

Estudio para Repotenciación de la Línea de Transmisión Pucará – Mulaló a 138 kV Utilizando el Conductor más Económico

Joaquín Alfredo Chasipanta González, Ing. Raúl Antonio Canelos Salazar
Escuela Politécnica Nacional, CELEC EP Transelectric, Quito, Ecuador

Resumen – En el presente trabajo se realiza el estudio de la repotenciación de la línea de transmisión Pucará-Mulaló a 138 kV, utilizando el conductor más económico mediante la teoría de la evaluación técnica económica.

Los conductores identificados como alternativas en función de la potencia a transmitir, son tipo HTLS (ACCR, ACCC, ASCC) y conductores tipo convencional (ACAR). Para el estudio eléctrico mecánico se utiliza, el cálculo de la ampacidad según la norma IEEE Std 738–1993, el cálculo mecánico de los conductores según normas del EX INECEL, el cálculo de pérdidas de potencia con el programa de flujos de potencia DigSILENT y para análisis de las estructuras de soporte el programa SAP 2000.

Este trabajo puede servir de guía para escoger conductores aptos para la repotenciación, puesto que se explica detalladamente un procedimiento efectivo, para determinar el conductor apropiado que pueda sustituir al conductor actual considerando condiciones de costo total, flecha máxima y tensión mecánica del conductor.

Palabras clave: Ampacidad, Conductores convencionales, Conductores HTLS, Conductor más económico, Estructuras de soporte, Líneas de transmisión, Mulaló, Pucará, DigSILENT, SAP 2000.

I. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

A. Introducción

La línea de transmisión Pucará – Mulaló se encuentra conformada por torres autosoportantes extremadamente pesadas de tronco piramidal y están diseñadas para soportar un voltaje de 138 kV. Actualmente las torres de la línea de transmisión soportan a tres conductores (1 terna) de tipo ASCR 477 MCM “Flicker” y un cable de guarda de acero galvanizado de tipo 3/8” Φ “H.S”.

B. Descripción de la ruta

La línea de transmisión Pucará – Mulaló, se encuentra en la zona 2, parte desde la subestación Pucará hasta la subestación Mulaló; ambas subestaciones de propiedad de CELEC EP – TRANSELECTRIC. Esta línea se encuentra en la Cordillera Oriental de los Andes y atraviesa parte de la cadena montañosa Andina del país, siguiendo una ruta que cruza regiones de páramo y sectores que se dedican a

labores agrícolas y ganaderas. En la figura 1 se observa la ubicación de las torres de salida y llegada.

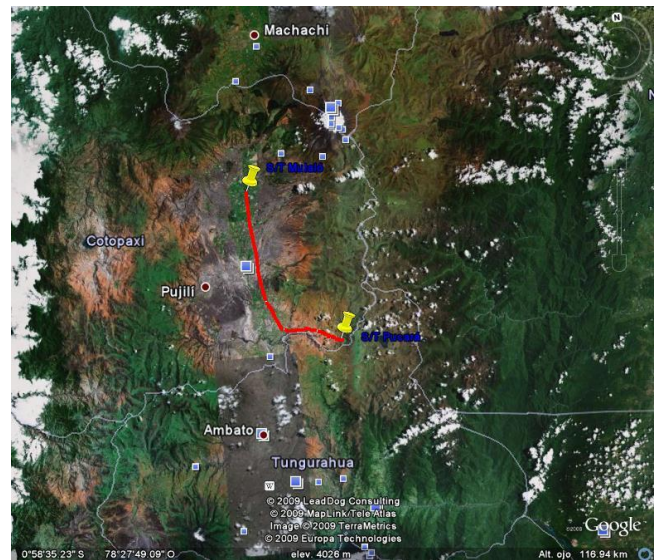


Fig. 1. Ubicación de las torres de salida y llegada

C. Distancia al suelo [3]

La memoria técnica del proyecto indica que la distancia desde el punto de amarre de la cruceta inferior hasta el suelo es de 18,45 metros, siendo 9,11 metros el valor de la flecha en estado caliente y 6,99 metros la distancia de seguridad al suelo.

