

AUTOVÁLVULAS EN LINEAS DE ALTA TENSIÓN

Análisis técnico para mejoras del diseño de puesta a tierra

1. ¿Qué es una autoválvula o pararrayos de alta tensión?

Una **autoválvula** es un dispositivo de protección contra sobretensiones de potencia, utilizado en **redes de media y alta tensión**, cuyo objetivo es **limitar las sobretensiones transitorias**, principalmente de origen atmosférico.

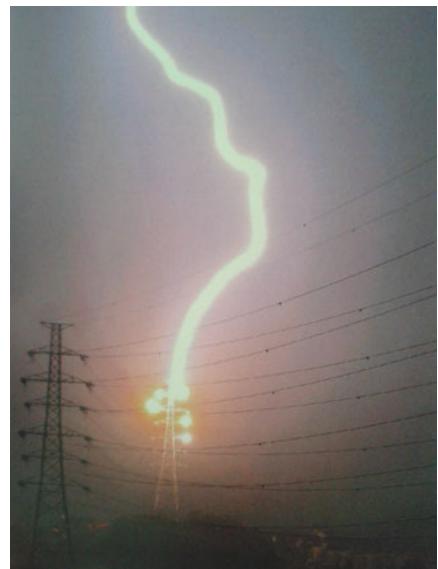
Está constituida por:

- **Semiconductores cerámicos** (habitualmente óxidos metálicos tipo ZnO o silicio),
- dispuestos **en serie**,
- alojados en un cuerpo aislante de **cerámica o resina epoxi**,
- con un comportamiento **no lineal de la resistencia** en función de la tensión aplicada.

En condiciones normales de servicio, la autoválvula presenta una **alta impedancia**.

Cuando aparece una sobretensión impulsiva, su impedancia **colapsa durante microsegundos**, derivando la energía hacia tierra y protegiendo los equipos aguas abajo.

Hasta aquí, **la teoría es correcta**.



2. Configuración habitual de instalación

(y el origen del problema)

En la práctica, **la mayoría de las instalaciones actuales** presentan una configuración común:

- Las **autoválvulas** se montan sobre la **misma estructura metálica de la torre**.
- Se **referencian eléctricamente a dicha estructura**, que a su vez:
 - está conectada a la **misma toma de tierra general**,
- Cuando actúan, **las tres fases se derivan simultáneamente a tierra** a través de la estructura metálica.

Desde un punto de vista **normativo**, esta solución es aceptada.

Desde un punto de vista **eléctrico clásico**, parece coherente.

👉 Desde un punto de vista **físico-impulsional del rayo**, aquí empieza el problema.

3. El detalle crítico ignorado: la geometría del conexionado

La conexión típica presenta el siguiente esquema:

- El **conductor de la línea** llega a la autoválvula en **tramo recto**.
- Tras el punto de conexión, el conductor:
 - realiza una **curva pronunciada** ($\approx 160\text{--}180^\circ$),
 - desciende hacia la toma de tierra.

Ahora introduzcamos un factor que **no suele considerarse en proyecto**:

La sobretensión asociada al rayo:

- No se comporta como una corriente de régimen permanente.
- Se propaga como un **fenómeno impulsivo electromagnético**, con:
 - frentes extremadamente rápidos,
 - altísimas derivadas de corriente (di/dt),
 - y fuerte componente de campo eléctrico y magnético.

4. Simulación conceptual (no teórica, sino física)

Imaginemos que somos la descarga:

- Viajamos **asociados al campo del conductor**, a velocidades cercanas a la propagación electromagnética.
- Al llegar al punto del aislador cerámico:
 - el conductor **no continúa recto**,
 - sino que describe una **curva cerrada hacia abajo**.
- Justo enfrente:
 - existe una **estructura metálica de gran masa**,
 - conectada a tierra,
 - con una **diferencia de potencial mínima** respecto al plano de tierra.

👉 En ese escenario, **la descarga no “elige” la curva**.

👉 **Sigue la trayectoria rectilínea más corta**, saltando directamente a la estructura.

Esto **no es una hipótesis gratuita, son hechos reales**.

