

La solución invisible de 115 kV

Una solución mexicana para la transición aéreo-subterránea de 115 kV, todavía poco aprovechada a nivel internacional

**Ing. Fidencio Ondarza
Villarreal**

Ingeniero Mecánico Electricista, Ex-CFE y Expresidente de CIME Nuevo León, A.C.

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 utilizarse también en 138 kV, ya que las distancias eléctricas previstas resultan adecuadas.

Las clases de tensión de 110, 115, 132 y 138 kV tienen una amplia utilización internacional en redes de subtransmisión y alimentación urbana, y constituyen niveles naturales de expansión y refuerzo ante el crecimiento de la demanda y de la densidad de carga. En las áreas urbanas más densas, la tendencia es además hacia una mayor utilización de cables subterráneos, debido principalmente a las restricciones de espacio, derechos de vía, impacto visual y dificultad para establecer nuevas líneas aéreas.

Esta evolución amplía el campo potencial de aplicación de soluciones compactas para la transición aéreo-subterránea. El concepto desarrollado originalmente en Monterrey para 115 kV puede adaptarse a otros niveles de esta misma familia de tensiones, verificando en cada caso las distancias eléctricas, esfuerzos mecánicos y requisitos normativos correspondientes.

¿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 y terminales).

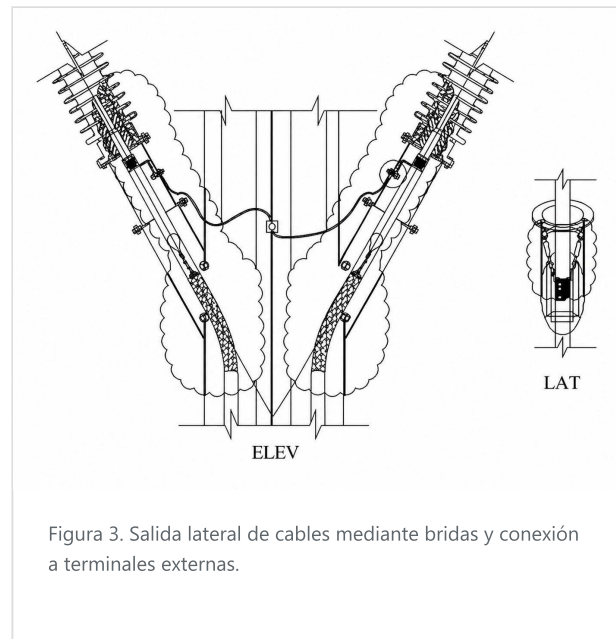
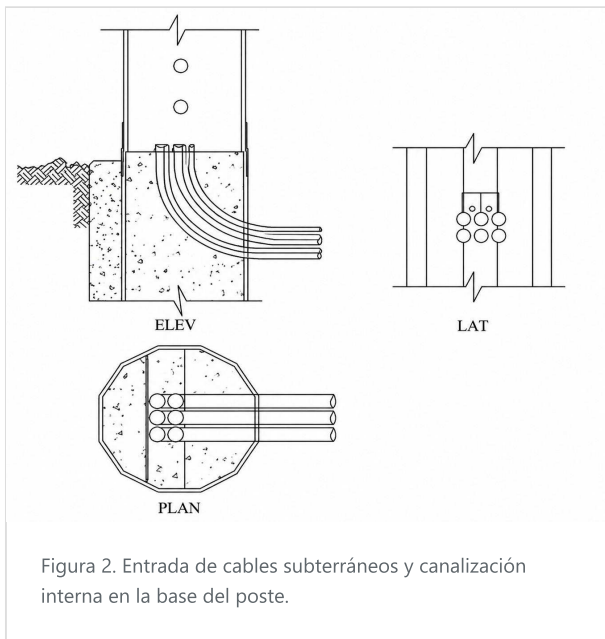
Diseñado específicamente para aplicaciones tipo remate (*dead-end*), el poste permite una bajada directa, segura y compacta hacia el primer registro subterráneo.

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.



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.

2.1 Solución constructiva y procedimiento de montaje

El desarrollo del poste de transición no se limitó al diseño de la estructura de acero. Desde su concepción fue necesario resolver conjuntamente el procedimiento constructivo y de montaje de los cables de potencia, ya que su instalación por el interior del fuste constituía una parte esencial de la solución.