En la Figura 2 se indica la distancia mínima al suelo, así como el valor de la flecha en estado caliente para la torre de tipo N y tipo C de base ± 0 y de pie ± 0 .

D. Materiales [4]

Las torres están formadas por perfiles de acero galvanizado en caliente por inmersión en baño de zinc fundido con elementos sueltos y perforados. Los perfiles utilizados en las torres son de:

- Acero de alta resistencia ASTM A242-55
- Acero normal ASTM 7-56 T

E. Tipos de torres [3]

La línea de transmisión está conformada por 5 tipos de torres entre las cuales se encuentran:

- a) Torre tipo N: estructura de suspensión en alineación (tangente).

- b) Torre tipo R: estructura reforzada para suspensión en alineación y para anclajes.
- c) Torre tipo T: estructura de retención utilizada para anclaje mecánico de la línea para tramos aproximados de 3 km.
- d) Torre tipo A estructura de anclaje para ángulos de hasta 30 grados de deflexión.
- e) Torre tipo C: estructura para anclaje y terminales. Se usan estas torres para cruces extremadamente largos o muy desnivelados.

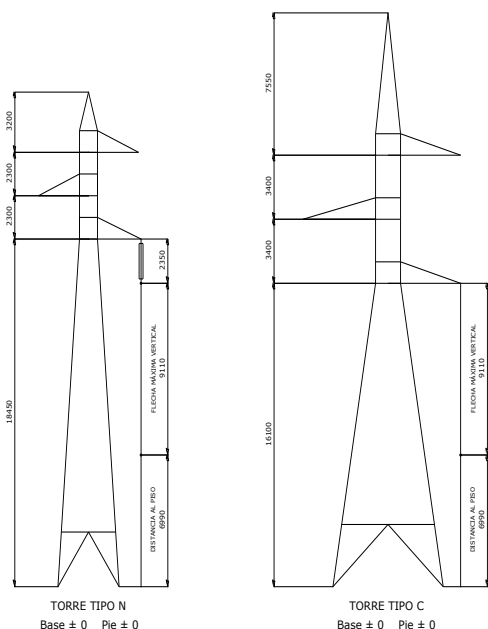


Fig. 2 Distancia mínima al suelo de la torre de tipo N y C [5], [6]

II. ESTUDIO ELÉCTRICO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN PUCARÁ- MULALÓ

A. Situación actual de la línea de transmisión

La línea de transmisión Pucará - Mulaló de simple terna interconecta la barra Pucará con la de Mulaló, transporta la energía proveniente del Sistema Nacional Interconectado hacia el centro de consumo de carga ubicado en las barras Mulaló y Vicentina.

El flujo de potencia de la línea de transmisión Pucará-Mulaló se divide en dos partes: La primera parte se queda en la barra Mulaló para cubrir la demanda de la Empresa Eléctrica Cotopaxi y del gran consumidor Novacero. La segunda fluye hacia la barra Vicentina por medio de la línea de transmisión Mulaló - Vicentina.

B. Saturación de la línea de transmisión

La línea de transmisión Pucará Mulaló se encuentra en vías de saturación por el crecimiento de la carga habitual en la barra Mulaló y también por la interconexión de la empresa Novacero al Sistema Nacional Interconectado a través de la barra de 138 kV en la subestación Mulaló.

En la actualidad, la carga de Novacero conectada en la barra Mulaló en horas de demanda mínima y media no sobrecarga a la línea de transmisión Pucará - Mulaló, pero en horas de demanda máxima y con el propósito de no

sobrecargar a la línea de transmisión, la empresa Novacero tiene restricción por parte del CENACE de no operar al 100% de la carga nominal.

La línea de transmisión Pucará - Mulaló por límite térmico en condiciones de operación normal puede transmitir hasta una corriente de 469 amperios.

Para demostrar que la línea de transmisión se satura por límite térmico, se propuso correr flujos de potencia con el programa de flujo de potencia DigSILENT para el periodo 2011-2020. Como muestra la figura 3, considerando que la carga de Novacero conectada en la barra Mulaló está funcionando como indica la Tabla I.

