

Estudio de Cargabilidad de la Línea a 22,8 kV de la Central Illuchi 1 de la ELEPCO S.A. y Propuesta de Cambio del Conductor Existente por un Conductor Económico para Transporte de la Energía Generada

Vargas Calo Néstor David
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Escuela Politécnica Nacional
Quito - Ecuador
nestor.vargas@epn.edu.ec

Novoa Guamán Edison Gabriel
Departamento de Energía Eléctrica
Escuela Politécnica Nacional
Quito - Ecuador
edison.novoa@epn.edu.ec

Resumen— Este documento presenta un estudio sobre la línea de subtransmisión Illuchi 1 - El Calvario, de la Empresa Eléctrica del Cotopaxi, con el objetivo de reemplazarla debido a problemas técnicos y económicos. Se modela la línea actual y se utilizan simulaciones de flujos de potencia para evaluar sus niveles de voltaje, cargabilidad y pérdidas. Se realiza un diseño preliminar para una nueva línea de subtransmisión utilizando software geoespacial y considerando normativas. Se determina la sección del conductor económico, la configuración de las estructuras y las características necesarias para los postes. Luego, se modela y simulan los flujos de potencia para la nueva línea con el conductor económico, asegurándose de cumplir con los requisitos de pérdidas de potencia y caída de voltaje. Finalmente, se estima un presupuesto preliminar de construcción.

Keywords—Línea de subtransmisión, flujos de potencia, cargabilidad, pérdidas de potencia, conductor económico.

I. INTRODUCCIÓN

La Central Illuchi No. 1, con una capacidad de 5,2 MW, perteneciente a la Empresa Eléctrica Cotopaxi (ELEPCO S.A.), entrega su energía a través de una línea de subtransmisión de 9,5 km a 22,8 kV que conecta con la subestación El Calvario en Latacunga, distribuyendo la energía generada a los usuarios de la zona. Sin embargo, esta línea, en funcionamiento desde 1951, ha enfrentado cortes de servicio debido a caídas de árboles y cambios en su ruta que requirieron el uso de conductores más delgados, ocasionando problemas de caídas de voltaje, cargabilidad y pérdidas técnicas.

Estos inconvenientes afectan la calidad y continuidad del servicio, lo que incumple las obligaciones de la empresa eléctrica distribuidora y afecta su valoración. Las pérdidas de potencia y energía también repercuten en los costos de operación y mantenimiento que la empresa debe asumir. Por tanto, se hace necesario realizar un estudio de las condiciones operativas de la línea para comprender su comportamiento en todos los puntos afectados.

Como solución, se propone un nuevo diseño de línea de subtransmisión, utilizando vías públicas y considerando el uso de conductores económicos para reducir los costos de diseño, manteniendo la capacidad de transmisión actual. El objetivo es garantizar un suministro confiable y seguro de energía, cumpliendo con los estándares de calidad actuales, para

beneficiar tanto a los consumidores como a la empresa distribuidora.

II. METODOLOGÍA

A. Descripción del estado actual de la línea de subtransmisión Illuchi 1 – El Calvario de 22,8 kV

El sistema eléctrico de análisis incluye la línea de subtransmisión Illuchi 1 - El Calvario de 22,8 kV, perteneciente a la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi. La línea atraviesa la ciudad de Latacunga con una longitud de aproximadamente 9,5 km desde la central Illuchi 1 hasta la subestación El Calvario. Es una línea de un solo circuito sin transposición, con conductores de cobre #2 AWG apantallados por un hilo de guarda del cual no se tiene información.

La línea ha estado en operación desde 1951 y ha experimentado cortes debido a la caída de árboles sobre los conductores y reubicaciones con conductores más delgados (#4 AWG) en aproximadamente un tramo de 1,1 km. Estos conductores más delgados representan el 12 % de la línea, lo que causa caídas de voltaje y pérdidas técnicas significativas.

Además, la línea atraviesa propiedades privadas, lo que presenta desafíos logísticos y de seguridad, ya que los postes se encuentran cerca, incluso dentro de terrenos de casas, tal como se observa en la Figura 1. Las estructuras y postes no están en buen estado y su configuración no cumple con los estándares y normativas de construcción vigentes para el Ecuador.