5. Evidencias de campo (experiencia real)

En múltiples instalaciones se han observado:

- Conductores de cobre **seccionados limpiamente** en zonas de curvatura.
- Cortes **sin fusión**, sin signos térmicos progresivos.
- Apariencia de **corte neto**, como producido por un arco frontal.
- Daños coherentes con:
 - **arco eléctrico por diferencia de potencial,**
 - **efecto geométrico de la curva,**
 - y comportamiento impulsivo del rayo.

Estos efectos **no se explican** mediante:

- cálculos de corriente RMS,
 - ni modelos de baja frecuencia,
 - ni criterios clásicos de continuidad eléctrica.
-

6. ¿Cómo actúa realmente la autoválvula en este contexto?

La autoválvula **sí conmuta correctamente**:

- los semiconductores entran en conducción,
- se produce la derivación a tierra durante microsegundos.

! Pero el problema no está en la autoválvula

! Está en el concepto de referencia a tierra y en la geometría del camino

Cuando todas las autoválvulas:

- comparten **estructura metálica,**
- comparten **plano de tierra,**
- y presentan **trayectorias curvas,**

el sistema deja de comportarse como un limitador controlado
y pasa a comportarse como un **disparador de arcos no deseados.**

CONCLUSIONES

La autoválvula funciona exactamente como fue diseñada.

Lo que no siempre funciona es el entorno eléctrico y geométrico en el que se le obliga a trabajar.

1. El rayo no es un fenómeno parametrizable de forma fija

El primer error conceptual recurrente es **tratar el rayo como un evento eléctrico repetible**, cuando en realidad:

- no existe una curva típica real,
- no hay dos rayos iguales,
- y sus efectos dependen simultáneamente de:
 - la carga,
 - el entorno resistivo,
 - la geometría del sistema,
 - y los caminos de retorno disponibles.

Las curvas 10/350 µs, 8/20 µs o similares **son útiles en laboratorio**, pero **no describen fielmente** el comportamiento del rayo en una instalación real.

Diseñar sistemas de protección basados en **modelos eléctricos fijos** conduce inevitablemente a **interpretaciones incompletas del riesgo**.

2. La sobretensión se acopla simultáneamente a todos los conductores

Cuando un rayo impacta en una línea:

- la sobretensión aparece **en todos los conductores al mismo tiempo**:
 - fases,
 - neutro,
 - cable de guarda o tierra,
- independientemente de que estén o no energizados.

La descarga:

- se propaga en **microsegundos**,
- aguas arriba y aguas abajo,
- siguiendo **los caminos de menor impedancia electromagnética**, no solo óhmica.

Por tanto, **no es correcto analizar cada conductor como un elemento aislado.**

3. El error crítico: referencia común de las autoválvulas a la estructura

En la práctica habitual:

- las autoválvulas de las tres fases:
 - se montan sobre el mismo soporte,
 - se referencian al mismo potencial,
 - y comparten herrajes y bajantes de tierra.

Esto provoca que, cuando actúan:

- las tres fases **queden momentáneamente cortocircuitadas entre sí**,
- a través de la estructura y el sistema de tierra,
- creando una **configuración en estrella no deseada**.

Este efecto:

- no es un fallo del equipo,
 - es una **consecuencia directa del diseño de la instalación**.
-

4. El residual de tensión y el efecto térmico amplifican el problema

Las autoválvulas **no derivan el 100 % de la sobretensión**:

- mantienen un **residual de tensión** ($\approx 20\%$, según fabricante),
- ese residual genera:
 - corriente de fuga,
 - autocalentamiento del semiconductor,
 - reducción progresiva de su resistencia instantánea.

En un evento de rayo:

- este proceso ocurre en **microsegundos**,
- pero es suficiente para:
 - intensificar el cruce de fases,
 - aumentar la fuga a tierra,
 - y elevar las tensiones de paso y contacto.

El sistema entra en una **realimentación destructiva** donde:

cuanto mejor “resiste” un componente, mayor estrés induce al resto.

5. El sistema no “falla”: compite por sobrevivir

Durante una sobretensión severa:

- **gana el elemento que más aguanta**, no el más seguro:
 - si la autoválvula es muy robusta → actúan los limitadores aguas arriba,
 - si está ajustada → suele explotar una fase y las otras quedan dañadas,
 - si todo aguanta → la energía retorna por tierra y neutro hacia el transformador.