TABLA I
CARGA DE NOVACERO EN LA BARRA MULALÓ

Carga de Novacero en la barra Mulaló	
En periodo lluvioso y de estiaje:	
Dmax	30,00 [MW] a f.p = 0,96
Dmed	26,79 [MW] a f.p = 0,96
Dmin	26,79 [MW] a f.p = 0,96

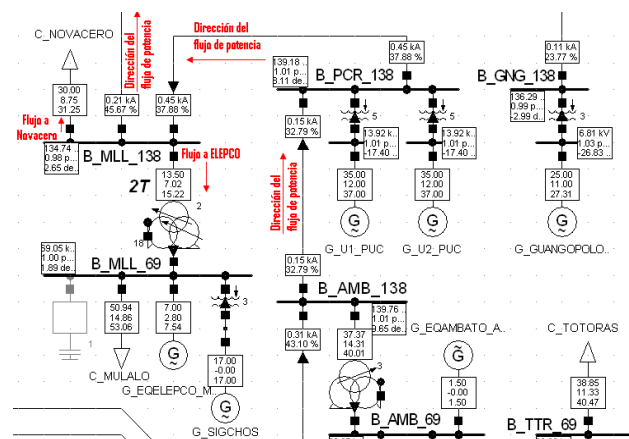


Fig. 3 Parte del diagrama unifilar del SNT

Los resultados de los flujos de potencia arrojados por el programa DigSILENT [8], Tabla II, con el conductor actual (ACSR FLICKER 477), indican que en los años 2013 y 2015, la línea de transmisión rebasará el límite térmico, por lo que la línea quedaría saturada, por tanto se concluye que la línea debe ser repotenciada.

C. Conductores adoptados para cubrir la demanda en la línea de transmisión Pucará- Mulaló

1) *Introducción:* Con el propósito de reforzar el SNI, debido al crecimiento de la demanda en el SNI y cumplir con la potencia requerida por la empresa Novacero en todos los períodos se ha propuesto encontrar un conductor con una sección económica que cumpla con requerimientos eléctricos y mecánicos que demande la línea. En la Figura 4 se indica los tipos de conductores considerados para el estudio.

A continuación se presenta los tipos de conductores considerados para es estudio:

- Conductores HTLS "High Temperature Low Sag":

- ACCC - CTC (Aluminum Conductor Composite Core) - 180°C, [12]

- ACCR – 3M (Aluminum Conductor Composite Reinforced) - 210°C, [13]
- ACSS (Aluminum Conductor Steel Supported) – 200 °C, [11]

- Categoría de convencional:

- ACAR (Conductor de Aluminio con Refuerzo de Aleación) - 75°C, [14]

