

Decisiones de optimización y de SST en las etapas de diseño de proyectos de transmisión, análisis de las consideraciones derivadas para las etapas de operación y mantenimiento

F. Rojas y M. Díaz

Grupo Energía Bogotá – Carrera 9 # 73 – 44 PBX 3268000 EXT 1726 – 1789

Email: frojas@geb.com.co – mdiazm@geb.com.co

Bogotá D.C., – Colombia

Resumen

El proceso del diseño y construcción de infraestructura de energía eléctrica puede llegar a durar hasta 60 años. Este tiempo depende principalmente de la magnitud del proyecto. En cuanto a la operación y el mantenimiento dura lo estimado en vida útil y muchas veces mucho más.

En líneas de transmisión un proyecto puede durar entre el diseño y la construcción más de 3 años, y su operación y mantenimiento lo estimado de vida útil. Con base en lo anterior, en este artículo se pretende mostrar de manera general el proceso del diseño para una línea de transmisión. Para este caso no se va a tener presente los componentes ambiental, social ni predial. A partir de esta breve descripción, se obtiene un punto de partida para poder realizar dos casos de estudio, en donde se haga énfasis en las repercusiones en caso de no contarse con buenas prácticas de comunicación y retroalimentación entre el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento.

Introducción

Actualmente la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) ha realizado y se encuentra ejecutando, aproximadamente 30 proyectos en los últimos 10 años según lo establecido en los planes de proyección energética determinados

para el 2025. En relación con los planes de transmisión, se enfocó en fortalecer la transmisión en niveles a 230 kV y en cerrar los circuitos a 500 kV. Para ello la UPME realiza convocatorias abiertas a empresas o consorcios que se encarguen de proyectar, planear, ejecutar, operar y mantener los activos durante el tiempo determinado.

Por lo anterior las empresas que prestan el servicio de transporte de energía eléctrica o consorcios deben realizar su caso de negocio teniendo en cuenta los siguientes aspectos; proyectar la ruta considerando los parámetros eléctricos, ambientales y sociales, planear la ejecución del proyecto a partir de lo identificado en la ruta; ejecutar y/o poner en servicio la línea para finalmente operar y mantener durante la vida útil de misma.

Presupuestalmente cada proyecto cuenta con un CAPEX y un OPEX teniendo en consideración lo identificado en el trazado. El CAPEX principalmente se centra en los costos de las inversiones iniciales incluyendo el diseño técnico de la línea, y los aspectos ambientales, prediales y sociales, que no serán tratados en este artículo. Asimismo incluye la compra de suministro, construcción, montaje hasta puesta en servicio del activo.

El OPEX reúne los costos requeridos para la operación y el mantenimiento de manera que permita la continuidad del servicio, limitando o reduciendo al máximo el número de salidas de la línea en operación. Este último cálculo se realiza principalmente mediante el know-how propio de la compañía y con información secundaria de la ubicación del trazado de la línea. Asimismo realiza un análisis estadístico de operación de líneas con iguales o similares características, teniendo en cuenta planes de mantenimiento, fallas y contingencias. Esto se debe esencialmente porque hay fenómenos naturales, ambientales o geotécnicos, entre otros, que no son pronosticables en el tiempo de operación de la línea.

Para el proceso de diseño es usual implementar herramientas de software que permitan de manera computacional llegar a porcentajes de uso mucho mayor, incorporando principalmente más variables de entrada que permitan obtener un diseño óptimo con una visión técnico - económica. Lo anterior se establece desde la normatividad vigente en Colombia; el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctrica (RETIE).

El RETIE solicita para proyectos nuevos presentar el cálculo de selección económica, principalmente del conductor. Bajo este lineamiento el parámetro económico se hace presente desde el principio de la ejecución de un proyecto.

Dentro de este marco la ingeniería busca obtener diseños que mediante un adecuado mantenimiento presten el servicio durante su vida útil, al menor costo, comúnmente llamado diseño “óptimo”.

Los equipos que se pueden optimizar en el diseño de una línea de transmisión son principalmente; el conductor, el aislamiento, la estructura y la cimentación. Lo anterior se ve

reflejado directamente en la ubicación óptima de las estructuras o plantillado de la línea.

A partir de lo anterior, en los siguientes capítulos se describirá brevemente una secuencia de pasos generales que se tienen en cuenta en el diseño de una línea de transmisión. Al mismo tiempo se resumirá un proceso de operación y mantenimiento utilizado en líneas, y se resaltarán los momentos durante el diseño y la construcción en donde se pueda optimizar costo del equipo durante diseño.

