

**Líneas Aéreas de Distribución de Energía Eléctrica: Componentes,
Fundamentos y Esquemas de Protección**

Daniel Feranndo Aranda Contreras

Escuela E3T

Universidad Industrial de Santander

Author Note

El autor agradece el apoyo de su equipo de investigación. Correspondencia:
daniel2221648@correo.uis.edu.co

Líneas Aéreas de Distribución de Energía Eléctrica: Componentes, Fundamentos y Esquemas de Protección

Este informe analiza los componentes clave de los sistemas de **distribución eléctrica** de media y baja tensión (MT/BT), fundamentales para la fiabilidad y seguridad del suministro. El estudio describe los elementos estructurales (postes, aisladores), los **herrajes** (conectores de compresión) y los dispositivos de protección. Se detalla el uso de fusibles, descargadores de sobretensión (DPS) y **reconectores**. Se destaca que los reconectores son cruciales para el servicio, ya que gestionan entre el 50% y el 80% de las fallas temporales. La conclusión subraya que la eficiencia del sistema depende de la coordinación entre herrajes robustos y la integración de protecciones activas, como los reconectores automáticos, para asegurar la continuidad y la calidad del servicio.

Palabras clave: Distribución eléctrica, media tensión, baja tensión, reconectores, herrajes, aisladores, protección.

Introducción

Un sistema de distribución eléctrica es la porción de la infraestructura de suministro de energía que toma la electricidad de los circuitos de transmisión de alta tensión y la entrega a los clientes. Este sistema se estructura típicamente en niveles jerárquicos de voltaje.

Media Tensión (MT)

Generalmente, los circuitos de distribución primaria se consideran de "**media tensión**" (medium-voltage), abarcando normalmente desde 600 V hasta 35 kV. Las líneas de distribución primaria (alimentadores) operan típicamente entre 2.2 kV y 34.5 kV. Estos circuitos distribuyen la energía desde las subestaciones hacia las áreas de consumo.

Baja Tensión (BT)

Cerca de cada usuario final, un transformador de distribución reduce el voltaje de la distribución primaria a un circuito secundario de **bajo voltaje** (low-voltage secondary circuit). Las tensiones de utilización comunes en América del Norte son 120/240 V. Los sistemas de distribución secundaria están diseñados para mover la energía solo unas pocas cientos de yardas de manera eficiente, lo que restringe la ubicación de los transformadores de servicio.

Importancia del Sistema de Distribución

El sistema de distribución es fundamental por varias razones:

1. **Fiabilidad y Calidad del Servicio:** Es a menudo el componente más crítico en términos de su efecto en la fiabilidad (*reliability*) y la calidad del servicio. El rendimiento del sistema de distribución determina más del 90% de la fiabilidad del servicio a los clientes.
2. **Entrega Universal:** Los sistemas de distribución entregan electricidad literalmente en todas partes, a clientes concentrados en ciudades, en los suburbios y en regiones muy remotas.

3. **Seguridad:** La seguridad es una consideración muy importante en el diseño, operación y mantenimiento de las instalaciones de distribución, incluyendo aspectos como la protección contra rayos y la puesta a tierra.

Desarrollo

Herrajes (*Hardware*)

Los herrajes (conectores y accesorios) son a menudo los eslabones débiles en el sistema aéreo, debido a ambientes hostiles, malos diseños o, más comúnmente, a una instalación deficiente.

1. **Abrazadera de suspensión:** Las líneas aéreas utilizan construcciones de suspensión. Las estructuras aéreas requieren herrajes con suficiente resistencia mecánica para soportar el peso de los conductores, el hielo acumulado y resistir la presión del viento.
2. **Grapa de retención:** Están relacionadas con los conectores y empalmes. Los empalmes automáticos están disponibles para conductores bajo tensión, donde abrazaderas dentadas dentro del empalme sujetan el conductor.
3. **Pernos** (de anclaje y de suspensión): Los pernos pasantes (*through bolts*) se utilizan en construcciones de doble brazo (*double-arming*).
4. **Tornillos de seguridad:** Las fuentes mencionan el uso general de herrajes, pero no se proporciona una descripción específica o el uso de "tornillos de seguridad" con esa terminología.
5. **Pasadores y arandelas de seguridad:** Los aisladores son a menudo del tipo de perno (*pin type*). Añadir una arandela de aluminio o cobre sobre el brazo horizontal (*crossarm*) bajo la brida del perno de acero puede reducir la rotura del aislador por choque térmico.
6. **Conector de compresión:** La mayoría de los conectores primarios utilizan algún tipo de compresión para unir conductores. Utilizan matrices y herramientas para apretar dos conductores y el conector.