Figura 1. Fotografías de postes pasantes que sostienen la línea de subtransmisión Illuchi 1 – El Calvario.

B. Modelación en CYMDIST de la línea de subtransmisión Illuchi – El Calvario de 22,8 kV actual

El modelado del sistema requiere información característica del equipamiento en la red. En este estudio, se ha modelado la línea de subtransmisión desde Illuchi 1 hasta la subestación El Calvario de 22,8 kV. Los datos de generación y transformación provienen de las hojas de datos de ELEPCO S.A. recopilados en [1].

La Figura 2, muestra el diagrama unifilar del sistema y el proceso de la modelación indicando los parámetros necesarios en cada componente a modelar.

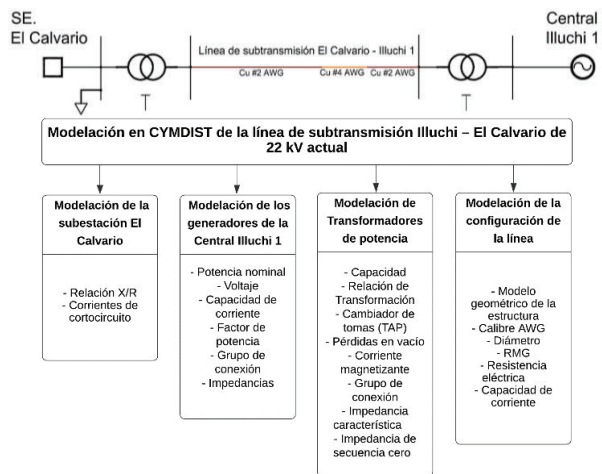


Figura 2. Diagrama unifilar de la línea de subtransmisión actual y parámetros para la modelación en CYMDIST.

La modelación de la subestación utiliza el equivalente de Thévenin, obteniendo parámetros basados en impedancias de secuencia o corrientes de cortocircuito, considerando valores típicos de relación X/R de fuentes cercanas a las plantas generadoras, que varían de 15 a 30.

En la Tabla 1, se detallan los valores obtenidos de [2], que corresponden a los estudios de cortocircuitos en la barra de la subestación el Calvario.

TABLA 1: CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN LA BARRA DE 22,8 kV DE LA SUBESTACIÓN EL CALVARIO.

| Tipo de falla | Corriente de cortocircuito máxima [kA] | Razón X/R |
|---------------|--|-----------|
| Trifásica | 1,714 | 30 |
| Monofásico | 1,412 | 30 |

C. Diseño preliminar de la nueva línea de subtransmisión con conductor económico

1) Selección de la ruta

La ruta debe cumplir, en lo posible, con los instructivos, resoluciones y normas que se describen en [3].

Para definir la ruta, se emplearon el Geoportal del Municipio de Latacunga, y Google Maps (Street View). El geoportal mostró la distribución de predios, postes existentes y datos de edificaciones, complementando la información de Google Maps con las ubicaciones de redes eléctricas.

La propuesta de ruta se seleccionó para maximizar la separación con las edificaciones y reducir los cruces por vías y otras redes de bajo voltaje. Se consideraron factores como el recorrido más corto, la disponibilidad de espacios en veredas para postes, redes eléctricas con alumbrado público y evitar cruces por puentes sobre ríos.

Además, se buscó minimizar los giros de 90 °C o más para reducir el esfuerzo en la instalación debido a tensiones generadas. El trazado de la ruta se realizó utilizando Google Earth Pro, para obtener datos de elevación y realizar estudios preliminares con eficiencia.

2) Cálculo del conductor económico

El cálculo del conductor económico se basa en un procedimiento que toma como referencia el trabajo previo mostrado en [4], del cual se han extraído ciertos datos económicos que se han reajustado para un análisis actual y al que se le han añadido otros datos económicos necesarios para el presente análisis. En [4] se obtienen los costos anuales totales considerando diversas secciones de conductores y sus límites operativos. Se calculan los costos de pérdidas de potencia y energía, la configuración y el mantenimiento, además de la amortización de la inversión. Todas las ecuaciones detalladas pueden ser revisadas en el trabajo completo en [5].