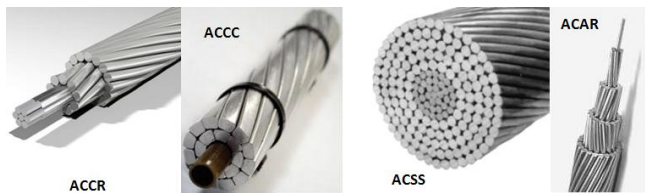


Fig. 4 Conductores seleccionados para la repotenciación

TABLA II
 REPORTE DE FLUJO DE POTENCIA CON CONDUCTOR ASCR
 FLICKER 477 MCM

Año	DEMANDA	Época Lluviosa		Época Estiaje	
		BARRA PUCARÁ	BARRA MULALÓ	BARRA PUCARÁ	BARRA MULALÓ
		Corriente de salida [Am]	Corriente de llegada [Am]	Corriente de salida [Am]	Corriente de llegada [Am]
2011	Dmax	450	450	400	400
	Dmed	320	320	260	260
	Dmin	300	300	170	170
2012	Dmax	440	440	350	350
	Dmed	280	280	250	250
	Dmin	230	230	140	140
2013	Dmax	560	560	410	410
	Dmed	380	380	280	280
	Dmin	290	290	160	160
2014	Dmax	440	440	360	360
	Dmed	350	350	260	260
	Dmin	240	240	140	140
2015	Dmax	500	500	450	450
	Dmed	360	360	220	220
	Dmin	250	250	120	120
2016	Dmax	360	370	310	320
	Dmed	260	260	230	230
	Dmin	200	200	120	120
2017	Dmax	370	370	320	320
	Dmed	250	250	230	230
	Dmin	190	190	130	130
2018	Dmax	360	360	330	340
	Dmed	250	250	240	240
	Dmin	200	200	140	140
2019	Dmax	380	380	340	340
	Dmed	260	260	250	250
	Dmin	190	190	140	140
2020	Dmax	370	370	350	350
	Dmed	260	260	250	260
	Dmin	180	180	150	150

2) *Características de los conductores seleccionados:* La selección de este tipo de conductores para la repotenciación de la línea transmisión Pucará Mulaló se lo hace tomando las siguientes consideraciones:

- El conductor deben tener una gran resistencia mecánica, debido a que la línea de transmisión atraviesa terrenos montañosos típicos de la región sierra del Ecuador.
- El conductor deben tener una gran capacidad de conducción de corriente eléctrica, para cubrir la demanda actual y la demanda futura de potencia en la barra Mulaló.

• El conductor deben ser livianos con el fin de no someter a la cadena de aisladores y a las estructuras de las torres de transmisión a un esfuerzo mecánico superior al que están actualmente sometidos por el conductor actual

• Los conductor deben ser de fácil instalación (igual o parecido a la de los convencionales) para minimizar los tiempos en la instalación y en suspensión del servicio.

3) *Selección de las secciones:* Tomando como base las anteriores consideraciones, el paso siguiente es escoger las secciones de los respectivos tipos de conductores para la repotenciación de la línea de transmisión Pucará - Mulaló, adoptando los siguientes criterios:

1. El Peso específico (kg/km) de los nuevos conductores deben ser igual o ligeramente mayor al peso específico del conductor actual.
2. El Coeficiente de expansión térmica (°C⁻¹) de los nuevos conductores debe ser bajo.
3. La ampacidad de los nuevos conductores deben ser mucho mayor que la del conductor actual.

El primer criterio tomado en consideración asegura que la carga vertical que ejerce el nuevo conductor no sobrecarga al esfuerzo vertical que puede resistir la cruceta. El segundo criterio garantiza que la flecha de los nuevos conductores no sea tan elevada y logren cumplir con las distancias de seguridad requeridas por la línea. El tercer criterio asegura que la línea de transmisión pueda transmitir la nueva potencia requerida por la demanda actual y futura.

D. Ampacidad del conductor [7]

La ampacidad de un conductor es la capacidad de transportar corriente eléctrica en función de la temperatura. En otras palabras, es la corriente en amperios que un conductor puede transportar continuamente, sin exceder su temperatura máxima de operación. El valor de la ampacidad de un conductor depende del calibre del conductor, el tipo de material, el aislamiento y la instalación del conductor. Para este caso de estudio solamente se estudia la ampacidad para conductores desnudos.

El método a utilizar para el cálculo de la ampacidad se basa en la Norma IEEE Std 738-1993 Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductor. Este método está basado en la ecuación fundamental del balance de calor:

$$I^2 \cdot R + q_s = q_c + q_r \quad (1)$$

Donde:

- I = Corriente eléctrica, en [A]
- R = Resistencia AC eléctrica del conductor, en [ohm/pie]
- q_s = Ganancia de calor solar, en [W/pie]
- q_c = Transferencia de calor por convección, en [W/pie]
- q_r = Transferencia de calor por radiación, en [W/pie]

En la Tabla III se muestran los valores de la ampacidad de los diferentes conductores a temperatura admisible y a la

temperatura cuando la línea está transmitiendo 560 amperios.

