje – corriente de un pararrayos con nivel de protección a impulsos atmosféricos a corriente de descarga de 10 kA [15].

Tensiones de frecuencia industrial.

Características de protección.

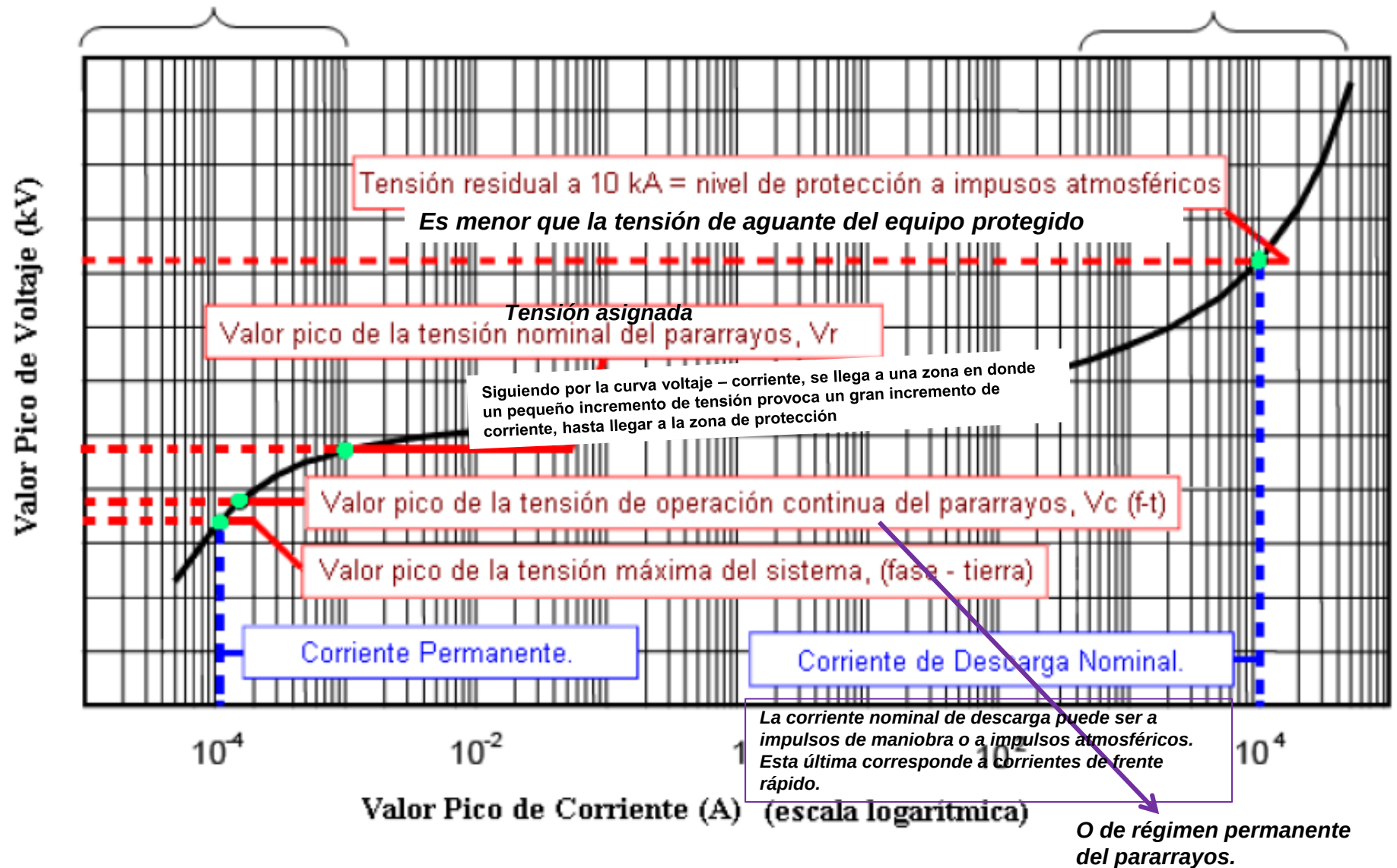
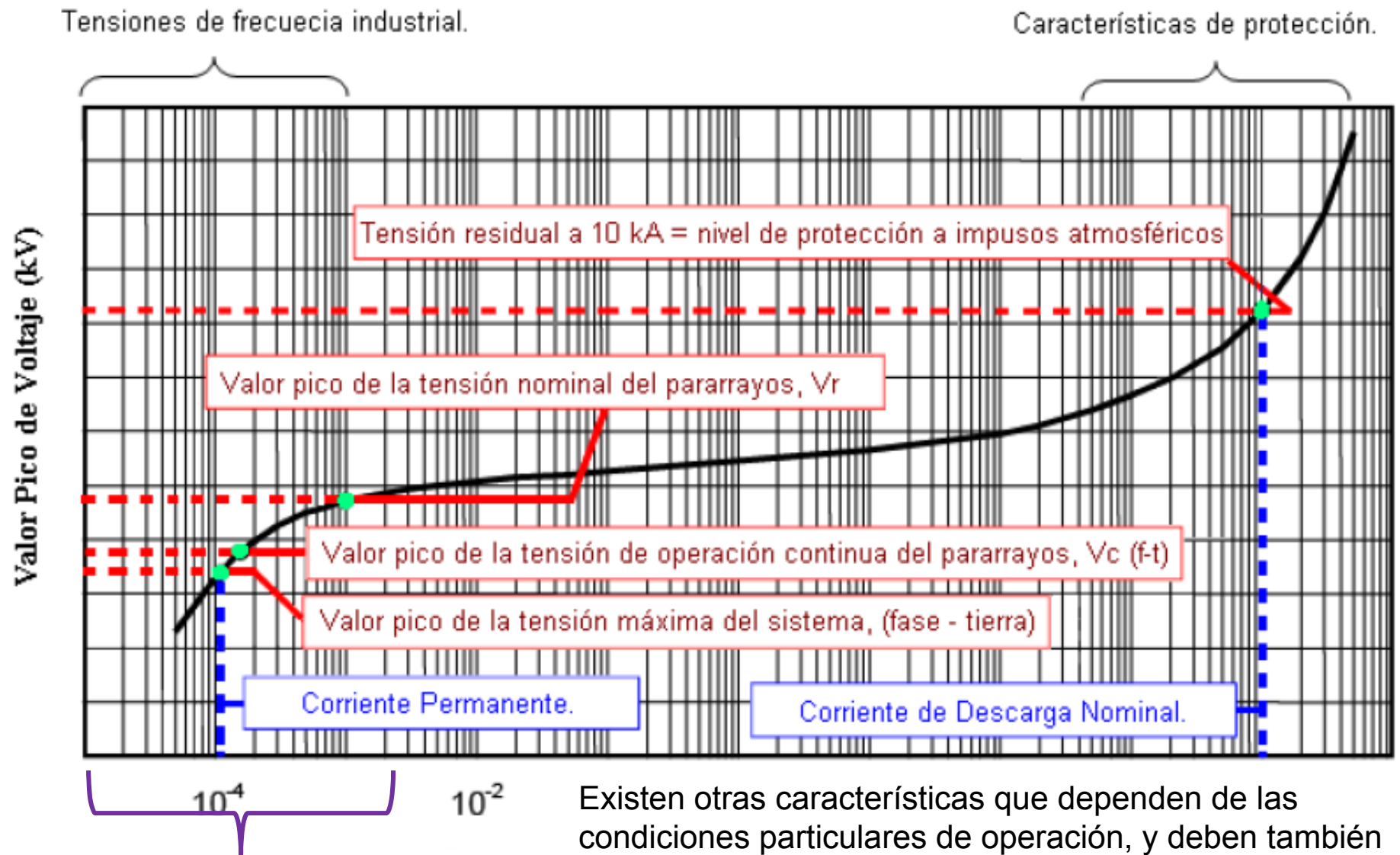


Figura 2.18. Característica voltaje – corriente de un pararrayos con nivel de protección a impulsos atmosféricos a corriente de descarga de 10 kA [15].



Aquí las corrientes a través del pararrayos son pequeñas comparadas con las corrientes de descarga, su duración es mucho mayor, razón por la cual, el esfuerzo térmico del pararrayos en la zona de frecuencia industrial es más crítico que en la zona de protección.

Existen otras características que dependen de las condiciones particulares de operación, y deben también ser consideradas, estas son: la clase de descarga de línea, la clase de alivio de presión, el comportamiento bajo contaminación, la facultad de limpieza bajo tensión y las propiedades mecánicas.

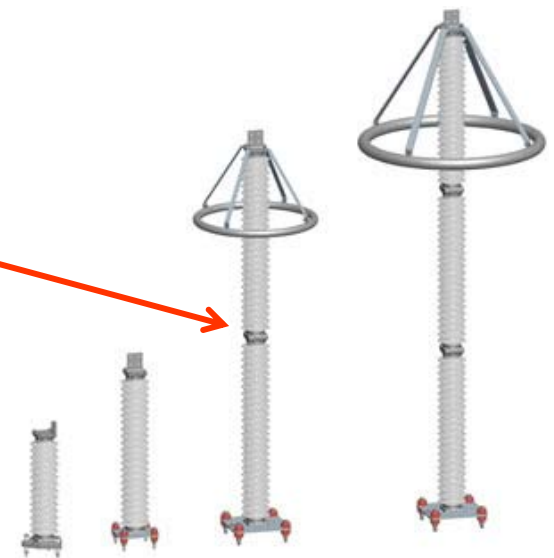


Pararrayos 800kV

El pararrayos deberá ser identificado por sus datos de placa con las siguientes especificaciones mínimas:

- ☐ Voltaje de operación continua.
- ☐ Tensión asignada.
- ☐ Frecuencia asignada (si difiere de las frecuencias estándar: 50 y 60 Hz).
- ☐ Corriente nominal de descarga.
- ☐ Corriente sostenida de corto circuito asignada en kA.

- ☐ Nombre del fabricante y código de identificación.
- ☐ Identificación de la posición de los elementos para el ensamblaje (aplicable sólo en pararrayos con varios elementos).
- ☐ Año de fabricación.
- ☐ Número de serie.
- ☐ Clase de descarga de línea (opcional).
- ☐ Nivel de soporte a la contaminación del revestimiento del pararrayos (opcional).

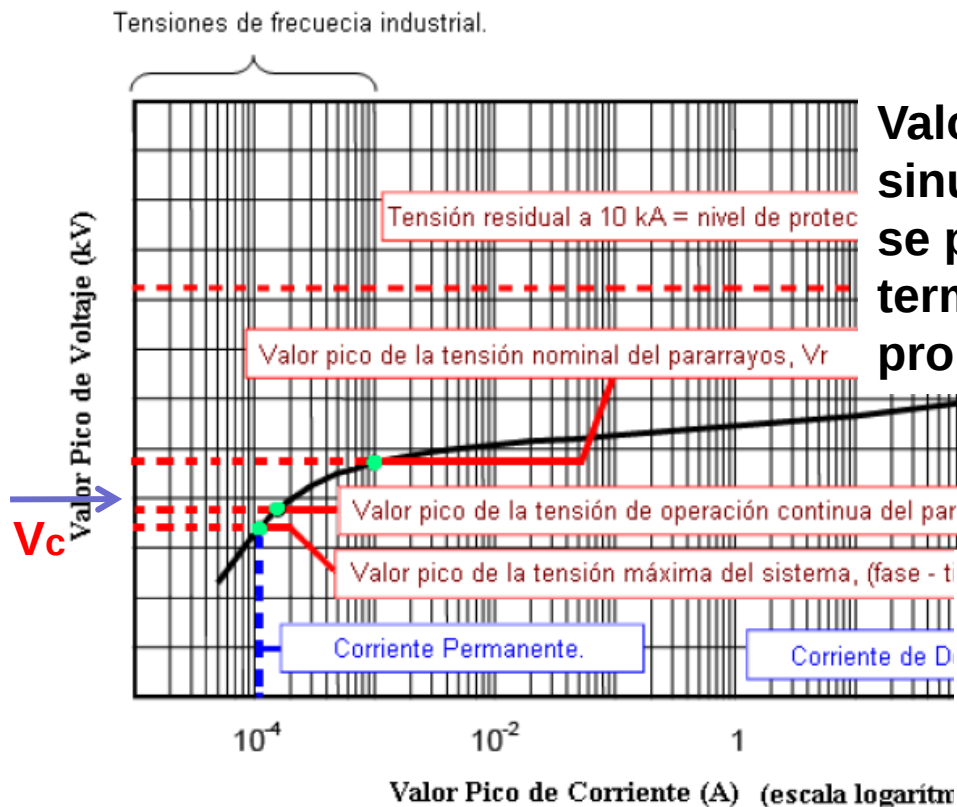


Analizemos de cada una de estas características y los criterios para su selección.

Ojo los pararrayos se instalan entre fase y tierra.



1.1 Voltaje de operación continua del pararrayos (V_c).



Valor máximo permisible de voltaje sinusoidal rms de frecuencia industrial que se puede aplicar continuamente entre los terminales del pararrayos, sin presentar problemas térmicos.

V_c (pico) > Voltaje pico más elevado de operación en el sitio de ubicación del pararrayos. En caso de que el voltaje más elevado de operación al sitio del pararrayos no se conozca con precisión, se debe considerar la tensión más elevada del sistema (V_s) o la tensión más elevada para el equipo (V_m).