Se determinan intervalos de corriente y potencia para un óptimo funcionamiento de los conductores, ordenándolos según su capacidad de transmisión. Así, se evalúan los cambios posibles entre capacidades crecientes.

Para el análisis del conductor económico se seleccionaron los conductores ACSR desde 2 AWG hasta 336,4 MCM, por su alta resistencia de carga de rotura y uso en zonas montañosas, como esta área de diseño.

Los parámetros de cada conductor son: resistencia, límite térmico, costo de línea (solo del conductor, ya que los demás equipos de la instalación, son iguales), factor de carga de 0,8 y costo por demanda de 4,79 US\$/kW-mes para todos los conductores según el pliego tarifario [6]. La vida útil es de 30 años, y el costo de operación, mantenimiento y reposición equivale al 2 % de la inversión inicial de cada conductor. La tasa de descuento se fijó en 12 %.

3) Selección de la configuración de las estructuras tipo

Para garantizar alta confiabilidad de la central Illuchi 1, se protegen las fases con hilo de guarda, disminuyendo las interrupciones por sobretensiones atmosféricas.

Las Normas para sistemas de distribución de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) [7] indican la distancia de instalación para apantallamiento con hilo de guarda usando estructuras semi-centradas. Para el diseño de la nueva línea, se emplearán estructuras semi-centradas trifásicas (ESV-3) con variantes según el ángulo de desviación de la línea, y estructuras centradas monofásicas (ESE-1C) para soportar el hilo de guarda en la nueva ruta, como muestra la Figura 3.

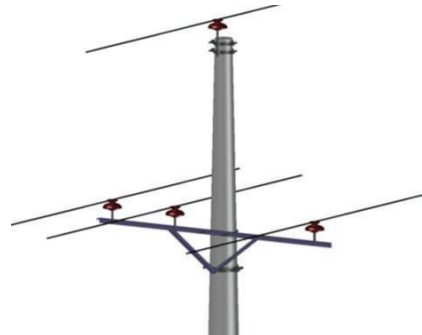


Figura 3. Estructura para 22,8 kV trifásica semicentrada pasante de 2,40 m y estructura monofásica centrada pasante (ESV-3SP2.40+ESE-1CP).

4) Selección de postes

La norma [7] establece el uso de postes de hormigón circulares para redes de distribución aéreas en zonas urbanas. Para líneas de 22,8 kV con cable de guarda, la altura mínima recomendada es de 14 m, ajustable según las necesidades en el trazado de la línea propuesta.

Es esencial calcular los esfuerzos máximos transversales sobre el poste para seleccionar los adecuados, considerando la carga de rotura o esfuerzo útil. Los cálculos normativos consideran el esfuerzo del viento perpendicular sobre los conductores y los causados por el ángulo de desviación, utilizando la tensión mecánica en condiciones normales. Se emplean ecuaciones específicas para este propósito.

Calcular las tensiones y flechas del conductor para distintos vanos implica resolver la "Ecuación de cambio de estado". Para los cálculos, se toma como base la tensión unitaria máxima según la normativa [7], que es de 11,0 kg/mm² para vanos mayores a 100 m y 6,18 kg/mm² para vanos menores a 100 m, aplicable al conductor ACSR.

Dado que la normativa no especifica un valor máximo de tensión para el acero del hilo de guarda, se adopta el mismo valor de tensión unitaria que el conductor ACSR, manteniendo una relación de 20 % y 10 % de la tensión de rotura máxima para el conductor de fase y el hilo de guarda, respectivamente, en condiciones de máximo viento o tensión.

La Tabla 2 muestra las características electromecánicas de los conductores seleccionados.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS ELECTROMECÁNICAS DE LOS CONDUCTORES [8], [9].

| Características | Conductor de fase ASCR 4/0 AWG | Hilo de guarda: (3/8)" Acero galvanizado |
|-----------------------------------|--------------------------------|--|
| Sección [mm ²] | 125,08 | 51,14 |
| Diámetro Exterior | 14,31 | 9,15 |
| Nro. de hilos | 7 | 7 |
| Peso Unit. [kg/m] | 0,433 | 0,407 |
| Tensión de Rot. [kg] | 3787 | 3155 |
| M. E. Final [kg/mm ²] | 6300 | 11000 |
| Coef. Dilatación [1/°C] | 0,000023 | 0,000012 |

Además, para evitar sobrecargar las estructuras en vanos menores a 30 m sin cruces de líneas o vías, se reduce la tensión de rotura máxima a 15 % y 7,7 % para el conductor de fase y el hilo de guarda, respectivamente, manteniendo la flecha en un valor 1,3 veces menor al valor normal.