TABLA III
VALORES DE LA AMPACIDAD DE CONDUCTORES SELECCIONADOS

NOMBRE CLAVE	CALIBRE CONDUCTOR [MCM]	TEMPERATURA ADMISIBLE [°C]	AMPACIDAD A TEM. ADMISIBLE [AMP]	TEMPERATURA A 560 AMPERIOS [°C]
ACCC/TW "Linnet"	435	180	928,09	59,4
ACCC/TW "Brant"	467	180	954,04	54,6
ACCC/TW "Lark"	532	180	1061,82	51,3
ACCC/TW "Hawk"	610	180	1158,00	47,35
ACCR_297-T16	297	210	857,88	76,80
ACCR_340-T16	340	210	937,00	68,00
ACCR_405-T16	405	210	1051,69	58,90
ACCR_470-T16	470	210	1159,23	53,00
Ostrich/ACSS	300	200	925,38	76,50
Oriole/ACSS	336	200	1007,70	67,80
IBIS/ACSS	398	200	1112,18	60,00
Flicker/ACSS	477	200	1244,63	53,00
ACAR	550	75	757,08	51,70
ACAR	600	75	798,92	49,00
ACAR	650	75	839,33	47,00
ACAR	700	75	882,80	45,01

Obs: Los valores de Ampacidad se calcula considerando valores de viento 3,8 km/h, 20 °C, a 2900 msn, con, 0,5 emisividad y absorción solar. Estos valores fueron considerados en función de las condiciones típicas de la región por donde atraviesa la línea de transmisión.

En la Figura 5 se muestra un gráfico de la ampacidad para varias secciones del conductor tipo ACCR.

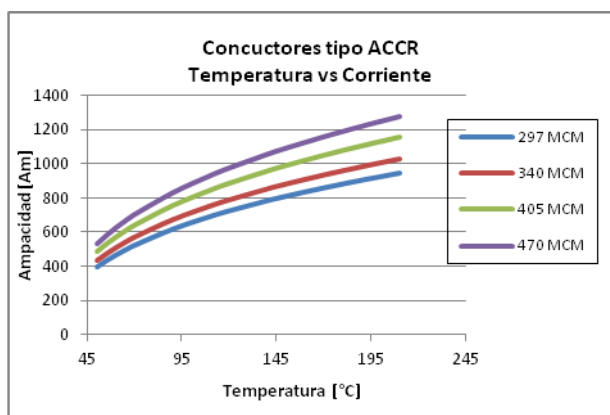


Fig. 5 Ampacidad del conductor ACCR

E. Pérdidas en las líneas de transmisión [12]

Las pérdidas que ocurren en una línea de transmisión son principalmente causadas por efecto Joule y efecto Corona. Las primeras pérdidas son proporcionales a la intensidad de corriente de la línea al cuadrado y la segunda es proporcional a la voltaje de la línea, es decir las primeras disminuyen con el aumento de voltaje y la segunda aumenta con el aumento de voltaje, pero ambas disminuyen cuando se incrementa la sección del conductor; el aumento de la sección del conductor involucra en el incremento del costo total de la línea.

Para el caso de estudio de la repotenciación de la línea de transmisión Pucará -Mulaló, las pérdidas son evaluadas partir de escenarios de demandas (Tabla IV y Tabla V) y en también con la ayuda de la ayuda de corridas de flujos de potencia con el programa DigSILEN, [8]

A continuación se describen los estudios de pérdidas realizado con los conductores seleccionados para la repotenciación de la línea.

- Pérdidas de potencia Joule
- Pérdidas de energía Joule
- Pérdidas de potencia corona
- Pérdidas de energía corona

TABLA IV
NÚMERO DE HORAS PARA CADA HORA

Demanda	Horario	Horas
Máxima	17:00 - 22:00	5
Media	07:00 - 17:00	10
Mínima	22:00 - 07:00	9

TABLA V
NÚMERO DE DÍAS POR ÉPOCA

Época Lluviosa	Época Estiaje
182 [días]	182 [días]

III. CÁLCULO DEL CONDUCTOR ECONÓMICO

A. Introducción

El conductor de sección económica es aquel conductor que cumpla con las exigencias necesarias para una transmisión continua de potencia y energía.