7. **Mordaza de conexión a tierra:** Los herrajes de puesta a tierra incluyen cables de bajada conectados al neutro *multigrounded* y deben poder manejar la corriente de falla total.
8. **Separadores para conductores:** Los cables espaciadores (*spacer cables*) son una configuración empaquetada que utiliza un cable mensajero para sujetar tres conductores de fase con cable cubierto.
9. **Guardacables:** Implícito en las cubiertas de protección. Los protectores de bujes y los cables cubiertos son métodos muy buenos para reducir las interrupciones causadas por animales.
10. **Aislador de perno:** Los aisladores se clasifican como de tipo *pin* (perno), tipo poste o de suspensión.

Postes

Los postes son elementos estructurales cruciales para la construcción de líneas aéreas. Las líneas de distribución aéreas utilizan postes, normalmente de 30 a 45 pies de altura, instalados de 6 a 8 pies de profundidad.

Comparación de materiales

- **Madera** (*Wood*): Es el principal material utilizado. La madera tratada dura mucho tiempo, es fácil de escalar y aumenta el aislamiento. Los postes de madera pueden pudrirse.
- **Acero** (*Steel*): Las estructuras de acero y concreto reducen considerablemente el nivel de aislamiento (*Critical Flashover Voltage, CFO*).
- **Concreto** (*Concrete*): Al igual que con el acero, el uso de estructuras de concreto reduce significativamente el CFO.
- **Fibra de Vidrio** (*Fiberglass*): También se utiliza fibra de vidrio. Las abrazaderas de aisladores de fibra de vidrio se utilizan en construcciones sin crucetas (*armless constructions*).

Aisladores

Los aisladores se utilizan para evitar fugas de voltaje y el contacto con tierra.

Clasificación y Tipos

Los aisladores utilizados en líneas aéreas son de tipo *pin* (perno), tipo poste o de suspensión.

- **Aisladores Tipo Pin** (*Pin Type*): Se montan en pernos o pasadores.
- **Aisladores de Suspensión** (*Suspension Type*): Se utilizan en líneas aéreas.
- **Aisladores Tipo Poste** (*Post Type*): Pueden usarse en construcciones sin cruceta.

Comparación de Materiales

- **Porcelana** (*Cerámica*): Históricamente comunes. Los arcos eléctricos pueden dañarlos. Una falla interna en una carcasa de porcelana puede explotar y expulsar la porcelana como metralla.
- **Vidrio** (*Glass*): Las fuentes no describen explícitamente su uso principal en distribución.
- **Polímeros** (*Composite/Polymer*): Alternativa a la porcelana. Tienen un rendimiento superior para los arcos superficiales. Su principal ventaja es un modo de falla más seguro.

DPS y Protecciones

DPS (Dispositivos de Protección contra Sobretensiones / Surge Protective Devices)

Se refieren a los descargadores de sobretensión (*surge arresters*), cuya función es la protección contra los rayos y las sobretensiones.

Principio de Funcionamiento y Función: Los descargadores de sobretensión (DS) de **óxido metálico** (*Metal-Oxide Surge Arresters, MOV*) son tan no lineales que no requieren un espacio de aire (*gap*). Bajo condiciones normales, el DS es un circuito abierto, pero cuando se dispara, se convierte virtualmente en un cortocircuito.

Protecciones (Protective Equipment)

La protección contra cortocircuitos o sobrecorriente es muy importante. El equipo de protección está diseñado para detectar y aislar el equipo dañado.

Principio de Funcionamiento: La protección se basa en la selección y coordinación de dispositivos para aislar y despejar fallas eficientemente con el menor impacto posible.

Dispositivos de Protección Clave:

- **Interruptores de Circuito** (*Circuit Interrupters/Breakers*): Pueden interrumpir corrientes normales y las muy altas corrientes asociadas con una falla.
- **Fusibles de Expulsión** (*Expulsion Fuses*): Son los dispositivos de protección más comunes en distribución, de bajo costo. Se aplican a menudo en un cortacircuito (*cutout*).
- **Fusibles Limitadores de Corriente** (*Current-Limiting Fuses, CLFs*): Destacan por su muy alta capacidad de despeje de fallas, con clasificaciones simétricas máximas de interrupción de hasta 50 kA.

Reconectores (*Reclosers*)

Definición y Función

Un **Reconector de Circuito Automático** (*Automatic Circuit Recloser*) es un dispositivo autocontrolado para interrumpir y reabrir automáticamente un circuito de corriente alterna, siguiendo una secuencia predeterminada.

Los reconectores son fundamentales porque entre el 50% y el 80% de las fallas son temporales. Si un reconector despeja una falla y vuelve a cerrar, la mayoría de las veces la falla ha desaparecido.

Tipos

Los reconectores se clasifican según su medio de interrupción y control:

- **Según el Medio de Interrupción/Aislamiento:** Vacío u aceite. El medio aislante puede ser aceite, aire, un dieléctrico sólido o SF_6 .