El cálculo del tendido de conductores considera la hipótesis VI: Templado - EDS 2. EDS (Every Day Stress) que representa la tensión mecánica diaria, considerando condiciones ambientales promedio durante la vida útil del conductor. Se calcula el momento y esfuerzo resultante a 20 cm de la punta del poste con los esfuerzos resultantes por presión del viento y debido al ángulo de desviación, y las alturas de sujeción de los conductores, se determina así la tensión transversal de trabajo de cada poste.

5) Selección de tensores

Los tensores y anclajes serán utilizados para los soportes angulares y terminales cuyos esfuerzos transversales o longitudinales superen la carga útil especificada.

Se considera la anchura de las aceras para ubicar los postes y tensores, las cuales tiene una variación aproximada desde 1,5 a 2 metros a lo largo de la ruta.

D. Modelación en CYMDIST de la línea de subtransmisión Illuchi – El Calvario de 22,8 kV propuesta

Se realiza una simulación en CYMDIST para comprobar los resultados del conductor económico, la configuración de estructuras y la nueva ruta de la línea de subtransmisión.

E. Elaboración del presupuesto

Se elaboró el presupuesto utilizando datos del SERCOP y proyectos de EEQ, CNEL EP y EMELNORTE de 2022 para obtener información actualizada de los costos asociados a la línea propuesta.

III. RESULTADOS

A. Resultados del estudio de la línea de subtransmisión actual

La simulación arroja resultados de corriente en 110 A, cargabilidad de 63 % y las pérdidas totales de 205 kW, alrededor del 4,91 %, tal como se describe en las Tablas 3 y 4.

TABLA 3. RESULTADOS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA Y CARGABILIDAD

| Nro. Tramo | 1 | 2 | 3 | Total | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Longitud [m] | 4878,2 | 1140,6 | 3479,6 | 9498,4 | |
| Potencia total de paso[kVA] | 3974 | 4069 | 4110 | | |
| Fp [%] | 98,25 | 98,06 | 98,02 | | |
| I promedio [A] | 110,1 | 110,1 | 110,1 | | |
| Pérdidas totales | [kW] | 95,8 | 41,0 | 68,3 | 205,1 |
| | [kVAr] | 79,1 | 19,2 | 56,4 | 154,6 |
| Cargabilidad | [%] | 48,1 | 63,1 | 48,0 | |

TABLA 4. PORCENTAJE DE PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA

| Potencia total en la barra de 22,8 kV - Illuchi 1 [kW] | Potencia total en la barra de 22,8 kV - El Calvario [kW] | Pérdidas de potencia | |
|--|--|----------------------|------|
| | | [kW] | [%] |
| 4179 | 3974 | 205 | 4,91 |

Los resultados de la Tabla 5 muestran una importante caída de voltaje en la barra de llegada, lo cual excede el límite máximo permitido del 3,5 % según normativa de EEQ [7].

TABLA 5. VALORES DE VOLTAJE EN LAS BARRAS Y CÁLCULO DE CAÍDA Y REGULACIÓN DE VOLTAJE EN LA LÍNEA DE SUBTRANSMISIÓN ACTUAL.

| Parámetros | Fase A | Fase B | Fase C |
|------------------------------------|--------|--------|--------|
| Voltaje en la barra de envío [kV] | 22,2 | 22,3 | 22,2 |
| Voltaje en la barra recepción [kV] | 20,9 | 21,1 | 20,9 |
| Caída de voltaje [kV] | 1,26 | 1,18 | 1,26 |
| Regulación de voltaje [%] | 5,7 | 5,3 | 5,7 |

Con estos resultados se evidencia una problemática que requiere una solución, principalmente un cambio de conductor. Aunque las pérdidas de potencia no excedan lo esperado, la caída de voltaje excede los valores admisibles por tanto se traducen en pérdidas económicas al desperdiciar energía. Un diseño adecuado puede reducir las pérdidas de energía y cumplir con la normativa revisada.

