

La solución invisible de 115 kV

Una solución mexicana para la transición aéreo-subterránea de 115 kV

Ing. Fidencio

Ondarza

Villarreal

Ingeniero Mecánico Electricista, Ex-CFE y Expresidente del CIME, AC Nuevo León.

Autor original y desarrollador de la familia de postes tubulares de acero de 115 kV para obras de CFE, incluyendo el poste de transición aéreo-subterránea objeto de este artículo.

Resumen

Se presenta el desarrollo y la evolución de un poste tubular de acero, diseñado originalmente en México, que integra en una sola estructura la transición de líneas aéreas a sistemas de cables subterráneos para redes de subtransmisión de 115 kV. Esta solución responde a las severas restricciones de derecho de vía en entornos urbanos, donde las configuraciones convencionales resultan ineficientes en términos de espacio, costo y complejidad constructiva y que sin duda ha resuelto también el problema en entornos industriales y ampliaciones de grandes subestaciones reductoras 400/115 kV que han quedado con el tiempo dentro de las vialidades del desarrollo urbano.

Al canalizar los cables de alta tensión por el interior del fuste, el concepto mitiga el impacto visual y permite acercar la línea aérea al punto de carga mediante configuraciones compactas —incluyendo arreglos de doble circuito—. Esto reduce la longitud de los tramos subterráneos, que constituyen el componente de mayor costo de la obra.

El diseño estructural se fundamentó en criterios específicos para estas aplicaciones, considerando las condiciones de operación de las líneas de 115 kV. En la evolución posterior del diseño se incorporaron métodos de análisis no lineal, congruentes con los principios posteriormente consolidados en estándares internacionales.

Con más de 40 años de aplicación desde la década de 1980, este sistema ha demostrado un comportamiento confiable en servicio. El presente documento expone el origen, evolución y características de una solución que mantiene plena vigencia ante las crecientes restricciones de espacio para nuevas líneas de 115 kV, tanto en zonas urbanas como en grandes subestaciones reductoras y desarrollos industriales.

Estas mismas estructuras pueden usarse en 138 kV, las distancias eléctricas previstas son adecuadas.

A nivel global, más del 50% de las subestaciones reductoras de alta a media tensión en áreas urbanas emplean tensiones primarias normalizadas en las clases de 110 kV a 138 kV, con una adopción predominante en Norteamérica, Europa, Asia y Latinoamérica.

Esta situación constituye un campo de oportunidad de aplicación muy buena, mejorar el impacto visual y ahorro sustancial en algunos casos.

¿En tu país serviría una estructura de transición como esta?

1. Introducción

El crecimiento sostenido de la demanda de energía eléctrica en zonas urbanas e industriales exige acercar la infraestructura de transmisión de 115 kV a los centros de carga. Sin embargo, la principal limitante en estos entornos a nivel global es la disponibilidad restringida de derecho de vía.

Esto suele obligar a las empresas eléctricas a utilizar tramos extensos de cable de potencia subterráneo, el cual representa el componente de mayor costo y complejidad constructiva del sistema debido a la obra civil asociada, sus condiciones de instalación y los requerimientos de mantenimiento.

A nivel internacional, las soluciones tradicionales para realizar la transición aéreo-subterránea suelen requerir arreglos constructivos con mayor impacto visual.

Además, en estas configuraciones convencionales los cables de transición se disponen externamente, lo que incrementa su exposición a daños mecánicos, vandalismo y severidad ambiental, generando a su vez un alto impacto visual en las ciudades.

En respuesta a estas limitaciones, en México desarrollamos un concepto estructural integrado que rompe con el paradigma convencional: permite realizar la transición del sistema aéreo al subterráneo por el interior de un único poste de acero.

Este enfoque optimiza el uso del espacio y simplifica la instalación, logrando llevar la línea aérea lo más cerca posible de la subestación reductora y reduciendo la longitud —y el costo— del cable subterráneo requerido.

Como parte de mis responsabilidades en ingeniería, desarrollé y dirigí la implementación inicial de este concepto en Monterrey, México, a principios de la década de 1980.

A partir de las primeras instalaciones, el concepto se aplicó también en configuraciones de doble circuito adaptadas a corredores urbanos con severas restricciones de espacio.

Una sola estructura cumple dos funciones: soporta la línea aérea y protege en su interior los cables de 115 kV durante la transición al sistema subterráneo.