En este último caso:

- pueden producirse arcos internos,
- degradación del aislamiento,
- ignición del aceite,
- y destrucción total del transformador.

Todo ello **sin que ningún equipo haya “fallado” según su ficha técnica**.

6. El problema no es la autoválvula, es el concepto de puesta a tierra

La causa raíz **no está en el dispositivo**, sino en:

- compartir potenciales,
- compartir estructuras,
- compartir caminos de retorno,
- y forzar trayectorias curvas a un fenómeno impulsivo.

Mientras las autoválvulas:

- se conecten a una tierra común,
- y se integren estructuralmente sin independencia funcional,

el sistema seguirá comportándose como un **distribuidor de energía del rayo**, no como un disipador controlado.

7. Cambio de paradigma: de “derivar el rayo” a “gestionar la sobretensión”

La solución **no pasa por añadir más equipos**, sino por:

- repensar el diseño del sistema,
- independizar funcionalmente las derivaciones,
- respetar la física del fenómeno impulsivo,
- y evitar referencias comunes que inducen arcos y cruces de fase.

SOLUCIÓN TÉCNICA PROPUESTA

Corrección de concepto en la instalación de autoválvulas de alta tensión

La solución **no consiste en añadir nuevos equipos**, ni en sobredimensionar protecciones, sino en **modificar el concepto de instalación y conexión a tierra** de las autoválvulas, alineándolo con el comportamiento real de las sobretensiones impulsivas.

1. Aislamiento eléctrico del herraje de soporte

Las autoválvulas **no deben compartir referencia eléctrica directa con la estructura metálica de la torre**.

- El herraje de soporte debe cumplir **únicamente una función mecánica**.
- La autoválvula debe quedar **eléctricamente aislada** del soporte y de la estructura.
- Se evita así que la torre actúe como camino preferente de descarga por diferencia de potencial frontal.

Este aislamiento reduce drásticamente:

- arcos no deseados,
- descargas rectilíneas por efecto de campo,
- y esfuerzos térmicos sobre conductores y herrajes.

2. Bajante de descarga independiente por cada autoválvula

Cada autoválvula debe disponer de:

- un **bajante de tierra propio**,
- eléctricamente independiente,
- sin compartir conductor ni herrajes con otras fases.

Este criterio elimina:

- el cortocircuito instantáneo entre fases,
- la configuración en estrella no intencionada,
- y la realimentación térmica entre autoválvulas.

El rayo deja de “elegir” entre fases y estructura, y se le ofrece **un camino único, rectilíneo y controlado**.

3. Tomas de tierra independientes y separadas físicamente

Cada bajante debe conectarse a:

- una **toma de tierra propia**,
- independiente de las demás,
- separada **como mínimo 3 metros** entre electrodos.

Esta separación:

- reduce el acoplamiento resistivo y capacitivo entre tierras,
- evita la elevación simultánea del potencial del terreno,
- y mejora la disipación real de la energía impulsiva.

El sistema pasa de ser un “plano común de descarga”
a un **sistema distribuido de disipación controlada**.

4. Beneficios directos de la mejora propuesta

Esta modificación de concepto aporta beneficios claros y medibles:

- ✓ aumento de la vida útil de las autoválvulas
- ✓ reducción significativa de explosiones y degradaciones internas
- ✓ menor estrés térmico y eléctrico en la red
- ✓ disminución de costes de mantenimiento correctivo
- ✓ mejora de la calidad y continuidad del suministro
- ✓ reducción del riesgo de retorno de sobretensiones hacia el transformador

Todo ello **sin alterar la filosofía de protección**,
solo respetando la física real del fenómeno.

Conclusión técnica *Una autoválvula no falla por exceso de rayo, falla por compartir un camino que no le corresponde.*

Separar funciones, separar tierras y respetar trayectorias impulsivas
no es una opción de diseño: **es una obligación técnica**.

Autores:

Ángel Rodríguez y Roberto Leal

Investigación aplicada · Protección frente al rayo · Microclima eléctrico. En diálogo constante con **AITA**, inteligencia artificial técnica y colaborativa, como apoyo al análisis, la reflexión y la divulgación del conocimiento.

Angel Rodriguez angel@andorra.ad

Roberto leal: robertoleal@elpararrayos.com.ar