- **Según el Control:**

- **Control Electrónico** (Digital): La tecnología más moderna. Ofrece mayor flexibilidad y la capacidad de ser reprogramado dinámicamente.
- **Control Hidráulico**: Utiliza resortes y sistemas hidráulicos.
- **Control Electromecánico**: (Histórico/híbrido) El relé para el disparo es electromecánico.

Aplicaciones

Se utilizan en la subestación como interruptores de alimentadores, en el alimentador principal (unidades trifásicas) y como unidades monofásicas en derivaciones (*taps*) en lugar de fusibles.

Conclusiones

Los componentes de un sistema de distribución de media y baja tensión son bloques de construcción interconectados, donde la selección y el diseño coordinado son críticos para la eficiencia y la seguridad.

Componentes Pasivos (Herrajes y Estructura) y su Rol en Seguridad y Eficiencia

- **Postes y Aisladores**: La elección del material del poste (principalmente madera, acero, concreto o fibra de vidrio) impacta la seguridad y el aislamiento. El uso de aisladores de polímero ofrece un modo de falla más seguro que la porcelana.
- **Puesta a Tierra**: La puesta a tierra del sistema, como el neutro *multigrounded*, es una defensa principal contra descargas eléctricas peligrosas y sobretensiones, garantizando un sistema seguro.

Componentes Activos (Protecciones y Reconectores) y su Rol en Fiabilidad y Seguridad

- **Protecciones (Fusibles y Dispositivos de Protección)**: Dispositivos como los fusibles y los interruptores son vitales para interrumpir la corriente de falla y

aislar rápidamente el equipo dañado. Los fusibles limitadores de corriente (CLFs) son esenciales para la seguridad en áreas de alta corriente de falla.

- **DPS (Descargadores de Sobretensión):** Los DS, especialmente los de óxido metálico, protegen activamente el equipo contra las sobretensiones atmosféricas (rayos), previniendo daños permanentes.
- **Reconectadores:** Son fundamentales para la fiabilidad del servicio, ya que permiten el recierre automático tras una falla temporal, lo que evita interrupciones prolongadas en la mayoría de los casos (50% a 80% de las fallas aéreas). Un recierre rápido mejora la calidad del servicio.

Herrajes y Componentes Eléctricos



Figure 1

Abrazadera de Suspensión

Nota. Herraje utilizado para suspender cables o conductores de un soporte.

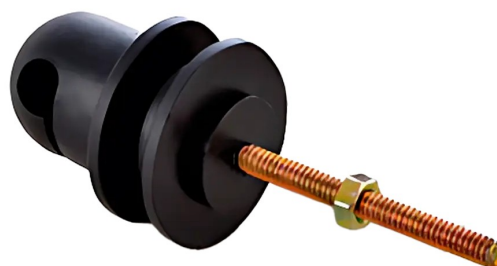


Figure 2

Aislador de Perno (Spool Insulator)

Nota. Aislador de bajo voltaje, usualmente montado en un perno para líneas secundarias.

**Figure 3**

Aislador Eléctrico Tipo Pin

Nota. Aislador montado en un pin o espiga, común en líneas de distribución de voltaje medio.

**Figure 4**

Aislador Eléctrico Tipo Poste

Nota. Aislador sólido utilizado para montar conductores en líneas aéreas.

**Figure 5**

Aislador Eléctrico Tipo Suspensión

Nota. Cadena de aisladores utilizada para suspender conductores en torres de alta tensión.

**Figure 6**

Conector de Compresión

Nota. Dispositivo utilizado para unir conductores aplicando presión mecánica (compresión).



Figure 7

Dispositivo de Protección contra Sobretensiones (DPS)

Nota. Equipo diseñado para proteger sistemas eléctricos de picos de voltaje transitorios.

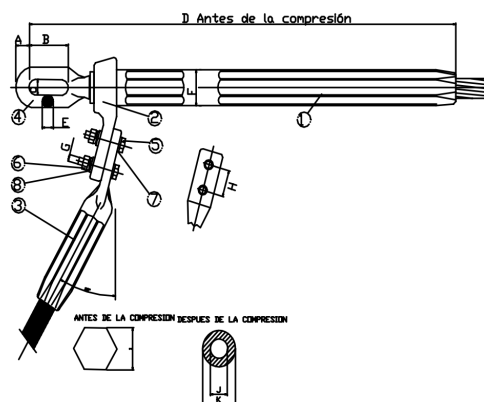


Figure 8

Grapa de Retención (Variante 1)

Nota. Herraje utilizado para fijar y retener el conductor en el poste o estructura.