El diseño consideró desde el origen la geometría del registro inferior, los radios mínimos de curvatura del cable, el procedimiento de jalado vertical, su comportamiento mecánico dentro de la caña, la protección de las terminales contra esfuerzos transmitidos por el propio cable, las condiciones electromagnéticas producidas por los conductores en el interior de la estructura y el procedimiento para preparar y montar las terminales en altura.

Montaje previo de la estructura

El poste se instala y termina completamente antes de iniciar el montaje de los cables de potencia. Esto incluye el ensamble de la estructura, brazos, accesorios, sistema de puesta a tierra y acabados correspondientes. Una vez concluida esta etapa se procede al montaje de los cables, una fase a la vez, de manera que cada maniobra pueda realizarse y controlarse independientemente.

Jalado vertical y control del radio de curvatura

En el registro subterráneo localizado en la base del poste se dispusieron ventanas alargadas que permiten formar una comba con el cable antes de iniciar su ascenso. Desde la parte superior del poste se introduce una guía hasta el registro y se conecta al extremo del cable mediante el dispositivo de jalado y su destorcedor. El cable se eleva entonces verticalmente por el interior de la caña utilizando una grúa.

A medida que el cable asciende, la comba alojada en las ventanas del registro disminuye progresivamente. Esta disposición permite efectuar el cambio de dirección de manera natural, evitando dobleces bruscos y manteniendo durante la maniobra el radio mínimo de curvatura requerido. Una vez alcanzada la posición definitiva del cable, la longitud excedente se acomoda cuidadosamente sobre las paredes del registro inferior, constituyendo la reserva prevista para la instalación.

Comportamiento mecánico del cable dentro de la caña

Una consideración particular del diseño fue el comportamiento del cable de potencia en su recorrido vertical. Por su diámetro, peso y elevada rigidez a la flexión, el cable de 115 kV no se comporta como un elemento flexible suspendido libremente. Una vez colocado, su propia rigidez hace que se apoye progresivamente sobre las paredes interiores de la caña, distribuyendo su peso a lo largo del recorrido. Esta condición permite prescindir de cuñas, abrazaderas o soportes intermedios dentro del poste, evitando además puntos de concentración de esfuerzos sobre la cubierta exterior del cable.

En la parte superior se conserva la **mallla de sujeción tipo Kellems**, utilizada inicialmente durante la maniobra de jalado. Terminada la instalación, la malla permanece fijada a la estructura y cumple una segunda función como elemento de retención mecánica: protege a la terminal evitando que los jalones, desplazamientos o esfuerzos longitudinales provenientes del tramo vertical y del registro inferior se transmitan directamente a ella.

Comportamiento electromagnético dentro del poste

La conducción de las tres fases por el interior de una misma caña de acero fue considerada también desde el punto de vista electromagnético. En condiciones normales de operación, las corrientes de las tres fases, desfasadas eléctricamente entre sí, producen campos magnéticos que se compensan en gran medida. Como resultado, los efectos magnéticos inducidos sobre la envolvente de acero se reducen considerablemente respecto de los que se presentarían si un solo conductor de fase atravesara una envolvente ferromagnética cerrada.

Durante una falla, las corrientes pueden alcanzar valores considerablemente mayores y desaparecer temporalmente esa condición de equilibrio. En ese caso, la gran masa de acero que constituye la caña proporciona también una elevada capacidad térmica, limitando el incremento de temperatura durante el breve periodo requerido para el despeje de la falla.

Una condición diferente se presenta en las salidas laterales, donde cada cable de fase atraviesa individualmente la pared del poste. En estos puntos ya no existe la compensación producida por las tres fases dentro de una misma envolvente. Por esta razón, los elementos metálicos que rodean individualmente cada cable en las salidas se fabricaron con **material no magnético**, evitando establecer una trayectoria ferromagnética cerrada alrededor de un solo conductor y reduciendo los efectos de calentamiento por inducción.

Salidas laterales y preservación de la capacidad estructural

Las aberturas necesarias para las salidas de los cables se ubicaron sobre el **eje neutro de la flexión principal de la estructura**, donde el esfuerzo longitudinal producido por el momento flector es nulo; por lo tanto, en esa zona no se presentan esfuerzos de tensión ni de compresión debidos a la flexión.