Más de cuatro décadas después de sus primeras aplicaciones, el concepto mantiene plena vigencia. Las restricciones de espacio que motivaron su desarrollo continúan presentes en los sistemas urbanos y adquieren nueva importancia en grandes subestaciones reductoras y desarrollos industriales, donde la disponibilidad física para nuevas salidas aéreas de 115 kV puede ser limitada. En estas condiciones, la transición integrada constituye una alternativa compacta y probada para enlazar las redes aéreas y subterráneas.

2. Diseño conceptual del sistema

El sistema propuesto consiste en un poste tubular de acero de geometría troncocónica que cumple una doble función simultánea: servir como estructura de soporte para los conductores aéreos, y albergar en su interior la transición hacia los cables subterráneos, con sus accesorios correspondientes (Apartarrayos, Fibra Óptica, Terminales).

Diseñado específicamente para aplicaciones tipo remate (*dead-end*), el poste permite una bajada directa, segura y compacta hacia el primer registro subterráneo.

2.1 La “solución invisible”: Canalización interna

La característica distintiva que separa a este diseño de la práctica convencional es la canalización interna de los cables de alta tensión.

Estos ingresan a través de una bóveda subterránea directamente por la base del poste y se conducen verticalmente por el interior del fuste.

Al alcanzar los puntos específicos requeridos, los cables emergen a través de conexiones de brida lateral para su enlace final con las terminales exteriores normales en posición inclinada.

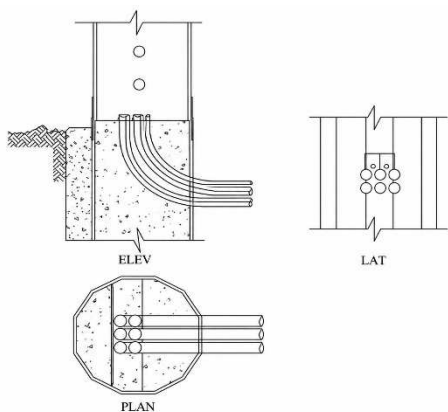


Figura 2. Entrada de cables subterráneos y canalización interna en la base del poste.

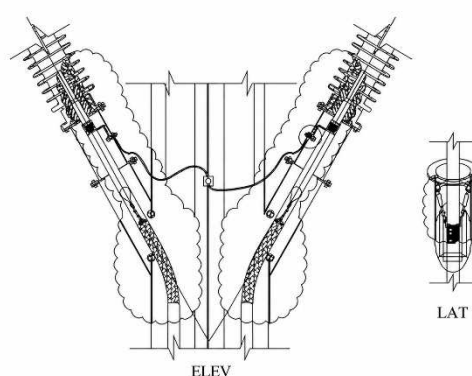


Figura 3. Salida lateral de cables mediante bridas y conexión a terminales externas

Este arreglo proporciona una elevada protección mecánica al mantener los cables resguardados en el interior del fuste de acero, reduce su exposición ambiental y minimiza el impacto visual de la instalación.

2.2 Origen de los criterios de diseño

El desarrollo de este concepto requirió definir criterios específicos de diseño para las estructuras tubulares de acero. Para ello se establecieron árboles de carga basados en hipótesis que consideran las cargas de viento y de hielo sumadas a las cargas mecánicas de los conductores y las resultantes de los puntos de inflexión del trazo.

Estos criterios, al integrarse en el diseño estructural del poste, dieron lugar a una familia completa de estructuras de acero.

Los primeros postes tubulares desarrollados para las líneas de 115 kV de Monterrey fueron identificados mediante las

designaciones MPTS, MPTR y MPTD. La letra “M” correspondía a Monterrey, “PT” a poste tubular y la última letra identificaba su función: suspensión (S), remate (R) o deflexión (D). En el marco de este desarrollo surgió también el poste de transición aéreo-subterránea objeto de este artículo, concebido para conducir y proteger los cables de potencia en el interior de la propia estructura.

Con el paso de los años, estos diseños evolucionaron y fueron incorporados a las familias de estructuras normalizadas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para líneas de 115 kV. Las familias actuales conservan estas configuraciones funcionales e incluyen estructuras destinadas específicamente a la transición aéreo-subterránea.

En contraste con las configuraciones convencionales de transición aéreo-subterránea, en las que los cables se disponen exteriormente y requieren elementos adicionales para su soporte y protección, la solución desarrollada aprovecha el propio poste estructural como elemento de resguardo.

3 Diseño y análisis estructural

El diseño estructural del poste de transición se desarrolló con base en una estructura de remate tradicional, agregando los detalles de adaptación necesarios para la llegada de los cables de potencia por la parte inferior, subir por la caña y salir a las terminales por el eje neutro del fuste.