B. Resultados del cálculo de conductor económico de la línea de subtransmisión propuesta

1) Cálculo del conductor económico

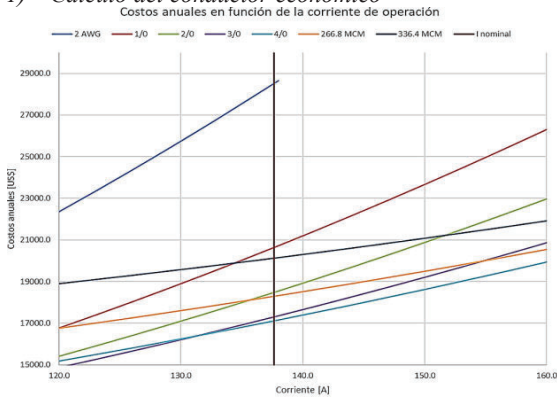


Figura 4. Costos anuales en función de la corriente de operación de cada conductor.

El conductor más económico es el ACSR 4/0 AWG. En la Figura 4 se presentan los resultados de los costos anuales totales para cada conductor en función de la corriente. Se consideró la potencia nominal de la central para obtener la corriente de funcionamiento de 137,62 A.

2) Diseño preliminar de la nueva línea de subtransmisión

El diseño preliminar de la nueva línea de subtransmisión ha permitido obtener:

- Planos topográficos y de planta de la nueva línea Illuchi 1 - El Calvario: Ubicaciones de postes, tensores y puestas a tierra.
- Tablas del cálculo mecánico en los conductores donde la flecha máxima resultante es de 1,4 m para un vano de 101 m, sin peligro de edificaciones o cruces.
- Tablas de esfuerzos transversales preliminares sobre el poste donde se indica que no existen sobre esfuerzos, especialmente en tramos con ángulos de giro importantes debido a la ubicación previa de postes con vanos pequeños.
- Tablas de la selección de postes y estructuras tensores: donde se detalla la ubicación, elevación, código, empotramientos, y más.

C. Resultados del estudio de la línea de subtransmisión propuesta

La simulación arroja resultados de corriente en 109 A, cargabilidad de 31 % y las pérdidas totales de 112 kW, alrededor del 2,68 %, tal como se describe en las Tablas 6 y 7.

TABLA 6. RESULTADOS DE PÉRDIDAS DE POTENCIA Y CARGABILIDAD

| | | |
|-------------------------------------|---------------|----------|
| Nro. Tramo | | I |
| Longitud [m] | | 10649,9 |
| Potencia total de paso [kVA] | | 4068 |
| Fp [%] | | 99,15 |
| I promedio [A] | | 109,9 |
| Pérdidas totales | [kW] | 112,6 |
| | [kVAr] | 138,4 |
| Cargabilidad | [%] | 31,1 |

TABLA 7. PORCENTAJE DE PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA

| Potencia total barra de 22,8 kV Illuchi 1 [kW] | Potencia total en la barra de 22,8 kV El Calvario [kW] | Pérdidas de potencia | |
|---|---|-----------------------------|------------|
| | | [kW] | [%] |
| 4180 | 4068 | 112 | 2,68 |

Los resultados de la Tabla 8, indican una mejora en los niveles de voltaje en la subestación El Calvario, con una caída de voltaje aceptable del 3,1 %.

TABLA 8. VALORES DE VOLTAJE EN LAS BARRAS Y CÁLCULO DE LA CAÍDA DE VOLTAJE EN LA LÍNEA DE SUBTRANSMISIÓN PROPUESTA.

| Parámetros | Fase A | Fase B | Fase C |
|---|---------------|---------------|---------------|
| Voltaje en la barra de envío [kV] | 22,2 | 22,3 | 22,2 |
| Voltaje en la barra recepción [kV] | 21,5 | 21,6 | 21,5 |
| Caída de voltaje [kV] | 0,69 | 0,7 | 0,69 |
| Regulación de voltaje [%] | 3,1 | 3,1 | 3,1 |

IV. DISCUSIÓN

A. Comparativa de línea de subtransmisión actual con la línea propuesta.

La Tabla 9, indica las mejoras porcentuales obtenidas con la propuesta de la línea. Las pérdidas de potencia, cargabilidad y regulación de voltaje se reducen aproximadamente a la mitad en comparación con la línea actual, destacando las mejoras potenciales del nuevo diseño.