La determinación del conductor de sección económica para el caso de estudio, se basa en encontrar entre varias secciones, un conductor económico, en el que el costo de inversión (costo del conductor) más el costo de operación (costos de pérdidas) sea bajo.

B. Selección de sección económica del conductor

La sección económica de un conductor se determina mediante el método del valor presente de flujos de costos totales, cuyos principales componentes son:

- Costo anual de las pérdidas de potencia y energía por efecto Joule.
- Costo anual de las pérdidas de potencia y energía por efecto corona.
- Costo directo aproximado de la línea de transmisión.

A continuación se describe el procedimiento para determinar la sección económica.

- Se calcula el costo del conductor para cada sección del conductor (se deben tener presente que a mayor sección, mayor es el costo de inversión en los conductores).
- Se calcula el costo de las pérdidas por efecto Joule, tanto las de potencia como de energía para cada sección del conductor.
- Se calcula el costo de las pérdidas por efecto corona, tanto de potencia como de energía para cada sección de conductor.
- Se realiza la comparación económica mediante el método del valor presente del flujo de costos totales: costo del conductor + pérdidas, para un periodo de 10 años, a la tasa de descuento de 7,5% anual.

C. Evaluación técnica - económica

El modelo de evaluación técnica – económica, mediante el cálculo a valor presente de los costos de inversión y de pérdidas durante un periodo de tiempo permite encontrar la sección económica óptima.

Para el caso de estudio de la repotenciación de la línea de transmisión, la evaluación técnica económica, permitirá encontrar un conductor de sección económica con características eléctricas adecuadas, pero posiblemente no con las características mecánicas más adecuadas.

A continuación se indican la evaluación técnica económica para los conductores escogidos para el estudio de repotenciación.