Esta ubicación reduce de manera importante el efecto estructural de las aberturas sobre la caña. Sin embargo, las perforaciones alteran localmente la continuidad geométrica de la sección tubular y producen concentraciones de esfuerzo alrededor de sus bordes, por lo que se incorporaron los refuerzos locales necesarios para conservar la capacidad resistente y la estabilidad de la sección. De esta manera, la solución de las salidas laterales respondió simultáneamente a requerimientos **eléctricos, electromagnéticos, mecánicos y estructurales**.

Preparación y montaje de las terminales

Una vez colocado cada cable en su posición definitiva, se instala el andamiaje necesario hasta el nivel correspondiente de las salidas laterales. La preparación del extremo del cable y el ensamble de la terminal se realizan sobre estas plataformas de trabajo, proporcionando las condiciones necesarias para efectuar cuidadosamente una operación propia de cables de alta tensión.

Los brazos donde rematan los conductores incorporaron desde el diseño **dos elementos en forma de omega en su parte inferior**, previstos como puntos auxiliares para elevar las terminales mediante una guía. En las primeras instalaciones este recurso facilitaba las maniobras de montaje en altura. Actualmente, la disponibilidad de grúas permite elevar directamente las terminales hasta las plataformas del andamio, trabajando un nivel a la vez. Han cambiado así los medios disponibles para realizar la maniobra, pero no el principio constructivo previsto originalmente.

El procedimiento de construcción y montaje no fue una consecuencia posterior del diseño del poste, sino una parte integral de la solución desde su concepción. La geometría del registro, el recorrido interno de los cables, sus radios de curvatura, el sistema de jalado y retención, el comportamiento electromagnético de las tres fases dentro de la caña, las salidas individuales no magnéticas y los medios previstos para el montaje de las terminales fueron analizados conjuntamente con el diseño estructural.

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.

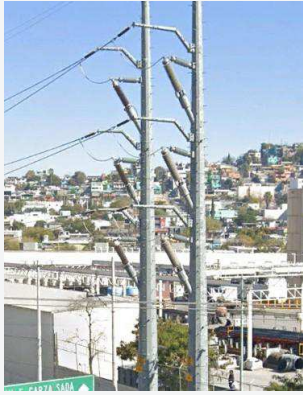
Los primeros postes tubulares desarrollados para las líneas de 115 kV de Monterrey fueron identificados mediante las designaciones MPTS, MPTR y MPTD. La letra "M" correspondía a Monterrey, "PT" a poste tubular y la última letra identificaba su función: suspensión (S), remate (R) o deflexión (D). En el 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.

Evolución de las terminales y apartarrayos

El concepto original del poste de transición no depende de un tipo específico de terminal o apartarrayos. A lo largo de más de cuatro décadas, los accesorios disponibles para sistemas de 115 kV han evolucionado y su disposición sobre la estructura se ha simplificado, mientras permanece sin cambio el principio fundamental: conducir y proteger los cables de potencia por el interior del poste hasta su salida hacia las terminales exteriores.



Configuración original. Terminales de porcelana y apartarrayos instalados separadamente sobre la caña del poste. Esta disposición corresponde al concepto utilizado en las primeras aplicaciones del poste de transición.



Evolución posterior. Terminal sintética y apartarrayos instalado directamente en la base de la terminal, con una disposición exterior más compacta, sin modificar el principio de canalización interna del cable.

Un caso singular: dos generaciones de terminales en una misma estructura

Años después de la instalación original, las modificaciones viales realizadas en el cruce del río Santa Catarina transformaron el antiguo Puente Zaragoza en un área peatonal y se construyeron nuevos puentes vehiculares a sus costados. Como consecuencia de estas obras fue necesario modificar las acometidas aéreo-subterráneas de 115 kV que alimentan la red asociada a la Macroplaza.

Los dos circuitos fueron entonces concentrados en un nuevo poste de transición de doble circuito. Esta instalación presenta una particularidad interesante: **en una misma estructura conviven dos generaciones de terminales de cable de 115 kV**. Uno de los circuitos conserva terminales de porcelana, mientras que el otro utiliza terminales sintéticos.

La comparación resulta especialmente ilustrativa porque muestra que, aun cuando la tecnología de las terminales evolucionó considerablemente, **el concepto fundamental del poste de transición permaneció sin cambio**: los cables continúan protegidos en el interior del fuste y emergen únicamente en el punto de conexión con las terminales.