En la evolución posterior del diseño se incorporaron métodos de análisis no lineal, considerando los efectos geométricos asociados a los desplazamientos de la estructura y las variaciones de rigidez a lo largo del elemento, lo que permitió evaluar con mayor precisión su comportamiento y optimizar las secciones.

El poste se modela como un elemento tubular de diámetro y espesor variables, lo que permite optimizar la distribución del material exactamente de acuerdo con el diagrama de momentos flectores.

Naturalmente, las secciones cercanas a la base presentan un mayor espesor para resistir las solicitaciones más severas, mientras que las secciones superiores se diseñan más esbeltas para reducir peso.

A nivel de ingeniería de detalle, el diseño destaca por tres aspectos clave:

- **Evolución de los materiales:** En sus primeras versiones se utilizó acero estándar A36. Con la evolución del diseño, se incorporaron aceros de mayor resistencia (grados A42 y A65), permitiendo reducir el espesor de la placa y el peso total sin comprometer la capacidad estructural.
- **Control de concentraciones de esfuerzo:** Las aberturas laterales necesarias para la salida de los cables generan concentraciones locales de esfuerzo en la placa. Estas se consideran en el diseño mediante refuerzos locales que permiten mantener la capacidad estructural requerida de la sección.
- **Optimización de la deformación:** Los criterios de deflexión evolucionaron desde límites iniciales conservadores, del orden del 1.5%, hacia valores del 4%, permitiendo un mejor aprovechamiento de la capacidad estructural del acero y diseños más eficientes.

4 Implementación y caso de estudio: El origen en Monterrey

La validación de esta solución no se limita al análisis y al diseño: cuenta con más de cuatro décadas de experiencia operativa, iniciadas con las primeras instalaciones realizadas en Monterrey a principios de la década de 1980.

La implementación inicial del poste de transición se realizó en Monterrey como respuesta a las necesidades de infraestructura eléctrica derivadas del proyecto de la Macroplaza, inaugurada en 1984, y de la nueva red subterránea de 115 kV desarrollada para alimentar las subestaciones del área.

A partir de las primeras aplicaciones, el concepto se extendió hacia nuevas configuraciones, incluyendo soluciones de doble circuito. El poste de transición pasó así de resolver una necesidad específica del proyecto original a constituir una solución aplicable a diferentes situaciones en las redes de 115 kV.

Actualmente, el poste de transición encuentra nuevas aplicaciones tanto en zonas urbanas como industriales. Un caso particularmente relevante se presenta en la ampliación de grandes subestaciones reductoras de 400/115 kV y 230/115 kV que, construidas originalmente lejos de las áreas urbanas, han quedado con el tiempo rodeadas por vialidades y nuevos desarrollos. En estas condiciones, la incorporación de nuevas salidas aéreas de 115 kV puede resultar físicamente limitada, haciendo necesario recurrir a salidas subterráneas y convirtiendo al poste de transición en un elemento especialmente útil para adaptar la infraestructura existente a su nuevo entorno.

5 Desempeño en campo: Más de 40 años de confiabilidad

Después de más de cuatro décadas desde la instalación de las primeras estructuras, la experiencia operativa acumulada en campo constituye la mejor evidencia de la solidez y vigencia del concepto.

Uno de los resultados más significativos del diseño es su historial operativo: En la experiencia conocida por el autor, no se tiene registro de fallas estructurales atribuibles al concepto o diseño del poste.

La canalización de los cables de potencia por el interior del poste ha demostrado ser una de las características fundamentales del concepto. Esta disposición proporciona protección mecánica a los cables al mantenerlos resguardados dentro de la propia estructura, reduciendo su exposición al vandalismo, daños accidentales y condiciones ambientales, al mismo tiempo que disminuye considerablemente el impacto visual de la transición.

Desde el punto de vista constructivo, la integración de ambas funciones —soporte y transición— en un solo elemento estructural ofrece ventajas importantes:

- **Menor complejidad de instalación:** reduce el número de elementos necesarios para realizar la transición y el espacio requerido para su construcción.
- **Simplificación del montaje:** evita estructuras auxiliares y arreglos externos para el soporte y protección de los cables durante la transición.
- **Integración con la infraestructura de la línea:** al concentrar la transición en el propio poste de remate, la solución se incorpora naturalmente a la configuración de la línea aérea y a su conexión con la red subterránea.

6 Discusión: Un cambio de paradigma estructural

El poste de transición integrado no surgió como una evolución de las configuraciones convencionales de transición aéreo-subterránea, sino como una solución concebida específicamente para resolver las restricciones de espacio y derecho de vía que presentaba la nueva red subterránea de 115 kV de Monterrey.