TABLA 9. COMPARATIVA DE LOS CÁLCULOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO DE LA LÍNEA ILLUCHI 1 – EL CALVARIO ACTUAL CON LA LÍNEA PROPUESTA.

| Parámetro | A: Línea actual | B: Línea propuesta | Mejora de B respecto de A [%] |
|--|------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Pérdidas de potencia activa [%] | 4,91 | 2,68 | 45 |
| Cargabilidad [%] | 68,00 | 31,1 | 54 |
| Regulación de voltaje [%] | 5,7 | 3,1 | 45 |

V. CONCLUSIONES

La simulación de la línea actual Illuchi 1 - El Calvario muestra altos valores de pérdidas de potencia (205 kW o 4,91 % del flujo total) y una caída de voltaje del 5,7 %, fuera de los rangos establecidos. La cargabilidad alcanza el 68 % de su capacidad. Es necesario un cambio de conductor para mejorar la transmisión de energía de la Central de Generación Illuchi 1.

Es posible construir una nueva ruta para la línea de subtransmisión Illuchi 1 - El Calvario a 22,8 kV, respetando aspectos técnicos y normativos, minimizando cruces con redes existentes y evitando afectar residencias en Latacunga.

El conductor ACSR 4/0 AWG es el más económico para la nueva línea Illuchi 1 - El Calvario, transportando electricidad al menor costo.

La simulación de la nueva línea Illuchi 1 - El Calvario con conductor económico muestra pérdidas de potencia del 2,68 % (112,6 kW) del flujo total. La caída de voltaje es del 3,1 % del voltaje nominal y la cargabilidad llega al 31,1 % de su capacidad. Los resultados cumplen los límites permitidos de voltaje y mejoran la cargabilidad y pérdidas en comparación con la línea actual.

El presupuesto referencial para la nueva línea Illuchi 1 - El Calvario es de 533.092,47 US\$, excluyendo el IVA. El costo por kilómetro de red mixta (urbana y rural) a 22,8 kV es de 49.821,69 US\$.

REFERENCIAS

- [1] J. Erazo, "Estudio técnico económico para el diseño y dimensionamiento de un transformador tipo zigzag para puesta a tierra en la central de generación Illuchi 1 de ELEPCO," Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [2] J. Coronel Llive y Y. Rivas Vásquez, "Análisis técnico y económico de la conveniencia de cambio del sistema aislado de tierra a un sistema puesto a tierra en la C.H. Illuchi 1," Escuela Politécnica Nacional, 2008.
- [3] T. Bravo y E. Terán, Instructivo para selección de ruta para líneas de transmisión. Ecuador, 2017.
- [4] C. Riofrío, "Cálculo para determinar la opción más ventajosa desde el punto de vista económico, de la cargabilidad de los diferentes circuitos primarios trifásicos de distribución con conductores ACSR y 13.8 KVff," 2004.
- [5] N. Vargas, "Estudio de cargabilidad de la línea a 22,8 kV de la Central Illuchi 1 de la ELEPCO S.A. y propuesta de cambio del conductor existente por un conductor económico para el transporte de la energía generada: estudio de cargabilidad de la línea existente a 22,8 kV," Escuela Politécnica Nacional, 2023.
- [6] ARCERNNR, Pliego Tarifario Servicio Público de Energía Eléctrica Año 2022. 2022, p. 39.
- [7] Empresa Eléctrica Quito S.A., Normas Para Sistemas De Distribución Parte B Unidades De Propiedad y Construcción. Quito, Ecuador, 2015.
- [8] Centelsa, "Cables ACSR," 2023.
- [9] Endesa, "ESPECIFICACIÓN TÉCNICA Cable de Acero Galvanizado E-MT-028," 2011.