Figura 9. Vista general. Poste de transición de doble circuito de 115 kV en el cruce del río Santa Catarina, Monterrey. La estructura concentra las dos acometidas aéreo-subterráneas asociadas a la red de la Macroplaza.

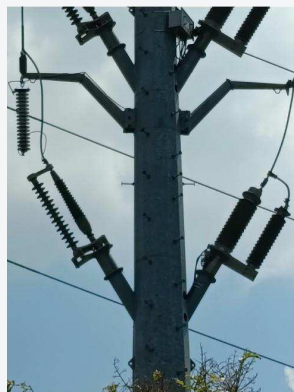


Figura 10. Detalle de las terminales. En una misma estructura pueden observarse terminales de porcelana en uno de los circuitos y terminales sintéticas en el otro, mostrando la evolución de estos accesorios sin modificar el concepto original de canalización de los cables por el interior del poste.

La tecnología de los accesorios ha evolucionado; el principio de la solución permanece.

3. Diseño y análisis estructural

El diseño estructural del poste de transición tomó como base la función de una estructura de remate, integrando desde su concepción los requerimientos constructivos, mecánicos y electromagnéticos necesarios para la llegada de los cables de potencia por la parte inferior, su recorrido por el interior de la caña y su salida hacia las terminales a través del 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 descienden 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.

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 necesario recurrir a tramos subterráneos.



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.

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.

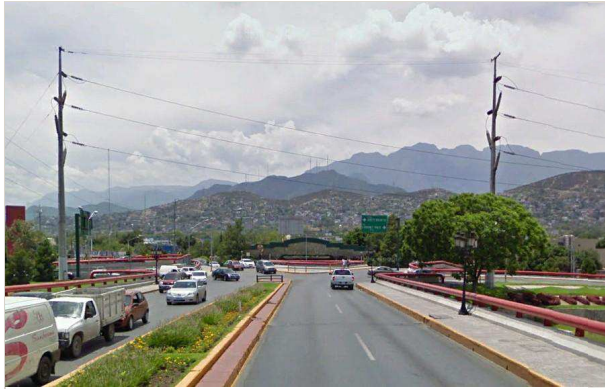


Figura 7. Instalación original, 1983. Primeros postes de transición aéreo-subterránea de 115 kV, de un circuito, instalados uno a cada lado del Puente Zaragoza, al sur del río Santa Catarina. Formaron parte de la nueva red subterránea de 115 kV proyectada para alimentar las subestaciones de la Macroplaza 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. Antecedentes y comparación internacional

La instalación de cables de alta tensión por el interior de postes tubulares está actualmente reconocida en la literatura técnica internacional. La guía **IEEE Std 1793-2012, Guide for Planning and Designing Transition Facilities between Overhead and Underground Transmission Lines**, contempla expresamente tanto la instalación de los cables por el exterior como por el interior de una estructura tubular, señalando que la disposición exterior constituye la solución más común.

Para la configuración interior, la guía describe el procedimiento de llevar el cable hasta la estructura y jalarlo posteriormente por el interior del poste hasta el nivel de los brazos de las terminales. Asimismo, identifica entre los aspectos que deben resolverse en el diseño la instalación y soporte de los cables, su comportamiento térmico y las condiciones de mantenimiento.

Durante la preparación de este artículo se realizó una búsqueda de antecedentes internacionales de instalaciones equivalentes. **Hasta el momento no se ha localizado una referencia publicada anterior a 1983, en el rango de transmisión de 115–145 kV, que documente los cables de potencia ascendiendo por el interior de una estructura tubular.**

Esto no permite afirmar que la solución desarrollada en Monterrey haya sido la primera de su tipo en el mundo; sin embargo, sí permite considerarla, con la información disponible, **una aplicación temprana de un concepto que casi tres décadas después quedó expresamente recogido en una guía internacional de diseño para sistemas de transmisión.**

8. Conclusiones: Una solución vigente 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:

1. **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.
2. **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.
3. **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

- **IEEE Std 1793-2012.** *Guide for Planning and Designing Transition Facilities between Overhead and Underground Transmission Lines.* IEEE Power & Energy Society. Aprobada en 2012 y publicada en enero de 2013.
- **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.