Bajo este lineamiento, se exponen dos casos de estudio donde se hace énfasis en la optimización y se plantean posibles repercusiones en caso de no contar con la interrelación disciplinaria para el mantenimiento del activo.

II. BREVE DESCRIPCIÓN DE DISEÑO DE UNA LT

El diseño de una línea inicia con la selección de la ruta o ruteo. Esta permite dar una primera aproximación para identificar los parámetros meteorológicos y la topografía de la línea, datos de entrada para los cálculos electromecánicos y civiles.

De manera paralela, con información secundaria se realiza la ingeniería básica donde se ejecuta el diseño electromecánico que contiene principalmente la selección del conductor, la coordinación de aislamiento y el predimensionamiento de las estructuras. En el numeral 22.1 del artículo 22° del RETIE [1], se establecen los siguientes entregables como los mínimos con los que debe contar el diseño de una línea de transmisión en Colombia:

a) Comportamiento de la línea tanto en régimen permanente como en régimen transitorio.

- b) Confiabilidad de la línea (número de salidas por 100 km/año).
- c) Coordinación de aislamiento.
- d) Coordinación de protecciones.
- e) Distancias de seguridad.
- f) Establecer los parámetros de la línea
- g) Estudio de apantallamiento.
- h) Estudio de flujo de cargas.
- i) Estudio de pérdidas de energía.
- j) Evaluar el Efecto Corona y gradientes superficiales.
- k) Evaluar las sobretensiones por ondas tipo rayo y tipo maniobra.
- l) Evaluar los niveles de campos electromagnéticos en la zona de servidumbre.
- m) Evaluar los niveles de radiointerferencia.
- n) Puesta a tierra.
- o) Nivel de ruido audible.
- p) Conductor económico.
- q) Cálculo de pérdidas por efecto corona.

En la selección del conductor se tiene en cuenta los requerimientos propios del sistema, para este caso los estipulados por la UPME, principalmente de capacidad de transmisión, pérdidas en el sistema, y cumplimientos por afectaciones de efecto corona. Por otra parte, se tienen en cuenta las condiciones mecánicas de los conductores, las curvas de flechas y tensiones dadas para cada caso climático.

La selección de estructuras se inicia determinando la familia más conveniente para el plantillado. Posteriormente se realiza el dimensionamiento considerando tanto la selección del conductor como la coordinación de aislamiento. Finalmente se definen las curvas de utilización con base en los parámetros ambientales y topográficos.

Una vez se cuenta con los parámetros meteorológicos de la zona, el procesamiento de la topografía, el conductor seleccionado, la coordinación de aislamiento y el

dimensionamiento de la estructura se realiza el plantillado de la línea. Este proceso se obtiene con información estimada de costos y los valores de entrada descritos, y consta de varias iteraciones y de trabajo de áreas interdisciplinarias como social, ambiental, predial, geotécnica, electromecánica, etc. Como resultados parciales se empieza a analizar el indicador determinado comúnmente como un indicador de kg/km.

Como uno de los resultados del plantillado se obtiene la información para la definición de los árboles de carga. Estos a su vez requieren como parámetro de entrada la curva de utilización que se implementó en el plantillado.

Del plantillado también se obtienen las cargas a nivel de cimentación. Estas cargas junto con la información de capacidad portante del suelo y la caracterización geotécnica son los parámetros de entrada para los diseños de cimentaciones y obras de protección.

Con los primeros resultados de plantillado se inicia el proceso de compra de suministro, considerando posibles cambios que se puedan presentar en la etapa del replanteo.

Concluido el proceso del plantillado, se inician las labores del replanteo del diseño, el cual consta principalmente del desplazamiento a cada sitio de torre definido en las actividades del plantillado. En esta actividad se terminan de ajustar y recolectar datos de entrada para la construcción y el montaje de la línea. Al igual que para el plantillado, esta actividad es interdisciplinaria y requiere de la interacción de todas las especialidades para poder ubicar la torre en su lugar óptimo.

Durante el proceso del replanteo también se obtiene la información para el plantillado de patas y ajustes verticales para el correcto cumplimiento de distancias de seguridad con el terreno y los obstáculos que atraviesan la línea.

Para la construcción y el montaje se realiza nuevamente el replanteo asegurando que las condiciones verificadas en diseño no hayan cambiado y cumplen con los lineamientos requeridos para la operación de la línea. En caso contrario se deben hacer ajustes al diseño original y reportarlos a ingeniería para conocer si la nueva condición operativa obedece con los lineamientos de diseño o si se debe hacer algún ajuste.