Su desarrollo partió de una premisa sencilla: llevar la línea aérea de 115 kV tan cerca como fuera posible del punto de carga y realizar, en el menor espacio posible, la transición hacia el sistema subterráneo. A partir de esta necesidad se concibió la integración de ambas funciones en una sola estructura.

Esta solución permitió reducir la huella física de la transición y, al mismo tiempo, disminuir la longitud de los tramos de cable subterráneo requeridos, precisamente el componente de mayor costo del sistema. El resultado fue una configuración compacta, particularmente adecuada para corredores urbanos con espacio limitado.

Frente a las configuraciones convencionales, en las que los cables descenden exteriormente y requieren elementos adicionales para su soporte y protección, el sistema desarrollado integra en una sola estructura el remate de la línea aérea, la canalización protegida de los cables de potencia y su transición hacia la instalación subterránea.

El valor de los criterios de carga originarios

Desde su concepción, el poste de transición formó parte del desarrollo de una familia de estructuras tubulares de acero para líneas de 115 kV, sustentada en árboles de carga definidos para las distintas condiciones de operación y funciones estructurales requeridas.



Figura 4. Configuración convencional de transición aéreo-subterránea, con los cables de potencia instalados exteriormente sobre la estructura.



Figura 5. Condición urbana en la que el cruce con una línea de transmisión de 400 kV impide la continuidad aérea de la línea de 115 kV.



Figura 6. Aplicación del sistema de 115 kV en la modernización de subestación sustituida por subestación blindada de 400 kV.

Estos criterios proporcionaron una base común para el desarrollo y evolución de las diferentes configuraciones, incluida la transición aéreo-subterránea. Con el tiempo, los diseños evolucionaron hasta incorporarse a las familias de estructuras normalizadas de CFE para líneas de 115 kV.

La versatilidad del concepto puede apreciarse al comparar distintas condiciones de aplicación. La transición integrada permite sustituir configuraciones convencionales con cables exteriores, resolver interferencias que impiden la continuidad de una línea aérea y adaptar instalaciones existentes cuando las restricciones físicas del entorno hacen

Instalación original de 1983 · Registro histórico

Registro de la instalación original:

Las imágenes siguientes documentan la instalación concebida y construida como parte de la nueva red subterránea de 115 kV asociada al proyecto de la Macroplaza de Monterrey.

Durante 1982–1983 se proyectaron también los locales destinados a las futuras subestaciones subterráneas de 115/13.8 kV, denominadas Sabino y Faro por el autor durante el desarrollo de la ingeniería.

La nueva red de 115 kV entró en operación en 1984 junto con la Subestación Sabino. La Subestación Faro sería instalada aproximadamente diez años después, utilizando el local previsto desde el proyecto original.

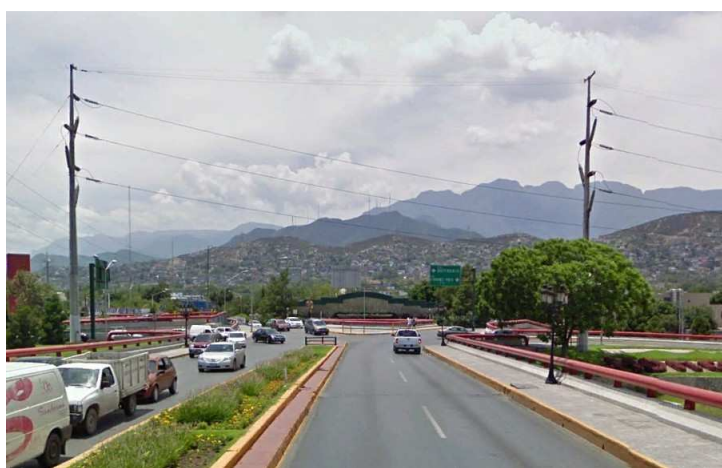


Figura 7. Instalación original, 1983. Primeros postes de transición aéreo-subterránea de 115 kV, de un circuito, instalados uno a cada lado del Puente Zaragoza, al sur del río Santa Catarina. Formaron parte de la nueva red subterránea de 115 kV proyectada para alimentar las subestaciones de la Macroplaza de Monterrey. La Subestación Sabino entró en servicio en 1984; la Subestación Faro fue instalada aproximadamente diez años después, en el local previsto desde el proyecto original



Figura 8. Instalación original, 1983. Vista del primer diseño del poste de transición aéreo-subterránea de 115 kV, de un circuito, instalado al sur del río Santa Catarina como parte de la nueva red subterránea asociada al proyecto de la Macroplaza de Monterrey.