Como regla general, se debe cumplir que el voltaje de operación continua del pararrayos debe ser:

- a) Igual o mayor que el valor pico del voltaje fase-tierra más elevado de operación dividido para $\sqrt{2}$. Para el caso de sistemas con el neutro rígidamente conectado a tierra.

$$V_c \geq \frac{\hat{V}_{s, f-t}}{\sqrt{2}} \quad \text{o} \quad V_c \geq \frac{\hat{V}_{m, f-t}}{\sqrt{2}}$$

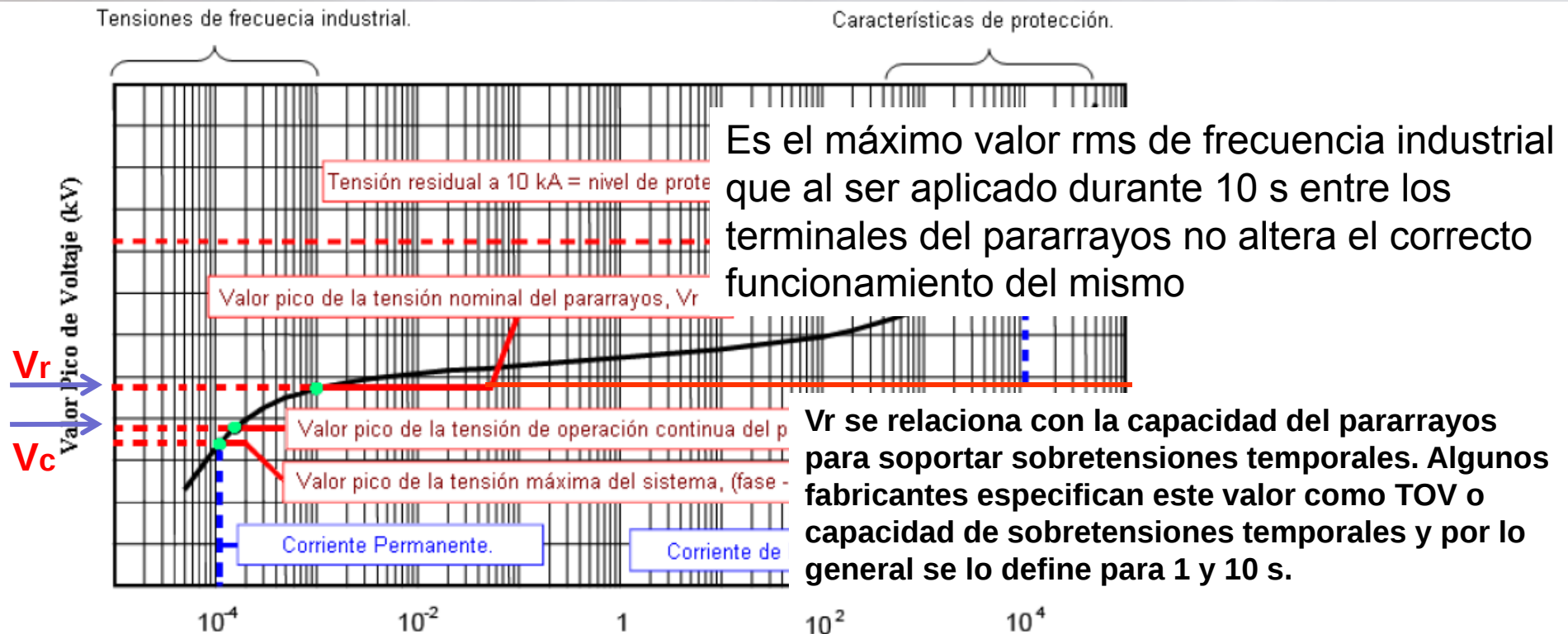
b) Igual o mayor que el valor pico del voltaje más alto de operación. En el caso de tener sistemas con neutro aislado o resonante.

$$V_c \geq \hat{V}_s \quad \text{o} \quad V_c \geq \hat{V}_m$$

En sistemas con presencia de armónicos de voltaje, el efecto del aumento en el valor pico de la tensión puede ser representado por un factor de seguridad de 1,05 aplicado sobre la tensión de frecuencia industrial.

$$V_c \geq 1.05 \left(\frac{\hat{V}_{s,f-t}}{\sqrt{2}} \right) \quad \text{que es igual a:} \quad V_c \geq 1.05 \left(\frac{V_s}{\sqrt{3}} \right)$$

1.2. Tensión asignada (nominal) de un pararrayos según norma IEC (V_r).



La tensión asignada sirve como parámetro de referencia para la especificación de la característica de comportamiento del pararrayos bajo tensión de frecuencia industrial en función del tiempo.

$$V_r \approx 1.25V_c$$

La tensión nominal o asignada se determina en función de las sobretensiones temporales en el punto de ubicación del pararrayos, considerando, tanto sus amplitudes así como sus tiempos de duración.

El principal requisito a ser cumplido es que la característica de comportamiento del pararrayos bajo tensión de frecuencia industrial en función del tiempo sea mayor que la característica de amplitud de la sobretensión temporal en función tiempo del sistema..

Resumen de las principales causas, amplitudes y tiempos de duración de las sobretensiones temporales más importantes a ser consideradas:

Sobretensiones temporales significativas

Causa de la Sobretensión	Amplitud fase-tierra (p.u)	Duración
Falla a tierra.	$1.3 < V < 1.5$	Neutro rígido a tierra $\leq 1s$ Neutro resonante $\leq 10s$
Rechazo de carga en sistemas no muy extensos	≤ 1.2	Varios minutos
Rechazo de toda la carga en sistemas muy extensos	≈ 1.5	Varios segundos
Rechazo de carga en el transformador de un generador	$1.4 < V < 1.5$	$t \approx 3 s$

Una sucesión de causas de sobretensiones temporales, como por ejemplo, *el rechazo de carga como consecuencia de una falla de la tierra*, se deben considerar únicamente si ambas sobretensiones tienen una severidad comparable.

En este caso, la cantidad de carga rechazada dependerá de la ubicación de la falla, y la ubicación del pararrayos deberá ser analizada con mayor cuidado.

La expresión siguiente es una aproximación que permite convertir la característica de amplitud versus duración de las sobretensiones temporales con una duración de entre *0.1 a 100s, a una amplitud equivalente V_{eq} con una duración de 10s* y que por lo tanto corresponde a la capacidad de sobretensión temporal que el pararrayos debe ser capaz de soportar.

Con esto se permite cumplir con el criterio que para una característica de amplitud de sobretensión temporal en función del tiempo dada, se deberá seleccionar una característica de comportamiento del pararrayos más alta, esto significa que *la capacidad de sobretensiones temporales del pararrayos debe ser mayor o igual que la sobretensión temporal equivalente más elevada obtenida de la expresión siguiente.*

$$V_{eq} = V_t \left(\frac{T_t}{10} \right)^m \quad m \in [0.018; 0.022] \quad m_{medio} = 0.02$$

V_t es la amplitud de la sobretensión temporal.

T_t es la duración de la sobretensión temporal en segundos s.

V_{eq} es la amplitud de la sobretensión temporal de 10 s equivalente.

m es un exponente que describe la característica de tensión a frecuencia industrial en función del tiempo del pararrayos. El valor de m varía entre 0.022 y 0.018 para diferentes diseños de pararrayos, sin embargo se puede usar el valor medio de 0.02.

Se recomienda aplicar un *margen de seguridad (5% a 15%) entre la sobretensión temporal equivalente máxima y la tensión asignada (TOV)* con el propósito de cubrir posibles imprecisiones del valor de la sobretensión temporal.

Los valores estandarizados de las tensiones asignadas según normas IEC se establecen según la Tabla siguiente en donde los valores estandarizados se definen a través de un número de pasos iguales dentro de gamas especificadas de voltaje.

Pasos de Tensiones Asignadas [16]

Rango de Tensiones Asignadas. kV r.m.s	Pasos de Tensión Asignada.
< 3	Bajo consideración.
3 - 30	1
30 - 54	3
54 - 96	6
96 - 288	12
288 - 396	18
396 - 756	24

Nota.- Valores de tensión asignada diferentes a los resultantes de esta tabla se pueden aceptar, siempre que sean múltiplos de 6.

En el caso de que se requiera un nivel de protección inferior al del pararrayos seleccionado, se puede elegir una tensión asignada menor a las sobretensiones temporales equivalentes de duración 10s, tomando en cuenta que el pararrayos debe tener la capacidad de absorber la energía debida a eventos en el sistema.

En tal caso, se deben efectuar cálculos de absorción de energía simulando los eventos en la red.

1.3. Tensión nominal del descargador (V_r).

El concepto de tensión nominal que usa el fabricante es congruente con el dado por la norma. Es decir, la tensión nominal está relacionada con la capacidad que tiene el pararrayos de operar frente a las sobretensiones temporales del sistema en un período definido de tiempo.

Sin embargo el procedimiento empleado por el fabricante para definir el valor de la tensión nominal está basado en criterios prácticos.

El primer criterio para determinar el valor de la mínima tensión nominal de un pararrayos se basa en principios empíricos y relaciona a la tensión nominal con el voltaje de operación continua con un factor de 1.25, tal como se describe en la expresión Esta relación se puede verificar en las tablas de datos otorgadas por los fabricantes.


$$V_{r,\min} \geq 1.25V_c$$

Para un sistema sólidamente aterrado se tiene entonces:

$$V_{r,\min} \geq 1.25 \times 1.05 \left(\frac{\hat{V}_{s,f-t}}{\sqrt{2}} \right)$$

$$V_{r,\min} \geq 1.25 \times 1.05 \left(\frac{\hat{V}_s}{\sqrt{3}} \right)$$

El factor k_{TOV} se define como la relación entre el valor eficaz de la tensión admisible de frecuencia industrial (TOV) y el valor eficaz de la tensión nominal del pararrayos. Entonces, la tensión nominal se puede determinar en función de TOV y k_{TOV} , tal como se indica en la expresión. *La ventaja de esta expresión es que se puede aplicar para varios tipos de sobretensiones temporales y de diferente duración.*

$$k_{TOV} = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{Valor rms} \\ \text{Tensión admisible} \\ \text{de frecuencia industrial (TOV)} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{c} \text{Tensión Nominal} \\ \text{del Pararrayos} \end{array} \right)}$$

$$V_r' = \frac{TOV}{k_{TOV}}$$

El segundo criterio se apega un poco más a la definición de tensión nominal dada en la norma, puesto que el cálculo para la determinación de V_r se hace en función de las sobretensiones temporales (TOV) del sistema, considerando su amplitud y duración. Para esto el fabricante proporciona curvas que permiten determinar un factor de sobretensiones temporales (k_{TOV}) en función del tiempo de duración de la sobretensión.

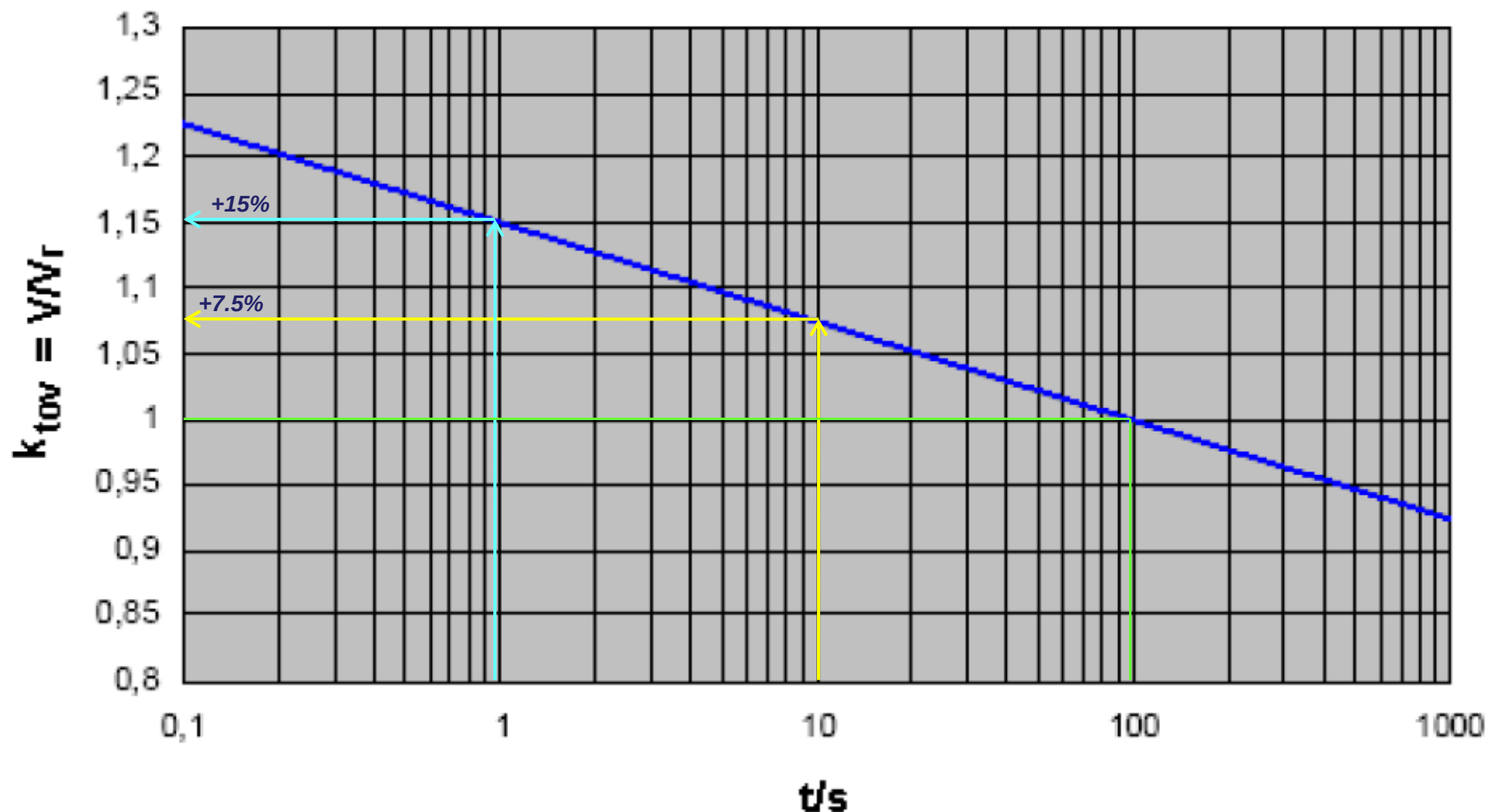
$$V_r' = \frac{TOV}{k_{TOV}}$$

Donde:

V_r' tensión nominal de preselección.