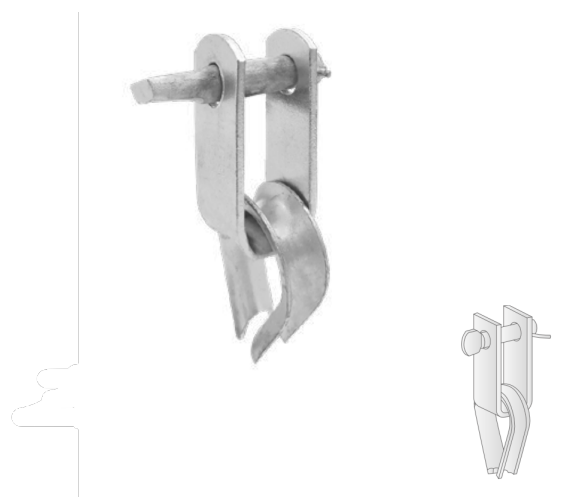


Figure 9

Grapa de Retención (Variante 2)

Nota. Otro tipo de grapa diseñada para aplicaciones de anclaje o retención.



Figure 10

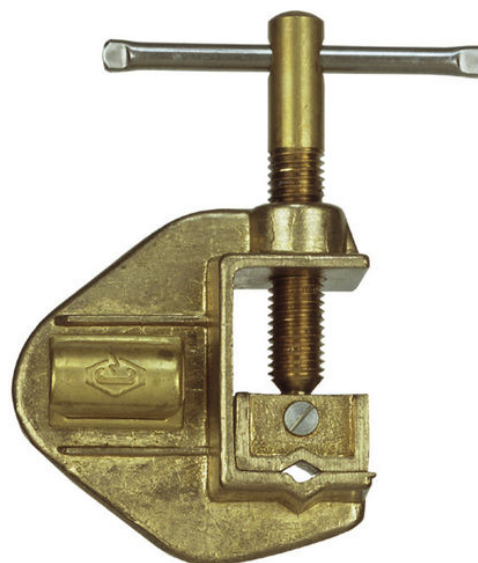
Grapas de Acero para Pistola

Nota. Sujetadores de acero utilizados con herramientas de fijación a pólvora o gas.

**Figure 11**

Guardacables o Dedal

Nota. Pieza que protege un cable o cuerda de fricción y doblamiento excesivo en un lazo.

**Figure 12**

Mordaza de Conexión a Tierra

Nota. Conector utilizado para asegurar una conexión eléctrica firme al sistema de puesta a tierra.

**Figure 13**

Pasadores y Arandelas de Seguridad

Nota. Elementos de fijación utilizados para evitar el aflojamiento o deslizamiento de componentes.

**Figure 14**

Perno de Anclaje

Nota. Tornillo o espiga gruesa usada para fijar estructuras a cimientos o soportes.

**Figure 15**

Perno de Ojo (Eye Bolt)

Nota. Perno con un lazo en un extremo, utilizado para conectar cables o eslingas.

**Figure 16**

Perno de Suspensión

Nota. Perno especializado para colgar o suspender equipos o componentes.

**Figure 17**

Pernos Máquina (Tornillos de Máquina)

Nota. Elementos de fijación roscados utilizados en el montaje de piezas metálicas y herrajes.

**Figure 18**

Poste de Fibra de Vidrio

Nota. Poste ligero y resistente a la corrosión, usado en ciertas aplicaciones de líneas eléctricas.

**Figure 19**

Postes de Acero

Nota. Estructuras metálicas de alta resistencia utilizadas para líneas de transmisión y distribución.

**Figure 21**

Postes de Madera

Nota. Postes tradicionales, tratados para resistir la intemperie y el paso del tiempo.

**Figure 20**

Postes de Concreto (Hormigón)

Nota. Postes duraderos y de bajo mantenimiento, comunes en redes de distribución urbana.

**Figure 22**

Reconectores

Nota. Dispositivos de protección que restauran automáticamente el servicio después de una falla temporal.

**Figure 23***Separadores para Conductores*

Nota. Dispositivos para mantener la distancia física y aislamiento entre conductores adyacentes.

En resumen, la eficiencia del sistema se logra mediante el diseño optimizado y la gestión de la carga. La seguridad y la fiabilidad son garantizadas por un conjunto coordinado de protecciones, la calidad de los herrajes y una robusta infraestructura estructural y de puesta a tierra.

**Figure 24***Tornillos de Seguridad*

Nota. Elementos de fijación diseñados para resistir la manipulación o remoción no autorizada.

References

- Short, T. A. (2004). *Electric power distribution handbook* (L. L. Grigsby, Ed.). CRC Press LLC.
- Willis, H. L. [(2004 [9]). *Power distribution planning reference book [6, 7]* (Second Edition, Revised and Expanded [6, 7]). Marcel Dekker, Inc. [6, 8, 9].