7 Conclusiones: Hacia un nuevo estándar para entornos urbanos e industriales

El desarrollo del poste integrado de acero para transición aéreo-subterránea de 115 kV demuestra que es posible resolver en una sola estructura las funciones de remate de la línea aérea, protección de los cables de potencia y transición hacia la red subterránea, mediante una configuración compacta especialmente adecuada para instalaciones con restricciones de espacio.

Su concepción respondió originalmente a las restricciones de espacio y derecho de vía existentes en entornos urbanos.

Con el tiempo, esta misma característica ha adquirido especial relevancia tanto en grandes desarrollos industriales como en la ampliación de subestaciones reductoras de 400/115 kV y 230/115 kV que, originalmente ubicadas en zonas periféricas, han quedado rodeadas por nuevas vialidades y desarrollos urbanos.

En las grandes subestaciones reductoras, el crecimiento del número de circuitos de 115 kV puede llegar a agotar el espacio físico disponible para nuevas salidas aéreas, haciendo necesario recurrir a salidas subterráneas. En los nuevos desarrollos industriales se presenta además una condición diferente: aun cuando exista espacio disponible, puede preferirse una alimentación subterránea para reducir la presencia de infraestructura aérea y conservar áreas más despejadas.

En ambos casos, el poste de transición permite prolongar la solución aérea hasta el punto conveniente y efectuar, en un espacio reducido, la transición hacia los circuitos subterráneos.

La integración de las funciones de remate de la línea aérea, protección de los cables de potencia y transición hacia la red subterránea en una sola estructura aporta tres ventajas fundamentales:

- **Eficiencia espacial e integración al entorno:** reduce significativamente la huella requerida para realizar la transición y mantiene los cables de potencia protegidos en el interior del poste. Su configuración compacta facilita la incorporación de circuitos subterráneos en instalaciones donde el espacio disponible es limitado y reduce la presencia visual de infraestructura eléctrica.
- **Viabilidad técnica y reducción de costos de capital (CAPEX):** al permitir prolongar la línea aérea de 115 kV hasta el punto más conveniente para realizar la transición, se reduce la longitud requerida de cable de potencia subterráneo y de la obra civil asociada. En instalaciones donde ya no es físicamente posible incorporar nuevas salidas aéreas, el poste de transición permite además aprovechar la infraestructura existente para habilitar nuevos circuitos subterráneos.
- **Confiabilidad a largo plazo:** la experiencia acumulada durante más de 40 años de operación constituye la principal validación del concepto. Las primeras estructuras instaladas a principios de la década de 1980 demostraron la viabilidad de integrar en un mismo poste las funciones de remate de la línea aérea, protección de los cables de potencia y transición hacia la red subterránea, principio que continúa vigente en las aplicaciones actuales.

Lo que surgió como respuesta a una necesidad específica de la infraestructura urbana de Monterrey se convirtió en una solución de transición aéreo- subterránea de 115 kV que, con el paso del tiempo, encontró aplicación en numerosas instalaciones. Su permanencia dentro de las familias de estructuras normalizadas de CFE confirma la vigencia del concepto y su capacidad para responder a necesidades que actualmente se presentan tanto en entornos urbanos como industriales.

Este trabajo documenta el origen y la evolución de una solución de ingeniería desarrollada en México que después de más de cuatro décadas de aplicación, conserva plenamente su vigencia y continúa ofreciendo una respuesta práctica a las restricciones de espacio que condicionan la expansión de las redes de 115 kV.

La experiencia acumulada demuestra que el poste de transición integrado constituye una solución madura y probada, capaz de combinar en una sola estructura la función de remate, la protección de los cables de potencia y

su transición hacia la red subterránea.

Por su simplicidad conceptual, experiencia operativa y capacidad de adaptación, esta solución mexicana constituye una alternativa de referencia para el diseño de transiciones aéreo-subterráneas de 115 kV en entornos urbanos e industriales.

Referencias

- **ASCE/SEI 48-19.** *Design of Steel Transmission Pole Structures*. American Society of Civil Engineers, Structural Engineering Institute, 2020.
- **CIGRÉ Technical Brochure 250.** *Technical and Environmental Issues Regarding the Integration of a New HV Underground Cable System in the Network*. Working Group B1.19, Study Committee B1 – Insulated Cables, CIGRÉ, 2004.
- **CFE J6200-02.** *Postes de Acero Truncocónicos*. Comisión Federal de Electricidad, México. Edición de marzo de 2019, que sustituye a la edición de septiembre de 1984.