Una vez se concluya con la actividad de replanteo, y se cuente con la viabilidad ambiental, predial y social, se inician las actividades de construcción y montaje de la línea.

Como se planteó en el capítulo anterior el diseño de una línea de transmisión cuenta con varios procesos iterativos, por tanto la optimización durante el diseño se puede realizar en varias etapas, y en varios equipos. A modo de ejemplo a continuación se describen dos casos de estudio. El primero la optimización de peso en las estructuras y el segundo la optimización en las fundaciones.

Optimización Estructural

El diseño estructural parte de las curvas de utilización, calculadas principalmente con la carga transversal y considerando factores de seguridad. Como se muestra en la Figura 1 son líneas que relacionan el vano viento y el ángulo de deflexión de la torre. Toda torre que tenga su uso por debajo de las líneas definidas, podría emplearse de ese tipo.

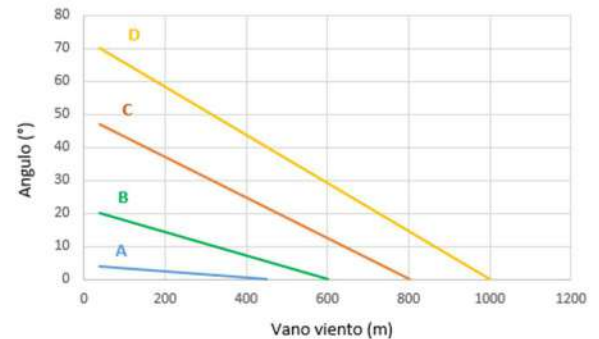


Figura 1 Curva de utilización

Por ejemplo, si una torre tiene un vano viento de 350 metros y un ángulo de 5 grados (Ver Figura 2), por curva de utilización se utilizaría torre tipo B.

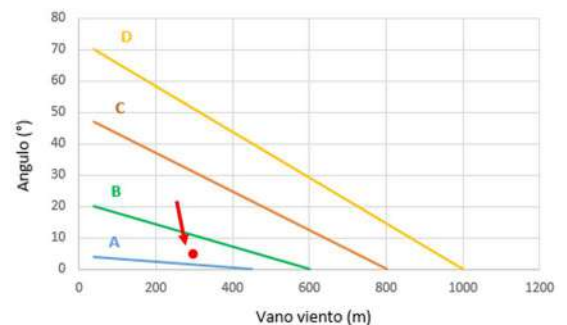


Figura 2 Ejemplo uso torre –curva utilización

Con estas curvas se calculan los árboles de carga teniendo en cuenta los requisitos mecánicos en estructuras, apoyos o torres. En Colombia se definen en el numeral 22.5 del capítulo 5 del RETIE [1]. En síntesis, dentro del marco normativo actual vigente, los apoyos/torres deben garantizar el cumplimiento mecánico al que pueda estar sometido(a) para caso normal y dos anormales. Existen varias metodologías para los cálculos mecánicos entre los que más comúnmente utilizados están el ASCE 74 y el NESC. Aunque las condiciones de montaje y mantenimiento no son obligatorias, por proactividad de muchas empresas también se analizan estos casos por normatividad interna, o experiencia en la operación.

Como ejemplo se monta una línea de transmisión a 230kV con una topografía obtenida de información secundaria [Google Earth] de

manera que se pueda aproximar más a las condiciones reales de operación. Para el plantillado se utilizan torres triangulares circuito sencillo con 2 subconductores por fase. A partir de esto se plantillan torres teniendo en cuenta su curva de utilización con el programa de simulación PLSCADD. En la Figura 3 se muestra el plano planta – perfil de un tramo para el caso de estudio.

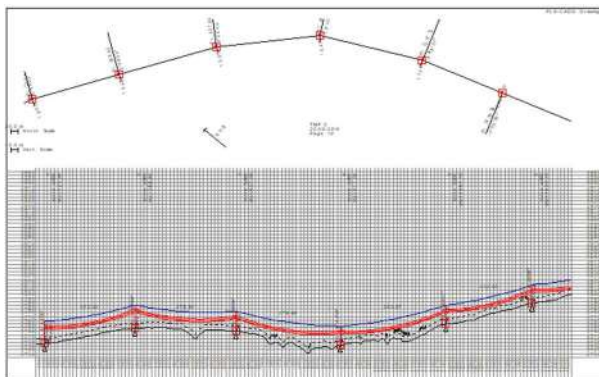


Figura 3 Plantillado para caso de estudio

Para este caso la tabla de torre sería la Tabla 1:

Tabla 1 Tabla de Torres Caso Estudio

No. De Torre	Tipo de Torre	Ángulo (°)	Vano Viento (m)
Torre 1	Tipo D	0	122
Torre 2	Tipo A	0	258
Torre 3	Tipo B	9.45	276
Torre 4	Tipo D	19.73	283
Torre 5	Tipo B	8.81	259
Torre 6	Tipo A	0	245
Torre 7	Tipo B	17.02	351
Torre 8	Tipo A	0	323
Torre 9	Tipo B	-1.28	325
Torre 10	Tipo B	29.45	259
Torre 11	Tipo B	0	134

Los resultados del porcentaje de uso para este caso de estudio, con curvas de utilización se muestra en la Figura 4:

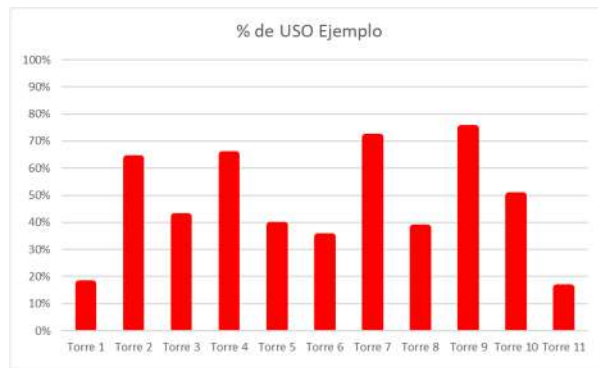


Figura 4 Porcentaje de Uso estructuras con curva de utilización

Para las mismas condiciones de topografía, parámetros meteorológicos, condiciones de tensionado y las otras variables que influyen en los esfuerzos mecánicos de las torres se verifica con modelos TOWER. El resultado de manera general se muestra en la Figura 5. En esta se destaca la reducción de porcentaje de uso de las estructuras.

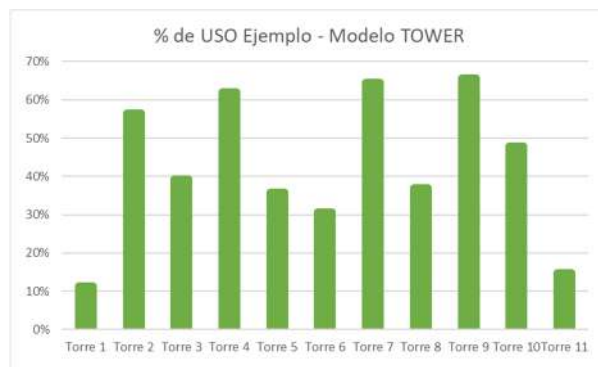


Figura 5 Porcentaje de Uso estructuras con Modelo Tower

En términos generales la verificación estructural por el software especializado permite observar cual es la utilización de cada uno de los elementos. Asimismo permite en dado caso optimizar cambiando de tipo de estructura, a una de menor capacidad. Es decir, si por curva de utilización una estructura es Tipo B y al verificar su uso, el resultado permite la oportunidad de modificarla a Tipo A y cumple en todas las verificaciones, se modifica.

Para este caso de estudio se tiene la Torre 9 que por curva de utilización dio un uso del 75%. Al

verificar su uso mediante el TOWER bajó hasta casi 65% de su uso. Esto permitió cambiarla de tipo, verificando previamente que por ser una torre que tiene ángulo de deflexión cumpliera con distancias eléctricas.

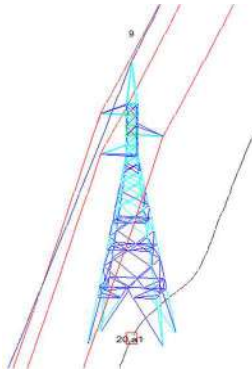


Figura 6 Verificación uso estructura con modelo Tower

En la Figura 7 se muestra el resultado cambiando de torre Tipo B a torre Tipo A. en esta imagen se puede observar que por el propio diseño de la torre la distribución de cargas.