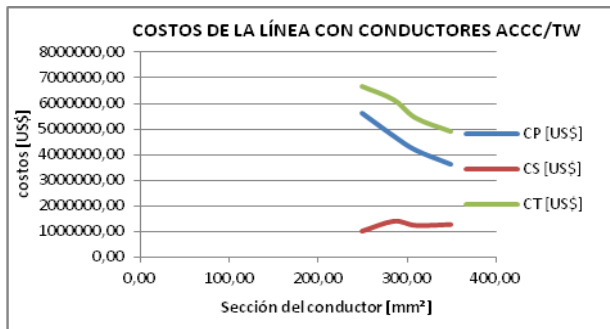


Fig. 6 Costos de la línea con conductores ACCC/TW

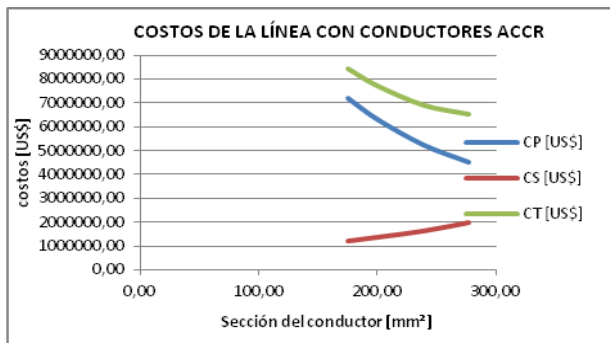


Fig. 7 Costos de la línea con conductores ACCR

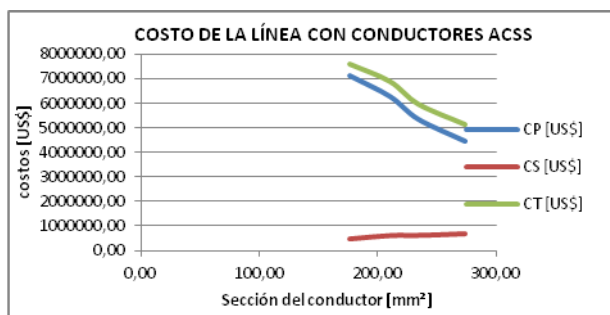


Fig. 8 Costos de la línea con conductores ACSS

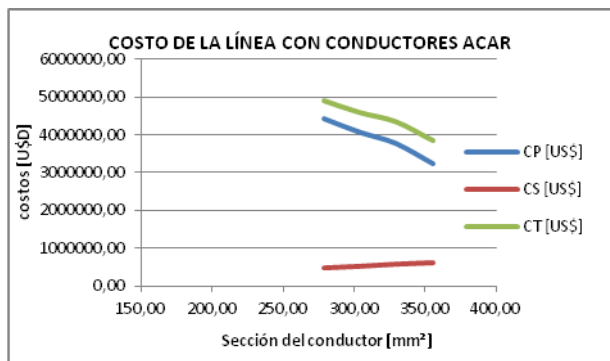


Fig. 9 Costos de la línea con conductores ACAR

D. Sección económica entre varios tipos de conductores

Para determinar la sección económica entre varios tipos de conductores propuestos, se debe comparar el costo económico de cada tipo de conductor y se debe escoger el de menor costo.

En la Figura 10 se muestra los conductores económicos de cada tipo.

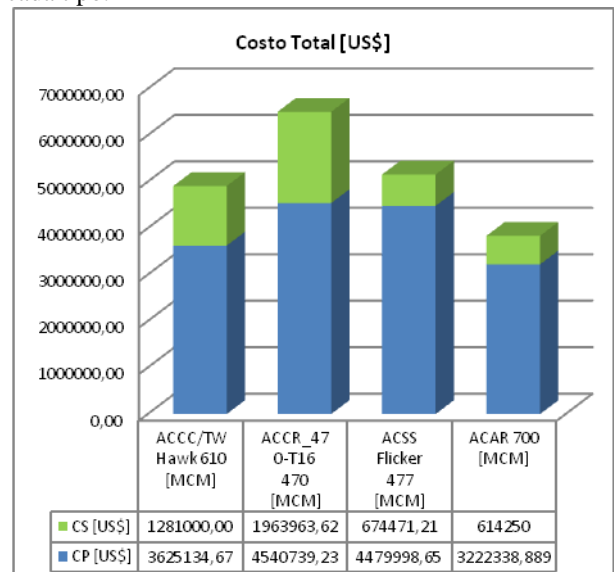


Fig. 10 Conductores económicos de cada tipo

E. Análisis de resultados

- Entre varios tipos de conductores, el de sección más económica es el conductor convencional ACAR 700 [MCM] (Figura 10). Pero hay que recalcar que este conductor podría como no podría tener las características mecánicas apropiadas para la repotenciación, por lo que en la siguiente sección se analiza la parte mecánica y se podrá comprobar si el conductor es el más conveniente para la repotenciación de la línea de transmisión Pucara - Mulaló.
- El costo del conductor tipo convencional ACAR 700 [MCM] es bajo con respecto a los otros conductores de sección económica (Figura 10).
- Comparando entre los diferentes conductores de sección económica, el ACAR 700 [MCM] es el de menor costo de pérdidas.

IV. CÁLCULO MECÁNICO DE LÍNEAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA

A. Introducción

El cálculo mecánico sirve para determinar los valores de flecha y tensión a que están sometidos los conductores de acuerdo a las condiciones de operación.

En esta sección se probará si el conductor económico encontrado en la sección anterior cumple con las características mecánicas para la repotenciación de la línea de transmisión Pucará Mulaló, caso contrario se buscará otro conductor que si las cumpla. Para el cálculo mecánico se utiliza la ecuación de cambio de estado [9] y también la ecuación de la flecha [1].

$$T_2^3 + K_1 T_2^2 - K_2 = 0 \quad 2$$

Donde:

- T_2 = Tensión mecánica final del conductor, en [kg]
- T_1 = Tensión mecánica inicial del conductor, en [kg]
- E = Módulo de elasticidad, en [kg/mm²]
- S = Área de la sección transversal del conductor, en [mm²]
- α = Coeficiente de dilatación lineal, en [1/°C]
- t_1 = Temperatura inicial del conductor, en [°C]
- t_2 = Temperatura final del conductor, en [°C]
- a = Vano, en [m]
- P_1 = Peso del conductor, en [kg/m]
- P_2 = Peso del conductor más la carga de viento o hielo, en [kg/m]
- K_1, K_2 = Constantes de la Ecuación de cambio de estado.