TOV sobretensión temporal a ser analizada.

k_{TOV} factor de sobretensión, dada por el fabricante a través de curvas en función del tiempo.



Curva típica de la relación k_{TOV} versus tiempo: a mayor sobretensión temporal menor es el tiempo que puede ser aplicada sobre el pararrayos.

La tensión nominal puede aplicarse por un lapso de 100 s y que sobretensiones de 10s y 1s corresponden a tensiones 7.5% y 15% mayores que la tensión nominal, respectivamente. Es aquí donde se puede apreciar la diferencia de conceptos entre la norma y el fabricante.

Si la sobretensión excede el tiempo establecido según la curva se tendrá un elevado incremento en la temperatura del descargador, pudiendo llevarlo a inestabilidad térmica.

Para la selección final de la tensión nominal del pararrayos, se evalúan las dos expresiones:

$$V_{r,\min} \geq 1.25V_c$$

$$V_r' = \frac{TOV}{k_{TOV}}$$

Esta última podrá ser calculada para varias sobretensiones temporales independientemente, en caso de contar con esta información, o para la peor condición asumida de sobretensión temporal, que *para sistemas con neutro rígido a tierra corresponde a un factor de falla a tierra $k = 1.4$ y una duración de 10s.* Al final la tensión nominal del pararrayos será el valor normalizado correspondiente al mayor valor de todos los calculados.

$$V_r = \max (V_{r,\min}, V_{r1}', V_{r2}', \dots V_{rn}')$$

En caso de que la tensión nominal V_r' resulte mayor que la $V_{r,\min}$, se deberá redefinir el voltaje de operación continua, relacionándolo con el factor de 1.25, así:

$$V_c = \frac{V_r}{1.25}$$

1.4. Norma IEC vs fabricantes.

Al comparar la definición y el método de determinación de la tensión nominal de un pararrayos dada en la norma con lo expuesto por los fabricantes (ABB y Siemens), se puede identificar que si bien ambos relacionan a la tensión nominal con la capacidad del pararrayos para soportar sobretensiones temporales, difieren en el período de tiempo en que la tensión nominal puede ser aplicada.

Según la norma la tensión nominal es la máxima tensión que se puede aplicar al pararrayos por un período de 10 s, y en base a esto se calcula V_r con la expresión:

$$V_{eq} = V_t \left(\frac{T_t}{10} \right)^m$$

Por otro lado, de las **curvas k_{tov} vs tiempo dadas por el fabricante** se puede ver que la tensión nominal puede ser aplicada por un período de 100 s.

Entonces la norma describe un período de referencia de 10 s y el fabricante uno de 100 s. Esto da como resultado que la tensión nominal calculada por la norma > que la calculada según el fabricante, ya que a menor tiempo mayor será la tensión aplicable.

Por ello según la curva de k_{tov} se podría aplicar una tensión 7.5% mayor que la tensión nominal por un periodo de 10 s.

Mientras que según la norma durante 10 s la máxima tensión aplicable es la nominal.

El fabricante suele presentar tablas en las que para cada tensión nominal de red se especifican varios valores de tensiones nominales V_r , tensiones de funcionamiento continuo máximas V_c y tensiones de capacidad de sobretensiones temporales (TOV) para 1 y 10 segundos.

La dos Tablas siguiente muestran datos típicos del fabricante. Para estos casos bien se podría relacionar el concepto dado en la norma y a la expresión, con lo que el fabricante denomina en sus catálogos como “Capacidad de Sobretensiones Temporales” para una duración de 10 s.

Debido a que en la práctica se deberá elegir al pararrayos conforme a los catálogos de los fabricantes y tomando en cuenta que sus criterios han sido probados y avalados en aplicaciones prácticas, *se usará la metodología de cálculo propuesta por el fabricante en la determinación de la tensión nominal del pararrayos.*

$$V_{eq} = V_t \left(\frac{T_t}{10} \right)^m$$

En las dos tablas siguientes además de la tensión nominal o asignada se especifica una tensión TOV que es la que correspondería a la tensión asignada definida según la norma IEC.

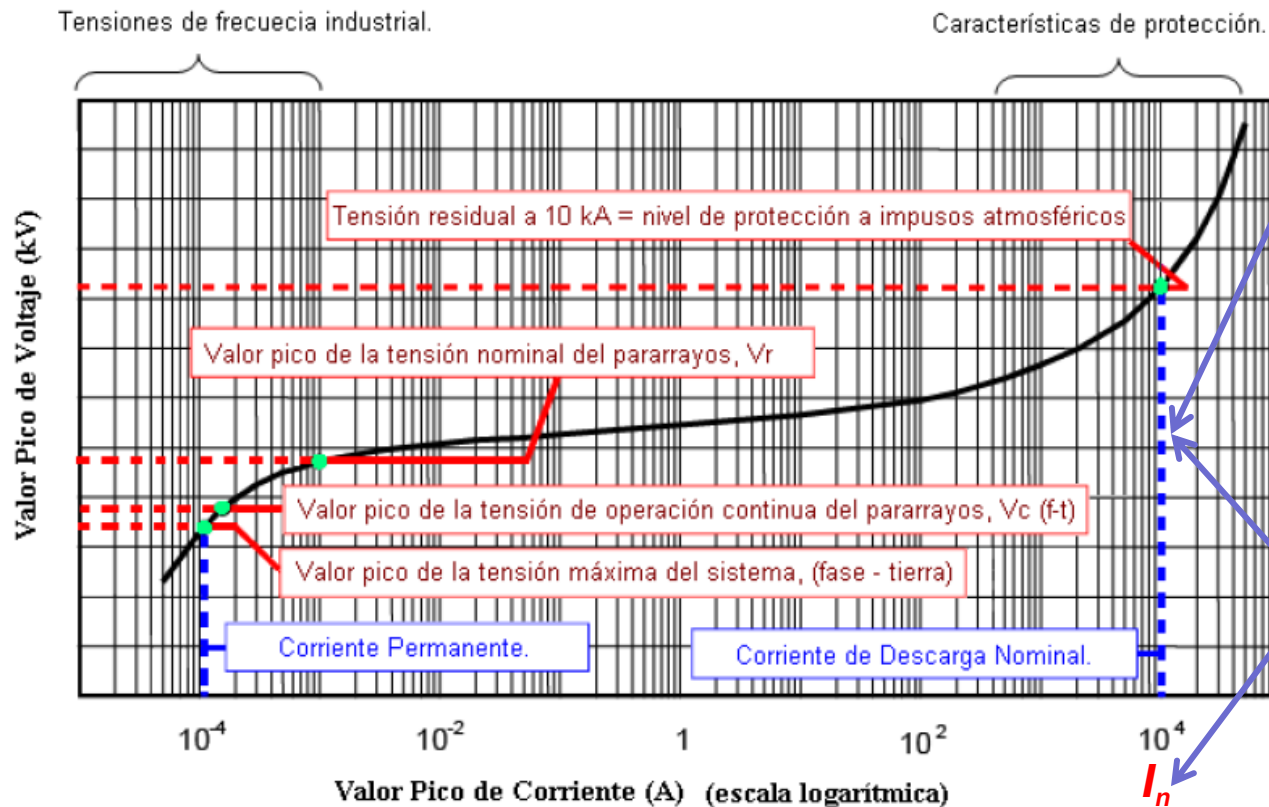
Tensión máxima de red	Tensión nominal	Tensión de trabajo continuo máxima 1)		Capacidad de sobretensiones temporales 2)		Tensión residual máxima con onda de corriente						
		según IEC	según ANSI/IEEE			30/60 μs			8/20 μs			
						1 kA	2 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
U _m kV _{rms}	U _r kV _{rms}	U _C kV _{rms}	MCOV kV _{rms}	1 s kV _{rms}	10 s kV _{rms}	1 kA kV _{pico}	2 kA kV _{pico}	3 kA kV _{pico}	5 kA kV _{pico}	10 kA kV _{pico}	20 kA kV _{pico}	40 kA kV _{pico}
420	330	264	267	376	356	634	652	665	697	726	785	854
	336	267	272	383	362	646	664	677	710	740	799	869
	360	267	291	410	388	692	712	725	761	792	856	931
	372	267	301	424	401	715	735	749	786	819	884	962
	378	267	306	430	408	726	747	761	799	832	899	978
	381	267	308	434	411	732	753	767	805	839	906	985
	390	267	315	444	421	750	771	786	824	858	927	1013
	396	267	318	451	427	761	783	798	837	872	941	1029
	→ 420	267	336	478	453	807	830	846	888	924	998	1091
550	396	317	318	451	427	761	783	798	837	872	941	1029
	420	336	336	478	453	807	830	846	888	924	998	1091
	444	349	353	506	479	853	878	894	938	977	1060	1153
800	588	470	470	670	635	1134	1167	1189	1247	1299	1402	1525
	612	490	490	697	660	1180	1214	1237	1298	1351	1459	1587
	624	499	499	711	673	1203	1238	1261	1323	1378	1488	1618

Tabla de datos donde se muestra el TOV para pararrayos ABB.

type / Tipo	rated voltage / Tensión asignada Ur kV	continuous operating voltage / Tensión de operación continua Uc kV	temporary over- voltage TOV ¹⁾ / Sobretensión temporal ¹⁾		residual voltage at steep, lightning and switching impulse current / Tensión residual con impulso de corriente de frente escarpado, impulso de maniobra e impulso tipo rayo										min. housing size / Tamaño mínimo de la envol- vente
			1 sec	10 sec	20 kA (1/2 μs)	5 kA (8/20 μs)	10 kA (8/20 μs)	20 kA (8/20 μs)	40 kA (8/20 μs)	250 A (30/70 μs)	500 A (30/70 μs)	1000 A (30/70 μs)	2000 A (30/70 μs)	3000 A (30/70 μs)	
			kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	
SB 396/20.5-II	396	317	459	432	1083	857	895	942	1027	744	763	777	810	838	3x 3
SB 416/20.5-II	416	333	483	453	1139	901	941	990	1079	782	802	817	851	881	3x 3
SB 420/20.5-II	420	336	487	458	1150	910	950	1000	1090	790	810	825	860	890	3x 3
SB 444/20.5-II	444	355	515	484	1216	962	1004	1057	1152	835	856	872	909	941	3x 4
SB 468/20.5-II	468	374	543	510	1281	1014	1058	1114	1214	880	902	919	958	991	3x 6
SB 570/20.5-II	570	456	661	621	1561	1235	1289	1357	1479	1072	1099	1120	1167	1208	4x 5
SB 588/20.5-II	588	470	682	641	1609	1273	1329	1399	1525	1105	1133	1154	1203	1245	4x 6
SB 612/20.5-II	612	490	710	667	1676	1326	1384	1457	1588	1151	1180	1202	1253	1297	4x 6

Tabla de datos donde se muestra el TOV para pararrayos Tridelta.

1.5. Corriente nominal de descarga I_n



I_n es el valor pico de una corriente tipo rayo normalizada de 8/20 μseg , y sirve para hacer una clasificación de los pararrayos, según se muestra en la Tabla siguiente.

Es el principal parámetro para establecer el nivel de protección y la capacidad de absorción de energía de un pararrayos

Clasificación de los Pararrayos de Oxido Metálico

Clasificación de los pararrayos de óxido metálico sin explosores según su corriente nominal de descarga [16].

	Valores de corriente nominal de descarga estandarizados. ^a				
	20 kA	10 kA	5 kA	2,5 kA	1,5 kA
Tensión Asignada V_r (kV _{r.m.s} f-f)	$360 < V_r \leq 756$	$3 < V_r \leq 360$	$V_r \leq 132$	$V_r \leq 36$	^b

^a En algunos países, se acostumbra clasificar a los pararrayos de la siguiente manera:

- Tipo estación para pararrayos de 10000 A y 20000 A;
- Tipo Intermediario o Distribución para los pararrayos de 5000 A;
- Secundario para los pararrayos de 1500 A.

^b El rango para bajas tensiones no está aún definido sino que está en estudio.

I_n se elige en función de la corriente de descarga tipo rayo que atraviesa el pararrayos, para la cual se busca la protección del equipo.

Se debe de considerar que *la corriente que llega hasta el pararrayos para ser descargada a tierra siempre será inferior que la corriente del rayo.*

Esto se debe principalmente a dos razones:

- 1. La primera** se basa en estudios que establecen que *la probabilidad de que el valor pico de una corriente debida a una descarga atmosférica sobre un conductor de fase tenga valores mayores a los 20 kA es baja*, por esta razón se tiene valores normalizados de corrientes de descarga de hasta 20 kA.

Nota aparte: Se muestra los valores de la probabilidad de que una corriente debida a una descarga atmosférica exceda un valor determinado.