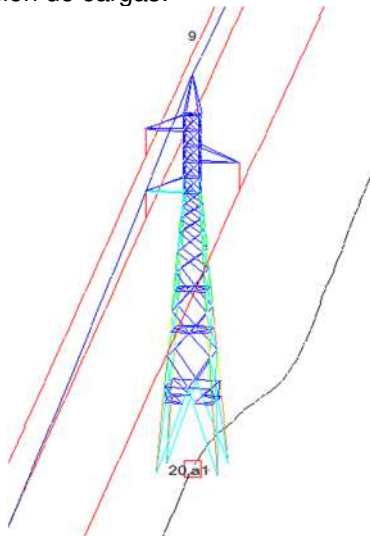


Figura 7 Verificación uso estructura con modelo Tower

Optimización en Fundación

Para el diseño de las fundaciones o cimentaciones se requiere de las cargas a nivel de cimentación, la capacidad portante del suelo y la caracterización geológica y geotécnica de la zona. De esta manera se tienen los siguientes parámetros para la selección de la cimentación [ConCol].

- i. Definición de las condiciones geológicas (descripción de las características litológicas, geología estructural y geoformas, análisis de drenaje, y procesos de erosión y fenómenos de remoción en masa)
- ii. Estratigrafía - Tipo de material encontrado en los sitios de torre (suelo o roca)
- iii. Profundidad del macizo rocoso
- iv. Propiedades geomecánicas del suelo
- v. Condición de sumergencia
- vi. Capacidad portante admisible
- vii. Potencial de expansión
- viii. Corrosividad (según resultados de ensayos de Potencial de Hidrógeno - PH y resistividad)
- ix. Condiciones topográficas
- x. Accesos hacia el sitio de torre

Una vez identificado lo anterior se selecciona la cimentación para el tipo de torre según su ubicación. Estas pueden ser parrilla pesada o liviana, zapata, zapata anclada, pila corta o para casos especiales caisson, pilotes o micropilotes.

Los criterios para el dimensionamiento de estas cimentaciones se basan principalmente en la verificación de su capacidad a la tracción (arrancamiento) [J. Biarez (Universidad de Grenoble) e Y. Barraud (EDF)], verificación a la compresión, que tiene en cuenta las cargas horizontales asociadas a los momentos que actúan sobre la base, la capacidad de compresión en pilas y pilotes [Therzaghi], el análisis ante cargas laterales [Broms], y el desplazamiento vertical y lateral permitido.

Para una línea corta, la selección del tipo de cimentación se hace relativamente sencilla, pero a medida que la línea tiene mayor longitud resulta más complicada la parametrización con la cantidad de variables de entrada que tienen estos diseños.

Como se conoce uno de los mayores costos de una línea se encuentra en las cimentaciones. Al realizar las aproximaciones sectoriales algunos sitios de torre quedan sobredimensionados. Esta premisa sirve como argumento para la optimización de las cimentaciones. Dentro de esa optimización se resalta principalmente que pese a reducir las dimensiones, se siguen conservando los factores de seguridad determinados para el proyecto.

En confiabilidad el orden de los elementos que deben fallar en una línea de transmisión es el siguiente: primero el cable, luego el aislamiento, luego la estructura y lo último la cimentación. Al optimizar la cimentación de una torre, en caso de eventos no considerados es conveniente contar con un factor adicional.

INTERACCIÓN CON DESARROLLO SOSTENIBLE

La seguridad para los trabajos, y sobre todo para infraestructura en operación se vuelve un reto muchas veces porque se desconoce la condición real del activo. Pese a tener estimaciones y seguimientos periódicos, no es garantía del estado propio del activo.

En casos de líneas de transmisión, donde el activo se ubica en zonas de difícil acceso y en condiciones muchas veces que no se monitorean, se aumenta la certidumbre de la condición.

Como parte de los trabajos que se interactúan entre desarrollo sostenible y las áreas de diseño, construcción y montaje y operación y mantenimiento, se establecen trabajos en conjunto para mitigar este tipo de contingencias.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los casos trabajados en este artículo no corresponden a ningún proyecto en particular. Se plantean como ejemplos con características similares a proyectos actualmente en operación.

Si bien es importante la optimización en este tipo de proyectos, es aún más imprescindible la retroalimentación de cambios representativos que impacten metodologías de operación y mantenimiento. Cualquier modificación que sea representativa que implique ahorrar en alguna etapa o equipo, puede llevar a generar sobre costo en otra etapa o equipo.

Se debe contemplar el ciclo de vida del activo para los casos optimizados, porque para algunos activos al aumentar su esfuerzo o porcentaje de uso, puede disminuir su vida útil.

Aunque se hace inevitable el cambio de regulación para estos tipos de activos, es precioso