La probabilidad acumulada de que el primer impulso de corriente de una descarga atmosférica I_f , sea mayor que una corriente dada I , se puede determinar mediante la expresión

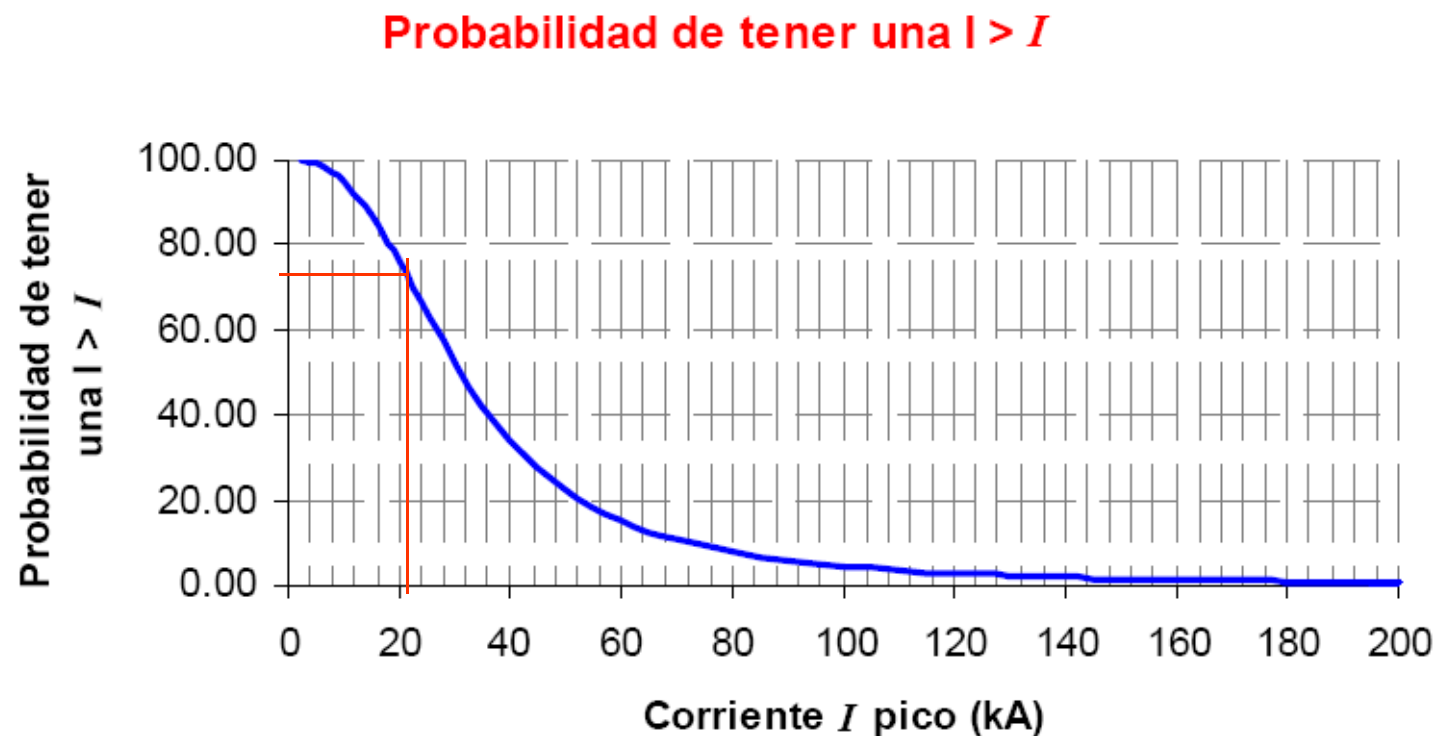
$$P(I_f > I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}}$$

Donde:

$P(I_f > I)$ es la probabilidad de que el valor pico del primer impulso de corriente de una descarga atmosférica sea mayor o igual a un valor de corriente dado I .

$$2 \text{ kA} < I < 200 \text{ kA}$$

Dando valores de I dentro el rango establecido se puede calcular el valor de P . La Figura siguiente muestra la curva de la probabilidad en función de la corriente I , de donde claramente se puede notar que *la probabilidad de que un impulso de corriente debido a una descarga atmosférica tome valores mayores a 20 kA es baja.*



Probabilidad de tener un impulso de corriente atmosférico mayor que I .

La segunda contempla el hecho de que al presentarse una descarga atmosférica directa sobre un conductor de fase, las ondas de corriente que se propagarán a lo largo de la línea provocarán en la mayoría de los casos el flameo de su aislamiento, derivando a tierra parte de la corriente y haciendo que la onda de corriente que llega hasta la subestación sea una onda de corriente reducida.

La probabilidad de que una descarga atmosférica golpee al conductor de fase en el vano adyacente a la subestación es muy baja debido a su alto nivel de apantallamiento, de ahí que la onda de corriente deberá pasar por al menos una cadena de aisladores antes de alcanzar la subestación.

La experiencia ha demostrado que un nivel de protección confiable en sistemas del Rango II se consigue al seleccionar la corriente nominal de descarga bajo los criterios:

- *Para tensión más elevada ≤ 420 kV, se considera suficiente el uso de pararrayos con una corriente nominal de descarga de 10 kA.*

☐ *Para sistemas de tensión más elevada > 420 kV, se considera que puede ser necesario el uso de pararrayos de 20 kA.*

1.6. Nivel de protección del pararrayos.

El nivel de protección está asociado con el valor pico de la tensión que aparece entre los terminales del pararrayos durante la circulación de la corriente de descarga, a esta tensión se la denomina tensión residual (V_{res}) o tensión de descarga. Los niveles de protección se especifican para impulsos tipo rayo y tipo maniobra.

Nivel de protección ante un impulso tipo rayo

se define como el máximo valor de tensión residual a corriente nominal de descarga y se aplica para la protección de los equipos contra sobretensiones de frente rápido, como es el caso de las sobretensiones por descargas atmosféricas.

La eficacia de la protección ante tales sobretensiones, es función del tiempo de retraso en el mecanismo de conducción de los varistores.

El fabricante en sus catálogos asocia valores para el nivel de protección a impulsos atmosféricos con cada valor de tensión asignada especificado.

El nivel de protección a un impulso de maniobra se define como el máximo valor de tensión residual a corrientes de impulso de maniobra y se aplica en la protección del equipo contra sobretensiones de frente lento. La Tabla siguiente muestra las corrientes de impulso de maniobra para las cuales se especifica un nivel de protección.

Corrientes de impulso de maniobra para las que se especifica un nivel de protección [16].

Clase de Pararrayos	Impulsos de corriente de maniobra (kA)
20 kA, clases 4 y 5	0.5 , 1 y 2
10 kA, clase 3	0.25 y 1
10 kA, clases 1 y 2	0.125 y 0.5

Valores típicos de las máximas tensiones residuales ante corrientes de prueba tipo rayo y tipo maniobra.

Tensiones residuales para pararrayos de 20 y 10 kA en p.u de la tensión asignada [16].

Tensión asignada (V_r) kV r.m.s	20 kA V_{res} kV (pico) / V_r			10 kA V_{res} kV (pico) / V_r		
	Frente escarpado.	Tipo Rayo.	Tipo Maniobra.	Frente escarpado.	Tipo Rayo.	Tipo Maniobra.
3-29	-	-	-	2.6 – 4.0	2.3 – 3.6	2.0 – 2.9
30-132	2.6 – 3.1	2.3 – 2.8	2.0 – 2.3	2.6 – 3.7	2.3 – 3.3	2.0 – 2.6
144-342	2.6 – 3.1	2.3 – 2.8	2.0 – 2.3	2.6 – 3.7	2.3 – 3.3	2.0 – 2.6
360-756	2.6 – 3.1	2.3 – 2.8	2.0 – 2.3	2.6 – 3.1	2.3 – 2.8	2.0 – 2.3

Nota 1.- Las corrientes de frente escarpado, tipo rayo y tipo maniobra para las que resultan los presentes valores, están definidas según la norma IEC 60099-4.

Nota 2.- El rango de tensiones residuales máximas mostradas son las normalmente disponibles. En donde, los valores inferiores corresponden a pararrayos con una clase de descarga de línea alta, y viceversa.

Tener presente que *el nivel de protección de un pararrayos representa una tensión entre sus terminales producto de la circulación de una corriente normalizada de prueba cuyo valor corresponde a la corriente nominal de descarga.*

Esto significa que la tensión en los terminales del equipo a proteger no es igual al nivel de protección, sino que puede ser considerablemente mayor.

Esto se debe al efecto de reflexión y superposición de las ondas de sobretensión en función de la distancia de separación entre el pararrayos y el equipo, y a la posibilidad de tener corrientes de descarga mayores que la corriente nominal, situación menos probable.

Este hecho deberá ser considerado en el proceso de coordinación de aislamiento.

Notar que para un tipo específico de resistencia de óxido metálico *los valores de tensión de operación permanente, tensión nominal y tensión residual se ajustan a una relación fija, según la curva voltaje – corriente (V-I) de la resistencia.*

Esto implica que no se puede disminuir o aumentar alguno de estos valores aisladamente, sin influir sobre los otros.

Por ejemplo, el *disminuir el valor de nivel de protección implica desplazar la curva V-I hacia abajo y por lo tanto, disminuir también el voltaje de operación permanente y la tensión nominal*, lo cual involucra una condición de menor estabilidad en la operación a frecuencia industrial.

Para conseguir bajos niveles de protección sin alterar los valores de la tensión nominal y de operación continua, se deberá tener una relación entre el nivel de protección y la tensión nominal también baja, lo que se traduce en una curva V-I más plana.

Esto se consigue físicamente al aumentar la sección de las pastillas de óxido de zinc.

Entonces, *para una tensión nominal dada, se podrá disminuir el nivel de protección bajo la condición de tener resistencias de óxido de zinc de mayor diámetro.*

Bajo esta premisa, es factible que para una tensión nominal y de operación continua definidas se tenga varios niveles de protección.

De hecho el fabricante en sus catálogos especifica varios valores de nivel de protección para un mismo valor de tensión asignada.

1.7. Clases de descarga de línea.

Se identifica como un número relativo a la capacidad de absorción de energía de los pararrayos de 10 y 20 kA,
aplicables para la descarga de líneas de gran longitud.

1.7. Clases de descarga de línea.

De acuerdo con la norma IEC 60099-4 se definen cinco clases para las que, al incrementar el número de clase se incrementa también la capacidad de absorción de energía del pararrayos, así para los *pararrayos de 10 kA se definen las clases de 1 a 3*, mientras que para *pararrayos de 20 kA se definen las clases 4 y 5*.

La energía que el pararrayos debe ser capaz de absorber será la producida por las sobretensiones transitorias que se presenten en la red.

Presentamos ahora las expresiones que permiten evaluar la energía a ser absorbida por el pararrayos según el tipo de sobretensión y en función del nivel de protección.

- Cierre y recierre de líneas:

$$W = 2V_{ps} (V_e - V_{ps}) \frac{T_w}{Z} \quad (2.16)$$

Donde:

- W es la energía a ser absorbida.
- V_{ps} es el nivel de protección del pararrayos al impulso de maniobra (kV).
- V_e es la amplitud de la sobretensión (kV).
- Z es la impedancia característica de la línea (Ω).
- T_w es el tiempo de propagación de la onda a través de la línea, cuyo valor corresponde al cociente entre la longitud de la línea (km) y la velocidad de propagación de la onda en la línea (km/ μ s).

- Maniobra sobre un capacitor:

$$W = \frac{1}{2}C \left[(3V_o)^2 - (\sqrt{2}V_r)^2 \right] \quad (2.17)$$

Donde:

- W es la energía a ser absorbida.
- C es la capacitancia del banco de condensadores.
- V_o es el valor pico entre fase y tierra del voltaje de operación del sistema.
- V_r es la tensión asignada del pararrayos.

- Descargas Atmosféricas:

$$W = \left[2V_f - NV_{pl} \left(1 + \ln \left(2 \frac{V_f}{V_{pl}} \right) \right) \right] \frac{V_{pl} T_l}{Z} \quad (2.18)$$

Donde:

- W es la energía a ser absorbida.
- V_{pl} es el nivel de protección del pararrayos al impulso tipo rayo.
- V_f es la tensión disruptiva de polaridad negativa del aislamiento de la línea.
- Z es la impedancia característica de la línea.
- N es el número de líneas conectadas al pararrayos.
- T_l es la duración equivalente de la corriente de rayo que incluye a la primera y a las subsiguientes descargas. Toma un valor típico de $3 \cdot 10^{-4}$ s.

En la práctica la capacidad de absorción de energía del pararrayos se define únicamente en función de la expresión . Esto se debe a que las sobretensiones generadas por el cierre y recierre de líneas son las sobretensiones de frente lento más severas en sistemas del Rango II y por lo tanto exigen mayor capacidad de absorción.

$$W = 2V_{ps}(V_e - V_{ps})\frac{T_w}{Z}$$

Criterio que es compartido por el fabricante, quien también considera la misma expresión. Sin embargo, en caso de que se conozca todos los parámetros que permiten evaluar las expresiones es recomendable hacerlo.

$$W = \frac{1}{2}C[(3V_o)^2 - (\sqrt{2}V_r)^2]$$

$$W = \left[2V_f - NV_{pl} \left(1 + \ln \left(2 \frac{V_f}{V_{pl}} \right) \right) \right] \frac{V_{pl}T_l}{Z}$$

Para sistemas del *Rango I* en
dónde la energía debida a
operaciones de maniobra es baja,
la capacidad de absorción será
determinada por sobretensiones
debidas a *descargas atmosféricas*.

Los parámetros de la expresión deben ser determinados para el sistema en estudio.

$$W = 2V_{ps} (V_e - V_{ps}) \frac{T_w}{Z}$$

No obstante en caso de no tener información específica se puede usar valores típicos según el tipo de sistema.

La Tabla siguiente muestra valores típicos de impedancia característica en función del voltaje nominal del sistema.

Valores típicos de impedancia característica [20].

Tensión Nominal del Sistema. (kV)	Impedancia característica. $Z (\Omega)$
Inferior a 145	450
145 a 345	400
362 a 525	325
765	300

La amplitud de la sobretensión se definirá de acuerdo a lo expuesto respecto a *Energización y recierre de líneas*.

El nivel de protección del pararrayos se elige de la información otorgada por el fabricante y el tiempo de propagación de la onda se calcula en función de la longitud de la línea y la velocidad de propagación cuyo valor típico es aproximadamente:

velocidad del rayo = velocidad de la luz = $0.3 \text{ km}/\mu\text{s}$

La energía absorbida por el pararrayos será mayor conforme menor sea el nivel de protección del pararrayos.

Una vez calculada la energía que el pararrayos debe ser capaz de absorber, se debe calcular la energía específica, dividiendo la energía a ser absorbida para el valor eficaz de la tensión nominal. Esto es:

$$W' = \frac{W}{V_r} \left[\frac{kJ}{kV(V_r)} \right]$$

El valor resultante para la energía específica calculado a partir de la expresión, *se debe entonces comparar con los valores normalizados mostrados en los catálogos de fabricantes* para así seleccionar la clase de descarga de línea correspondiente a un valor de energía específica de al menos el valor calculado.

Por otra parte, las pruebas de descarga de línea según la Norma IEC 60099-4, que un pararrayos especificado para dicha norma debe cumplir, *consisten en aplicar al pararrayos impulsos de corriente para simular su descarga*, considerando condiciones exigentes de absorción de energía para así cumplir satisfactoriamente con las condiciones reales del sistema.

Para esto se considera la expresión junto con los parámetros expuestos en la Tabla. La capacidad de absorción de energía del pararrayos deberá ser mayor o igual que el doble del valor de energía específica calculado en función de la expresión.

$$W = V_{res} (V_L - V_{res}) \frac{T_{wp}}{Z}$$

Parámetros para la prueba de descarga de línea [16].

Clasificación del Pararrayos.	Aplicación recomendada según el Rango de V_s (kV)	Clase de descarga de Línea.	Impedancia Característica de la Línea. Z (Ω)	Duración del pico. T_{wp} (μs)	Tensión de Carga. V_L ($kV_{d.c}$)
10 kA	Mayor a 245	1	$4.9 V_r$	2000	$3.2 V_r$
	Mayor a 300	2	$2.4 V_r$	2000	$3.2 V_r$
	Mayor a 420	3	$1.3 V_r$	2400	$2.8 V_r$
20 kA	Mayor a 525	4	$0.8 V_r$	2800	$2.6 V_r$
	Mayor a 765	5	$0.5 V_r$	3200	$2.4 V_r$

V_L es la tensión de carga usada para la prueba, y es análoga a la sobretensión V_e de la expresión 2.16.

$$W = V_{res} (V_L - V_{res}) \frac{T_{wp}}{Z}$$

Donde:

- W energía a ser absorbida (en condiciones de prueba).
- V_{res} mínimo valor de tensión residual a impulsos de maniobra (kV).
- V_L tensión de carga del generador de impulsos.
- Z es la impedancia característica de la línea (Ω).
- T_{wp} tiempo de duración del pico.

Parámetros para la prueba de descarga de línea [16].

Clasificación del Pararrayos.	Aplicación recomendada según el Rango de V_s (kV)	Clase de descarga de Línea.	Impedancia Característica de la Línea. $Z (\Omega)$	Duración del pico. $T_{wp}(\mu s)$	Tensión de Carga. V_L ($kV_{d.c}$)
10 kA	Mayor a 245	1	$4.9 V_r$	2000	$3.2V_r$
	Mayor a 300	2	$2.4 V_r$	2000	$3.2V_r$
	Mayor a 420	3	$1.3 V_r$	2400	$2.8V_r$
20 kA	Mayor a 525	4	$0.8 V_r$	2800	$2.6V_r$
	Mayor a 765	5	$0.5 V_r$	3200	$2.4V_r$

V_L es la tensión de carga usada para la prueba, y es análoga a la sobretensión V_e de la expresión

$$W = 2V_{ps} (V_e - V_{ps}) \frac{T_w}{Z}$$

En caso de que la absorción de energía requerida sea mayor que la capacidad de absorción de energía del pararrayos seleccionado, se recomienda elegir una corriente nominal de descarga más elevada, o una clase de descarga de línea superior. Otra opción es aumentar la tensión nominal del pararrayos tomando en cuenta que se respeten los niveles de protección adecuados.

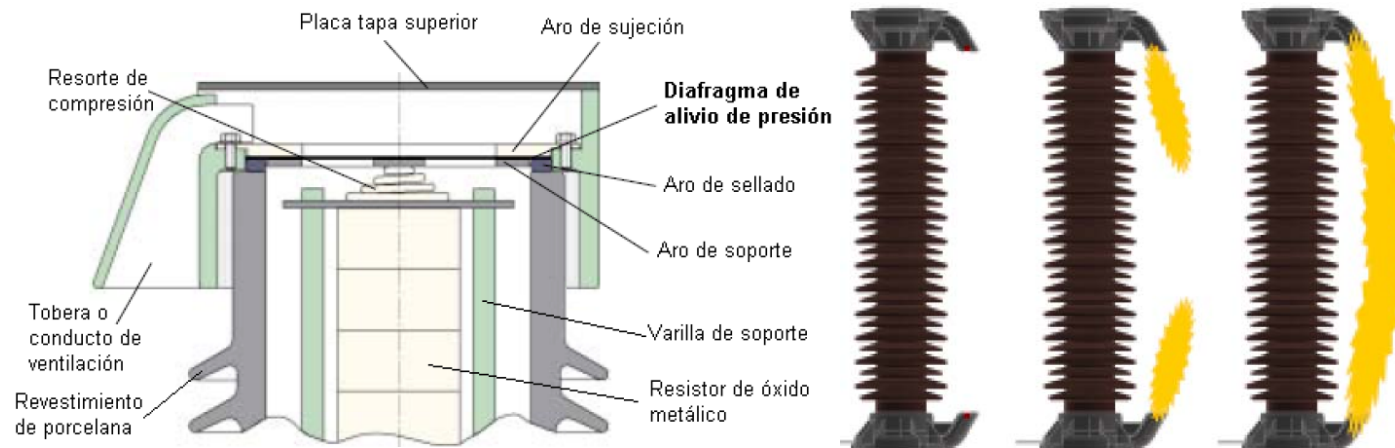
1.8. Clase de alivio de presión.

Se refiere a la capacidad de corriente de cortocircuito del pararrayos, es decir, a la capacidad de soportar corrientes de falla internas sin producir la explosión violenta de su revestimiento o cubierta, ya que esto podría ocasionar daños a los equipos circundantes o daños personales.

Por lo tanto, el criterio para la especificación de un pararrayos será *seleccionar una clase de limitador de presión mayor o igual a la máxima corriente de falla que se pueda presentar.*

A pesar que en la práctica el tener una corriente de corto circuito circulando a través del pararrayos es un evento muy poco probable, los descargadores cuyo revestimiento es factible de explotar cuentan con dispositivos de alivio de presión cuyo objetivo es trasladar la descarga interna, producto de la corriente de falla, hacia la parte externa del pararrayos para liberar al revestimiento de la alta presión que los gases ionizados producto de la descarga ejercen sobre él, evitando así su violenta explosión.

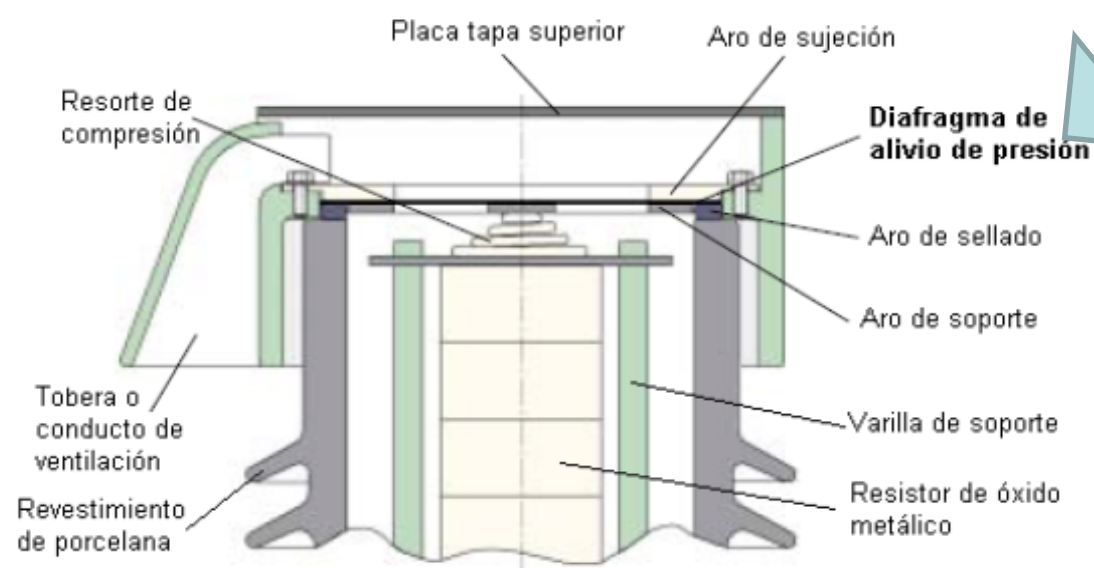
Los dispositivos de alivio de presión consisten de diafragmas que permiten evacuar los gases ionizados del interior del pararrayos. La Figura muestra el diafragma como parte del sistema de sellado y el proceso de alivio de presión en un pararrayos



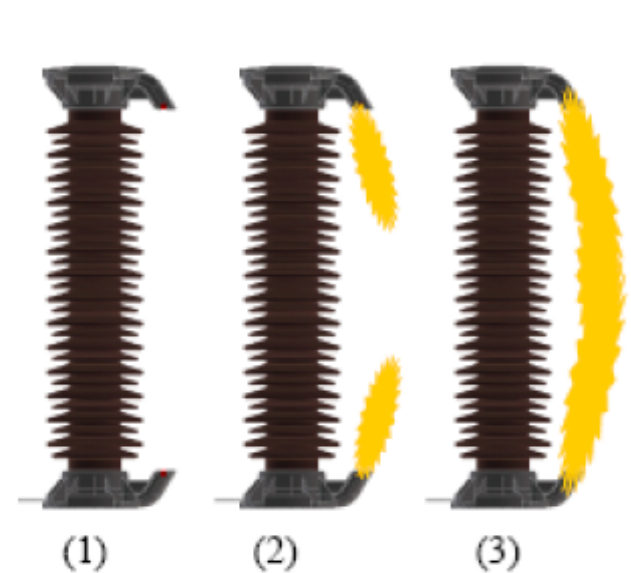
Existen pararrayos cuyo revestimiento es de tipo polimérico y se encuentra colocado directamente sobre la columna de resistencias haciendo nulo el riesgo de explosión, en este caso el revestimiento se rasga con facilidad para permitir la salida de la descarga al exterior haciendo innecesario el sistema de sellado y de alivio de presión.

En cualquiera de los casos, posterior a un evento de esta naturaleza es necesario sustituir al pararrayos.

Dado que no todos los pararrayos cuentan con un dispositivo de alivio de presión, la denominación de “clase de alivio de presión” se ha visto remplazada por la de “capacidad de corto circuito” del pararrayos.

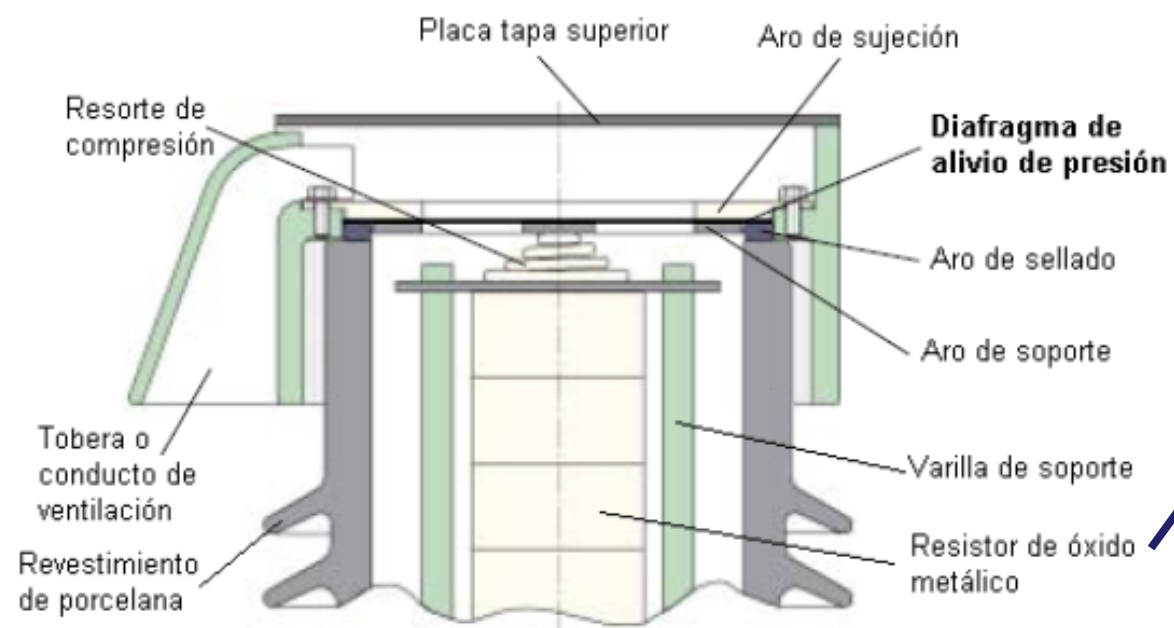


(a)



(b)

(a) Sistema de sellado y alivio de presión de un pararrayos con revestimiento de porcelana [15]. (b) Proceso de alivio de presión [21], (1) Pararrayos sano, (2) Pararrayos con falla interna, el dispositivo de alivio de presión empieza la evacuación de los gases ionizados, (3) El arco interno se traslada hacia el exterior para evitar la explosión.



2. CONDICIONES NORMALES DE SERVICIO.

Los pararrayos especificados bajo la Norma IEC60099-4 cumplen con las siguientes condiciones normales de funcionamiento:

- ☐ Temp. ambiente entre -40°C y $+40^{\circ}\text{C}$
- ☐ Radiación solar máxima: 1.1 kW/m^2
- ☐ Altura no mayor a 1000 msnm.

- ☐ Frecuencia de la fuente de alimentación entre 48 y 62 Hz.
- ☐ La tensión de frecuencia industrial aplicada continuamente entre los terminales del pararrayos no debe superar a la tensión de operación continua del mismo.
- ☐ Condiciones mecánicas (bajo consideración, verificar con el fabricante).
- ☐ Condiciones de contaminación (La norma no ha definido aún requisitos).
- ☐ Velocidad del viento menor a 34 m/s.
- ☐ Montaje vertical.

Por lo tanto durante la selección del pararrayos, *es necesario verificar* que se cumpla con las condiciones antes descritas.

En caso de no cumplir con alguna de estas condiciones, se deberá solicitar al fabricante un pararrayos apropiado para operar bajo las condiciones reales al sitio de instalación.

En la *práctica es común que el fabricante supere los requisitos de la norma* en sus modelos estándares.

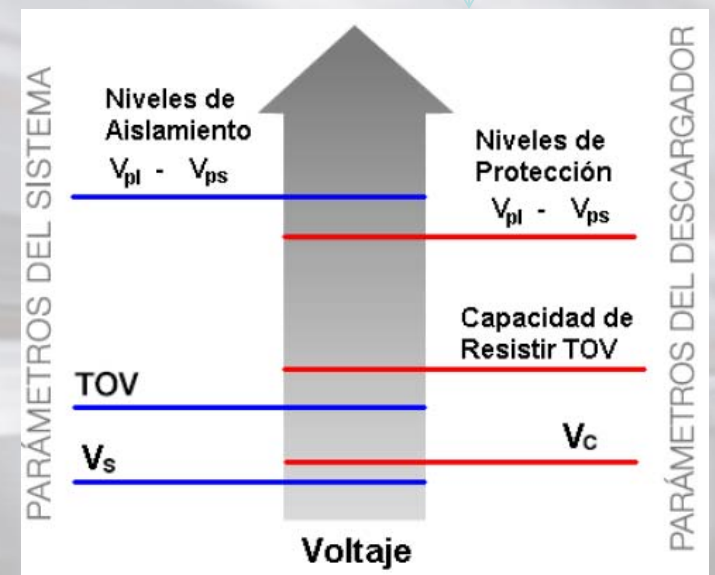
3. PRINCIPIOS DE SELECCIÓN Y APLICACIÓN DEL PARARRAYOS.

El criterio general para la selección de un pararrayos es analizar y contrastar las características del descargador con los requerimientos del sistema en estudio. Las características a ser analizadas se han dividido en dos grandes grupos que son:

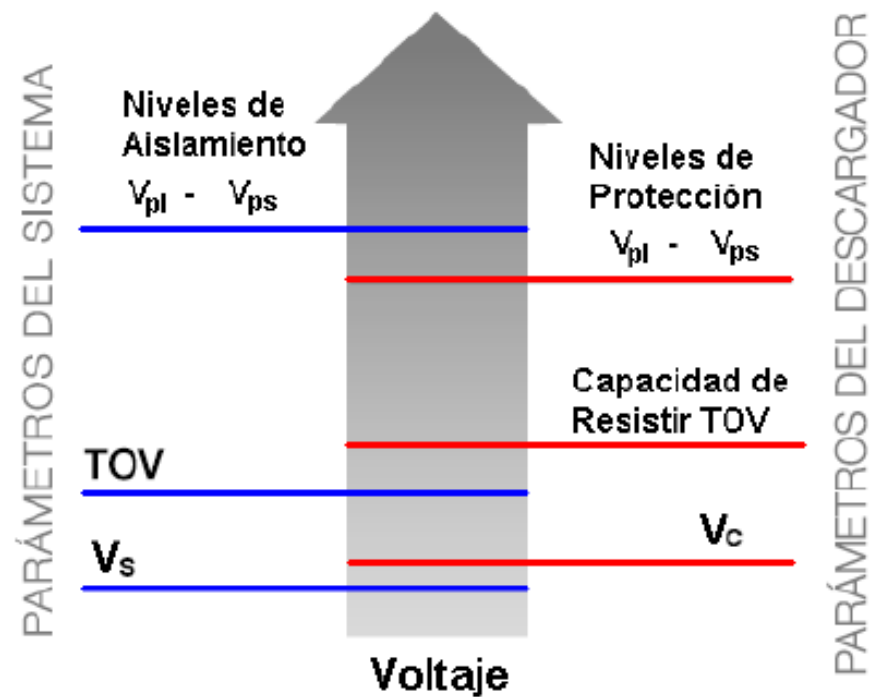
- ☐ *Las características eléctricas.*
- ☐ *Las características mecánicas y medioambientales.*

3.1 Características Eléctricas

Las características eléctricas corresponden con las características descritas en la sección anterior. La Figura muestra la relación que debe existir entre los parámetros del sistema frente a los parámetros del pararrayos.

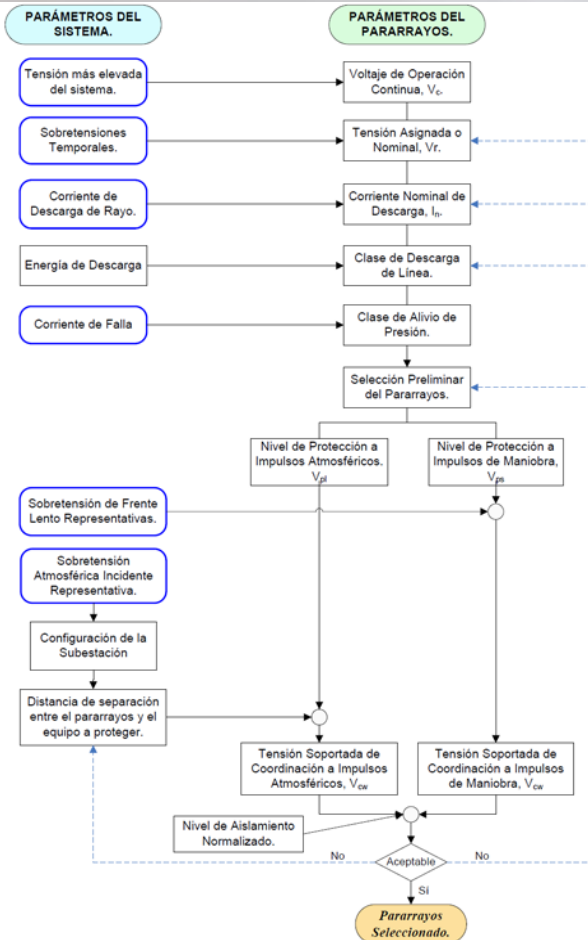


Se puede observar que el *voltaje de operación continua del pararrayos* (V_c) debe ser **mayor** que la *tensión máxima del sistema* (V_s), que el pararrayos debe ser capaz de soportar las sobretensiones temporales que se puedan presentar y que los niveles de protección del pararrayos frente a descargas atmosféricas y de maniobra (V_{pl} y V_{ps}) sean inferiores a los niveles de aislamiento respectivos (V_{wl} y V_{ws}).



Características que debe cumplir el pararrayos frente a las características del sistema [18].

Procedimiento recomendado para la selección del pararrayos.



1. Determinar el voltaje de operación continua del pararrayos en función de la tensión más elevada del sistema.
2. Determinar la tensión asignada o nominal (V_r) en función de las sobretensiones temporales del sistema.
3. Estimar la magnitud de las corrientes de descarga de rayo que se prevé atravesarán al pararrayos así como los requerimientos de descarga de línea para proceder a seleccionar la corriente nominal de descarga.
4. Determinar las características de capacidad de absorción de energía y clase de descarga de línea.
5. Seleccionar la clase de limitador de presión en función de la corriente de falla esperada.

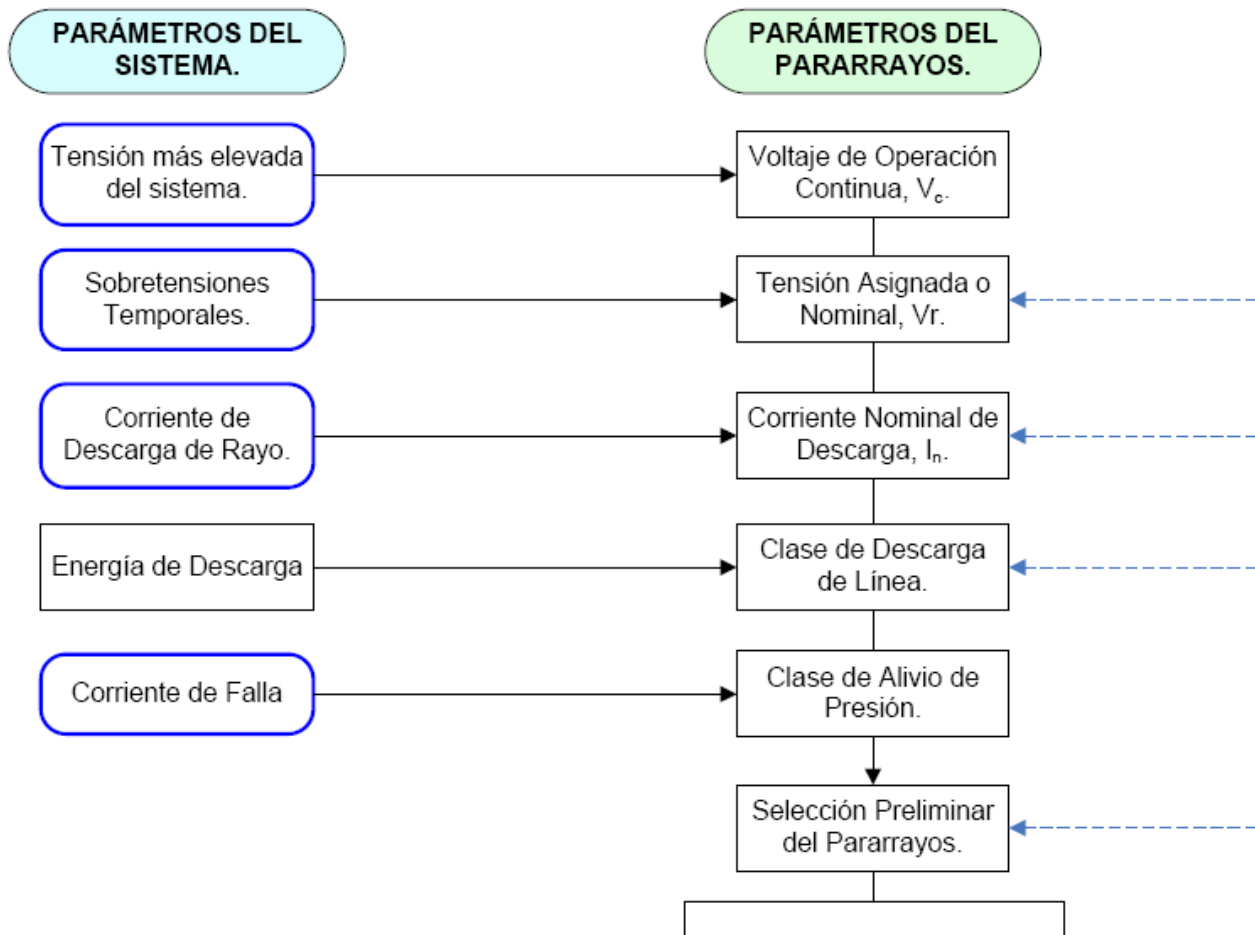
6. Seleccionar un pararrayos que satisfaga con los requerimientos hasta aquí analizados.
7. Determinar y seleccionar las características de protección del pararrayos ante impulsos tipo rayo y tipo maniobra.
8. Ubicar al pararrayos tan cerca como sea posible del equipo a ser protegido.
9. Determinar la tensión soportada de coordinación a impulsos de maniobra, tomando en cuenta las sobretensiones de frente lento representativas.
10. Determinar la tensión soportada de coordinación a impulsos tipo rayo, tomando en cuenta:
 - o La sobretensión por descarga atmosférica incidente representativa determinada por el comportamiento de la línea conectada al pararrayos frente a la descarga atmosférica y una tasa de falla aceptable para el equipo protegido.
 - o La configuración de la subestación.
 - o La distancia entre el pararrayos y el equipo a proteger.

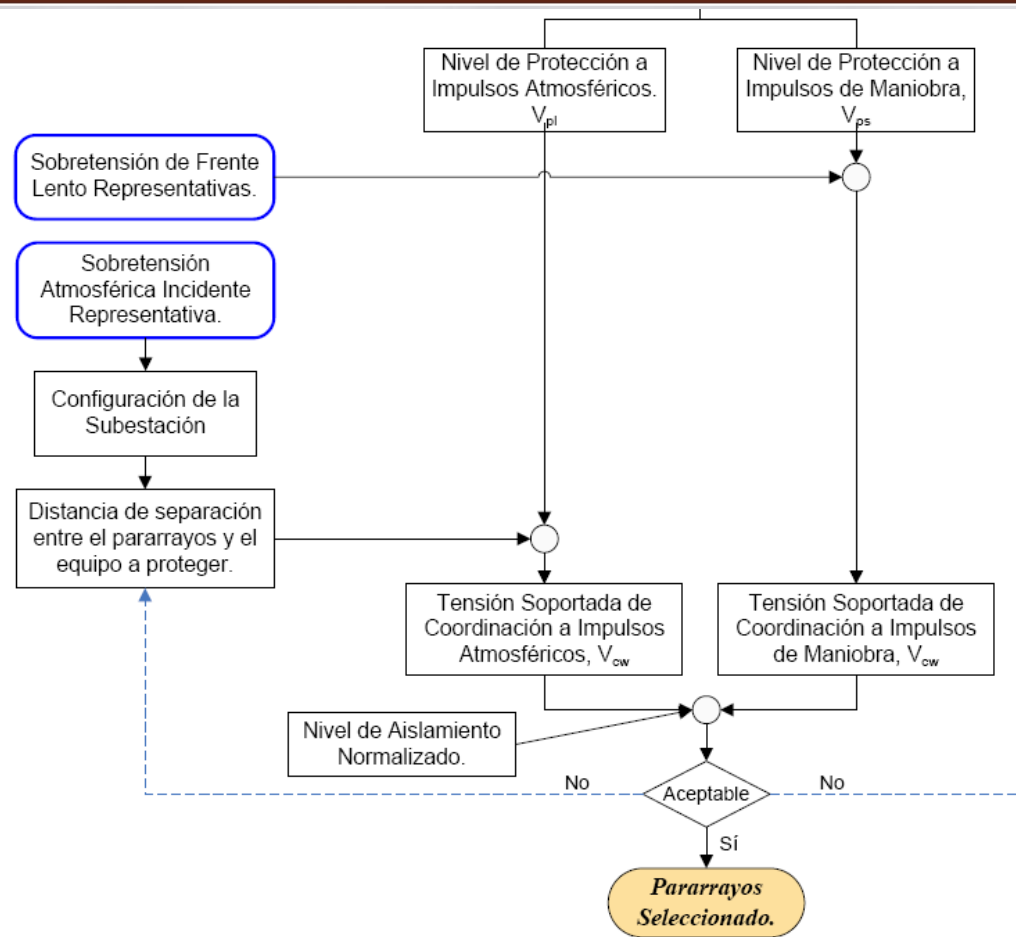
11. Determinar los niveles de aislamiento estandarizados.

12. *En caso de que se desee que el nivel de aislamiento estandarizado del equipo sea inferior que el obtenido*, se recomienda considerar opciones tales como: la elección de un voltaje de operación continua menor, una tensión asignada menor, una corriente nominal de descarga mayor y una clase de descarga de línea mayor que las originalmente obtenidas, sin perder de vista que una tensión asignada inferior puede disminuir la confiabilidad del pararrayos. Otra opción es reducir la distancia entre el pararrayos y el equipo a proteger.

Los puntos del 9 al 12 de este procedimiento una parte del procedimiento de coordinación de aislamiento.

Procedimiento recomendado para la selección del pararrayos....





Protección contra sobretensiones temporales.

En la práctica los pararrayos no limitan sobretensiones temporales, por lo que no se consideran dentro de las características de protección. *Salvo casos especiales, como es el de sobretensiones temporales por resonancia, que ameritan el uso de pararrayos* para limitar e incluso prevenir la sobretensión. Bajo estas circunstancias se debe tener cuidado con la capacidad de absorción de energía térmica para no sobrecargar al descargador.

Protección contra sobretensiones de frente lento.

Esta consideración *es únicamente relevante en sistemas del Rango II* puesto que para sistemas de voltaje inferior el nivel de aislamiento del equipo es lo suficientemente alto como para hacer innecesaria la protección contra las sobretensiones de frente lento.

Los pararrayos de óxido metálico sin explosores son apropiados para la protección de sobretensiones de frente lento debidas a energización y recierre de líneas o a la conmutación de corrientes inductivas o capacitivas, mas no así para las sobretensiones originadas por fallas o despeje de fallas a tierra, debido a que éstas tienen amplitudes inferiores al nivel de protección.

El pararrayos limita la sobretensión fase – tierra a un valor de aproximadamente el doble del valor eficaz de su tensión nominal.

Para la protección contra sobretensiones de frente lento, el conocer con exactitud la amplitud de la corriente a través del pararrayos no es de crucial importancia debido a la extrema no linealidad de los resistores de óxido metálico.

Para sobretensiones debidas a energización o recierre de líneas, se producen corrientes de descarga de entre 0.5 kA a 2 kA de amplitud a través del pararrayos.

Otro factor que no tiene influencia en la protección contra estas sobretensiones es el frente escarpado en las ondas viajeras, lo cual implica que la distancia de separación entre el pararrayos y los equipos dentro de la subestación tampoco se tome en cuenta. Por lo tanto, la tensión que aparece en los bornes del equipo se considera igual a la tensión limitada en los bornes del pararrayos, *es decir, el valor asumido como máximo para la sobretensión representativa de frente lento, para un equipo dentro de la subestación, será igual al nivel de protección a impulsos de maniobra del pararrayos.*

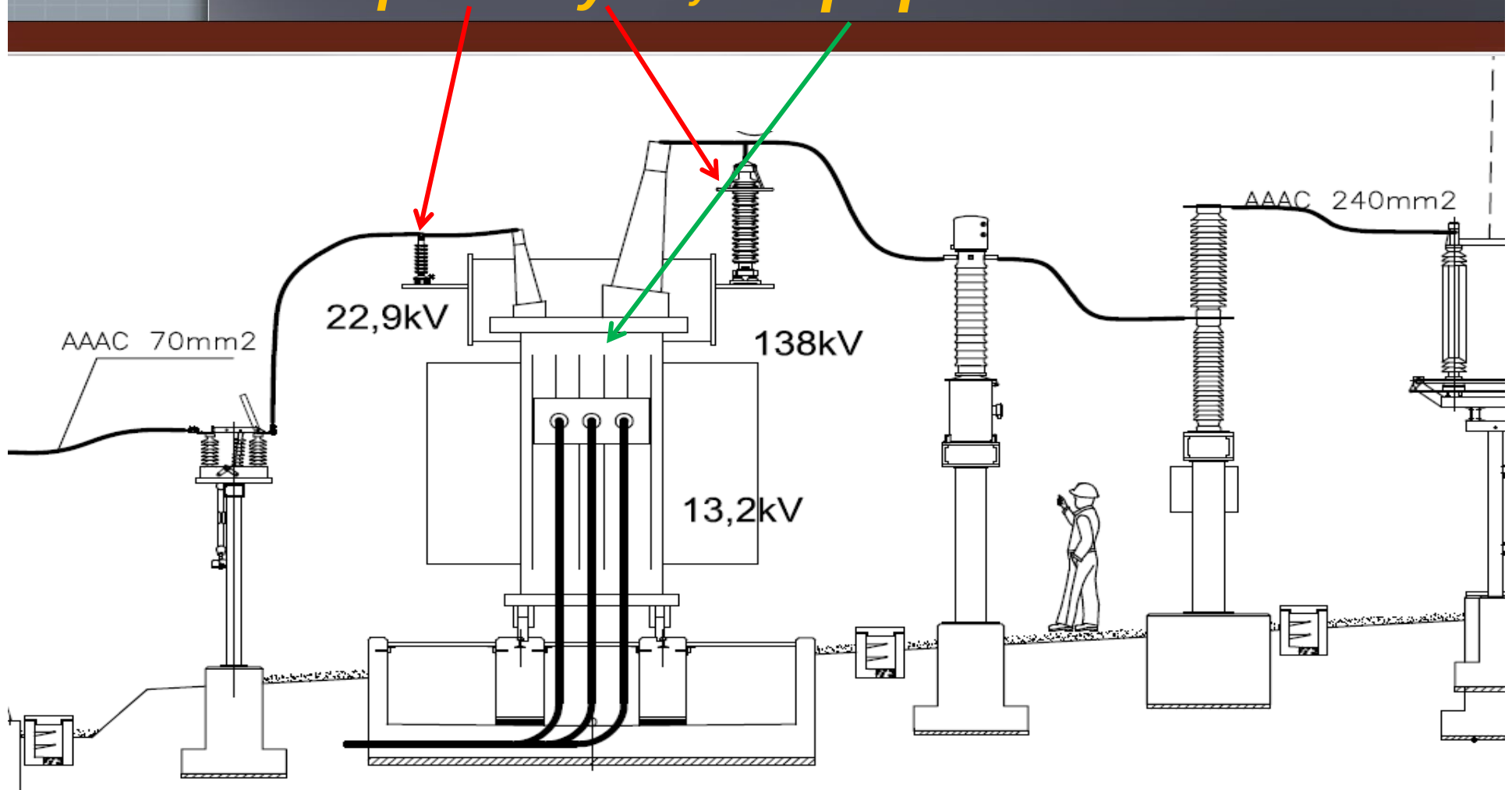
Para sobretensiones fase – fase el valor de sobretensión representativo puede considerarse mayor que el doble del nivel de protección, en el caso de no tener pararrayos conectados entre fases.

El nivel de protección del pararrayos relacionado con la amplitud de la sobretensión de frente lento servirá para definir el nivel de aislamiento. Esta relación se detallará en el proceso de coordinación de aislamiento a tratarse en el siguiente capítulo.

3.1.3. Protección contra **sobretensiones de frente rápido.**

Debido a la alta tasa de crecimiento de la pendiente del frente de onda de estas sobretensiones, los efectos de propagación de la onda entre el pararrayos y el equipo a proteger deben ser tomados en cuenta y la distancia de separación entre ellos juega ahora un papel importante. Como regla general, ocurre que el voltaje en el equipo protegido es mayor que la tensión residual del pararrayos. ***Es por esto que se recomienda reducir al mínimo posible la distancia de separación entre el pararrayos y el equipo*** con mayor prioridad de protección, más aún en el caso de no tener instalados cables de guarda. Es posible proteger a más de un equipo con un mismo pararrayos siempre y cuando se limite la pendiente de la sobretensión, ya que con esto se consigue tener corrientes de descarga y tensiones residuales menores. Esta condición se presenta al tener un apantallamiento confiable tanto de la subestación así como de las líneas asociadas a ella.

Se recomienda reducir al mínimo posible la distancia de separación entre el **pararrayos** y el **equipo**



Las tensiones que entran a la subestación provenientes de líneas protegidas con cables de guarda tienen amplitudes y pendientes de frente de onda menores que aquellas que provienen de líneas sin apantallamiento. **Por esta razón en líneas apantalladas es factible tener mayores distancias de separación entre los pararrayos y el aislamiento a ser protegido, caso contrario es necesario reducir al máximo tales distancias.**

Para el caso de *una única línea aérea protegida por cable de guarda*, un juego de pararrayos puede colocarse en un punto que permita la protección de todos los equipos, dando *preferencia al transformador*.

En caso de *tener varias líneas aéreas no apantalladas entrando a la subestación*, la amplitud y pendiente de las ondas de *sobretensión incidentes se disminuyen por efecto de división de la onda*, no obstante su frecuencia de aparición aumenta.

Para proveer una protección suplementaria, se puede instalar pararrayos a las entradas de línea.

Debido a que la distancia de separación entre el pararrayos y el equipo a proteger debe considerarse, existe dos alternativas para la aplicación del pararrayos en la protección del equipo contra sobretensiones de frente rápido o tipo rayo, estas son:

a) Determinar la tensión soportada de coordinación a impulsos tipo rayo, teniendo como datos:

1. el nivel de protección y
2. la distancia de separación del pararrayos.

b) Determinar la zona de protección del pararrayos, es decir, la máxima distancia de separación para la cual se cumpla con los requerimientos de coordinación de aislamiento, teniendo como datos:

1. nivel de protección del pararrayos y
2. la tensión soportada de coordinación, misma que se obtiene al dividir el valor de placa del equipo para 1.15 (a nivel del mar).

Como la tensión soportada de coordinación forma parte del procedimiento para definir el nivel de aislamiento de los equipos, es necesario calcularla usando los criterios de la opción (a), partiendo del supuesto que la distancia de separación del pararrayos ha sido previamente definida. Esto se puede hacer en base a subestaciones existentes que sirvan de modelo.

3.2. Características mecánicas.

Dentro de las características mecánicas del pararrayos se considera las características del *revestimiento, la resistencia mecánica y el comportamiento ante sismos*.

Revestimiento.

Es importante considerar el tipo y características del revestimiento del pararrayos, ya que éste debe ser el adecuado para proteger a la columna de resistores de óxido metálico del ambiente exterior y para proveer una distancia de fuga adecuada.

Con el fin de garantizar que el revestimiento cumpla con su función, de acuerdo a las pruebas descritas en la Norma IEC 60099-4, este debe soportar las tensiones mostradas en la Tabla siguiente.

Pruebas y tensiones soportadas para el revestimiento de pararrayos [16].

	$I_n = 10 \text{ kA y } 20 \text{ kA}$		$I_n \leq 5 \text{ kA y pararrayos para elevadas corrientes de rayos.}$
	$V_r \geq 200 \text{ kV}$	$V_r < 200 \text{ kV}$	$(1 \text{ kV} \leq V_s \leq 52 \text{ kV})$
Prueba con impulsos tipo rayo.	1.3 * nivel de protección a impulso tipo rayo ¹ .		
Prueba con impulsos tipo maniobra.	1.25 * nivel de protección a impulso tipo maniobra ² .	-	-
Pruebas con tensión de frecuencia industrial (duración = 1 min)	-	1.06 * nivel de protección a impulso tipo maniobra.	0.88 * nivel de protección a impulso tipo rayo.
Nota.- se considera que los factores de 1.3 y 1.25 aplicado a los niveles de protección a impulsos tipo rayo y tipo maniobra respectivamente cubren variaciones en las condiciones medioambientales (altura de hasta 1000 m) y corrientes de descarga superiores al valor nominal. 1 Para alturas superiores a los 1000 msnm, se recomienda adicionar un 10% por cada 1000 m [20]. 2 Para alturas superiores a los 1000 msnm, se recomienda adicionar un 13% por cada 1000 m [20].			

De la Tabla anterior se puede notar que *las tensiones de prueba que debe soportar el revestimiento del pararrayos en sistemas del Rango II son superiores en un porcentaje dado (25% o 30 % hasta 1000 msnm) a su respectivo nivel de protección.*

Estos porcentajes son los suficientes para garantizar que la descarga a tierra ocurra internamente a través del pararrayos sin que se forme una descarga por aire o contorneo en el revestimiento. Bajo este criterio se puede afirmar que las pastillas de óxido de zinc del pararrayos están debidamente protegidas.

A su vez, si se compara las tensiones de prueba resultantes a partir de la Tabla mostrada anterior con los niveles de aislamiento del resto de los equipos de la subestación, se observará que en todos los casos, **los valores de las tensiones soportadas por el aislamiento del pararrayos, serán menores en aproximadamente un 25% a los niveles de aislamiento del resto del equipo.**

Esta diferencia se justifica debido a que el revestimiento del pararrayos es el aislamiento mejor protegido dentro de la subestación, ya que sobre él no aparecerán tensiones superiores a la caída de tensión sobre las resistencias de óxido metálico durante la descarga, es decir, el factor de distancia de separación no tiene influencia.

De aquí que, los valores calculados según la Tabla mostrada anterior son los suficientes para garantizar la no ocurrencia de un contorneo en el aislamiento del descargador.

En caso de seleccionar tensiones soportadas mayores, por ejemplo, tensiones soportadas iguales a las del resto del equipo se tendrán pararrayos con revestimientos innecesariamente grandes y costosos.

Por esta razón el revestimiento del pararrayos solo debe tener las dimensiones físicas que impidan la descarga por aire o contorneo.

Sin embargo, de acuerdo al nivel de contaminación del sitio de instalación del pararrayos sus dimensiones físicas pueden cambiar en función de la distancia de fuga externa.

Comportamiento y Resistencia del Revestimiento a la Contaminación.-

Un exceso de contaminación sobre el revestimiento del pararrayos puede ocasionar:

1. descargas disruptivas entre sus terminales,
2. incremento de temperatura en las resistencias y
3. disturbios en la distribución de voltaje sobre el revestimiento, esto a su vez, provoca descargas parciales internas que pueden dañar las resistencias u otros elementos.

Por tanto es necesario seleccionar un pararrayos que soporte el nivel de contaminación en el sitio de ubicación sin provocar los efectos antes mencionados.

Debido a que el grado de contaminación influye en la aparición de contorneos externos, influye también sobre la distancia de fuga externa del pararrayos, y por lo tanto en sus dimensiones físicas.

Por tanto, *es necesario aumentar la distancia de fuga ante la presencia de contaminación* debido a que en estas condiciones se aumenta el riesgo de contorneo.

De acuerdo a las normas IEC se han establecido cuatro niveles cualitativos de contaminación.

La Tabla siguiente *muestra una descripción de los entornos típicos asociados a cada nivel de polución y las distancias de fuga necesarias para soportar la contaminación en cada uno.*

Nivel de Polución	Ejemplos de entornos ambientales típicos	Mínima Distancia de Fuga Nominal mm/kV ¹
I Ligera	- Áreas libres de industria y con la baja densidad de casas equipadas con plantas de calefacción. - Áreas con la baja densidad de industrias o de casas pero sujeta a los vientos frecuentes y/o lluvia. - Áreas agrícolas en las que se fumigue con fertilizantes o se queme residuos aumentando la contaminación por dispersión del viento. - Áreas montañosas. - Todas estas áreas deberán estar situadas por lo menos de 10 kilómetros a 20 kilómetros del mar y no estar expuestas en forma directa a brisas marinas.	16
II Media	- Áreas con industrias sin producción de humo contaminante y/o con una densidad media de casas equipadas de plantas de calefacción. - Áreas con la alta densidad de casas y/o industrias pero con vientos y/o lluvias frecuentes. - Áreas expuestas a brisas marinas pero no tan cercanas a la costa (al menos a varios kilómetros de distancia) ³	20

III Fuerte	- Áreas con alta densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades con alta densidad de plantas de calefacción que produzcan contaminación. - Áreas cercanas al mar o expuestas a fuertes vientos marinos	25
IV Muy Fuerte	- Áreas de extensión moderada, expuestas a polvo de características conductivas y a humo industrial con presencia de partículas conductivas gruesas. - Áreas de extensión moderada, muy cercanas a la costa, expuestas a la espuma del mar o a vientos marinos excesivamente fuertes. - Áreas desérticas, caracterizadas por carencia de lluvia durante largos períodos de tiempo, expuestas a vientos fuertes que acarrean arena y sal, y sujetadas a la condensación regular.	31
Nota.- esta tabla aplica únicamente para revestimientos de vidrio o porcelana y no incluye algunas condiciones ambientales tales como: nieve y hielo con alto grado de contaminación, lluvias fuertes, zonas desérticas, entre otras. 1. Las distancias de fuga mínimas en aisladores entre fase y tierra se relacionan con el voltaje fase-fase más alto del sistema. 2. Las distancias al mar dependen de la topografía del área costera y de condiciones extremas del viento.		

En condiciones normales de funcionamiento **se recomienda el uso de pararrayos que soporten un nivel de contaminación tipo II.**

En ambientes con *alto grado de contaminación en los que se requiera distancias de fuga mayores a 31 mm/kV* se deberá acordar con el fabricante la elaboración del descargador adecuado.

Bajo estas circunstancias, se debe *también considerar el engrasar o lavar los revestimientos del pararrayos periódicamente y bajo tensión.*

Las normas IEC no han establecido aún procedimientos de prueba respecto de estas condiciones de operación.

En general el aislamiento deberá ser capaz de soportar la tensión más elevada del sistema en forma continua bajo condiciones de contaminación con baja probabilidad de contorneos.

La distancia de fuga seleccionada
para los pararrayos se aplica
también para el resto del
equipamiento de la subestación.

Resistencia mecánica

El pararrayos debe resistir los esfuerzos mecánicos estáticos y dinámicos especificados por el fabricante.

La norma define el procedimiento de prueba para esfuerzos dinámicos como es el caso del momento de flexión.

Los esfuerzos estáticos por lo general no causan mayor inconveniente a los pararrayos, y se pueden reducir significativamente con el uso de conductores y abrazaderas livianas y de menor sección, esta opción es válida debido a que **el pararrayos no conduce altas corrientes en forma continua.**

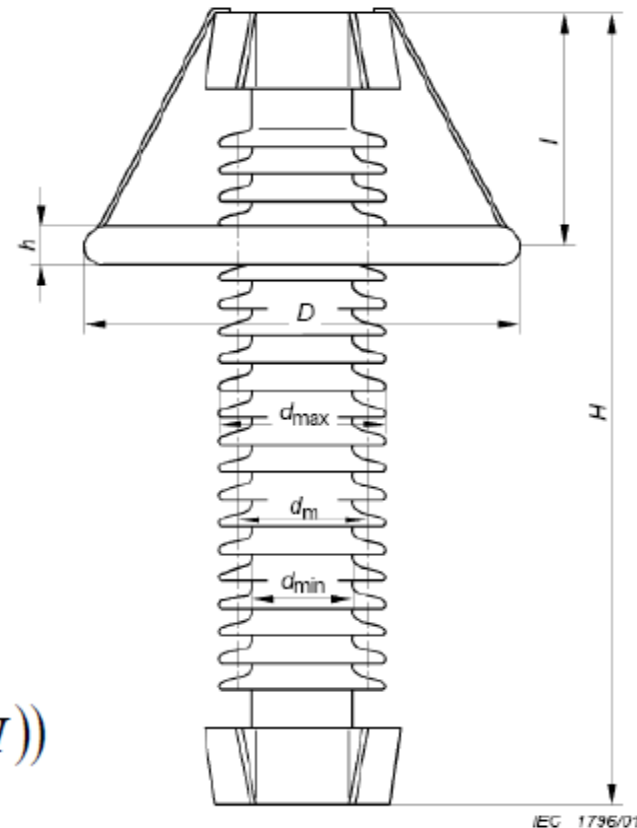
Los esfuerzos dinámicos en pararrayos están representados por el momento de flexión, que es aquel que se produce en la base del pararrayos como resultado de la suma vectorial de las cargas dinámicas que le afectan en sentido perpendicular al eje, como por ejemplo, **la carga del conductor de línea, la carga del viento y el peso del pararrayos.**

De estos, el momento más significativo es el causado por el viento, ya que los otros factores son controlables.

La carga del conductor de línea se evita al tener el conductor de línea conectado al pararrayos lo más corto posible sin exceder el momento de flexión definido por el fabricante.

En función de la Figura mostrada y de la expresión, se puede calcular el momento de flexión debido al viento.

$$M_w = \left(P \times H \times d_m \times C \times \frac{H}{2} \right) + (P \times D \times h \times (H - I))$$



Dimensiones del pararrayos [16]

$$M_w = \left(P \times H \times d_m \times C \times \frac{H}{2} \right) + (P \times D \times h \times (H - I))$$

Donde:

P presión dinámica del viento (N/m²) y está definida por:

$$P = \left(\frac{P_1}{2} \right) \times v^2$$

P₁ densidad del aire a 1.013 bar y 0 °C; igual a 1.29 kg/m³.

d_m valor medio del diámetro del revestimiento y se define como:

$$d_m = \frac{(d_{m\acute{a}x} + d_{m\acute{i}n})}{2}$$

M_w	momento de flexión causado por el viento.
H	longitud del pararrayos.
h	grosor del anillo de distribución de potencial.
D	diámetro del anillo de distribución de potencial.
l	distancia entre el anillo de distribución de potencial y la parte superior.
C	<i>coeficiente de resistencia de las partes cilíndricas. Igual a 0.8.</i>
v	velocidad del viento (m/s).

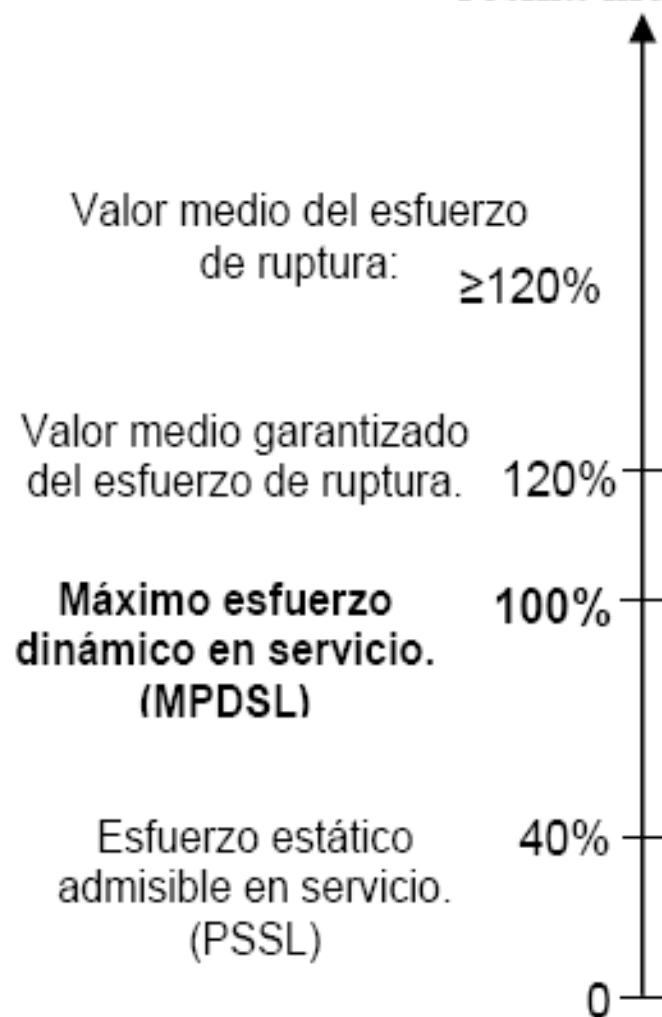
La Figura siguiente muestra la definición de los esfuerzos mecánicos, tanto para revestimientos de porcelana así como de polímero, como porcentaje del máximo esfuerzo dinámico admisible en servicio.

Se puede observar que **los revestimientos de porcelana permiten un esfuerzo estático de tan sólo el 40% de su esfuerzo dinámico**, debido a la fragilidad de la porcelana.

Se tiene también un margen del 20% de seguridad respecto del valor medio del esfuerzo de ruptura.

Los revestimientos de polímero, en comparación con los de porcelana, se deforman visiblemente bajo influencia de fuerzas mecánicas, de ahí que un daño mecánico visible o una deformación permanente pueden aparecer al someter al pararrayos de revestimiento polimérico a esfuerzos mecánicos mayores al esfuerzo máximo admisible de servicio.

Revestimientos de porcelana y resina moldeada.



Revestimientos de polímero (excepto de resina moldeada).

Limite de daños > 100%.

Definición de daños:

- Daño mecánico visible o,
- Deformación permanente >5% de la altura.

Esfuerzo máximo permisible en servicio. 100%



Definición de cargas mecánicas en revestimientos de porcelana y poliméricos [16].

Comportamiento ante sismos.

Tanto en la selección del pararrayos, como del resto del equipo de la subestación, se debe considerar el riesgo de sismos en la zona.

En caso de presentarse requerimientos sísmicos, el fabricante deberá realizar las pruebas pertinentes para garantizar que el equipo resista las exigencias solicitadas.

Como resultado se puede tener mayores requerimientos mecánicos que los seleccionados de acuerdo al ítem anterior.

Comportamiento ante sismos....

Cumplidos los requerimientos eléctricos y mecánicos, la selección del pararrayos entre las diferentes posibles opciones, que proporcionan el mismo grado de protección, **dependerá de la importancia del equipo a ser protegido y se seleccionará desde el punto de vista de coordinación de aislamiento.**

Pararrayos: Fabricante Tridelta





Altura: 6.5m
Línea de Fuga: 16700mm



Pararrayos para Alta Tensión (station class) con envoltente en porcelana.



Pararrayos Distribution class, para media tensión



Contadores de descarga.

Pararrayos Alta Tensión. StationClass



Envolvente
en porcelana.
800kV



Envolvente
polimérica en
diseño
tubular.
500kV

Envolvente
polimérica
diseño
arrollado
170kV

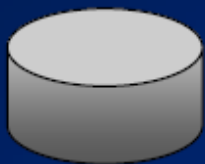




Empaque de los
Pararrayos.

Discos de ZnO en
Almacén.

Discos de ZnO



Fin parte 2

Gracias