$$f = \frac{T}{P} \left(\cosh \left(\frac{\alpha \cdot P}{2 \cdot T} \right) - 1 \right) \quad 3$$

Donde:

- f = flecha del conductor, en [m]
- a = Longitud del vano; (x/2), en [m]
- C = Parámetro de la línea; $C = T/P$ en [m]
- T = Tensión a la que está sometido el conductor, en [kg]
- P = Peso al que está sometido el conductor, [kg/m]

B. Selección del conductor con las características adecuadas para la repotenciación de línea de transmisión Pucará - Mulalo

La selección del conductor con las características mecánicas adecuadas para la repotenciación de la línea de transmisión Pucará - Mulalo se hace considerado los siguientes criterios.

- a) La flecha máxima o en estado caliente del nuevo conductor debe ser menor o igual a la flecha del conductor actual en estado caliente (9,11 metros).
- b) La tensión máxima o la tensión en estado frío del nuevo conductor debe ser hasta al 120% la tensión del conductor actual en estado frío (2241 kg).
- c) El costo total del conductor debe ser el menor entre los costos totales de los conductores que cumple los criterios a y b.

TABLA VI
PARÁMETROS MECÁNICOS DE LOS CONDUCTORES SELECCIONADOS

Conductor	Flecha máxima transportando 560 Amp. [m]	Tensión máxima [kg]	CT=CC+CP [US\$]
ACCC/TW "Lineet"	8,24	2263	6670840,225
ACCC/TW "Brant"	6,03	3269	6150918,902
ACCC/TW "Lark"	7,2	2976	5428452,079
ACCC/TW "Hawk"	7,66	3048	4906134,667
ACCR_297-T16	8,83	1824	8426026,873
ACCR_340-T16	8,48	2036	7699197,007
ACCR_405-T16	8,15	2338	6886808,216
ACCR_470-T16	7,9	2644	6504702,852
ACSS Ostrich	9,93	1804	7585995,727
ACSS Linnat	8,52	2482	6890281,632
ACSS Ibis	9,46	2218	5978215,923
ACSS Flicker	10,12	2207	5154469,862
ACAR 550	9,95	2077	4890128,264
ACAR 600	9,76	2238	4576450,764
ACAR 650	9,69	2385	4336060,1
ACAR 700	9,81	2468	3836588,889


a) flecha menor o igual a 9,11 metros
b) Tensión menor o igual al 120% de 2241 kilogramos
c) Costo total debe ser el menor entre los costos totales de los conductores que cumplen con el criterio a y b

En la Tabla VI se muestra el valor de la flecha máxima, la tensión máxima y el costo total para cada uno de los conductores seleccionados en el estudio.

Como se puede apreciar el conductor más adecuado para la repotenciación de la línea de transmisión Pucará Mulaló es el ACCR_470-T16 470 [MCM], siendo el que cumple con las consideraciones detalladas anteriormente.

A continuación se muestra en la Tabla VII las características del conductor adecuado.

TABLA VII
CARACTERÍSTICAS DEL CONDUCTOR ADECUADO PARA LA REPOTENCIACIÓN

Tipo	ACCR_470-T16	
Calibre	470 MCM	
Composición	26/7 (26x3,4+7x2,7)	
Diámetro (mm)	21,6	
Sección Aluminio (mm ²)	238	
Sección total (mm ²)	277	
Resistencia DC a 20°C (Ohm/Km)	0,1153	
Peso (Kg/m):	0,794	
Tensión de rotura (Kg)	8715	
Módulo de elasticidad (Kg/mm ²)	8968	
Coeficiente de dilatación lineal (1/°C):	16,7E-06	

C. Interpretación de resultados

El valor de la flecha en estado máximo del conductor ACCR_470-T16 470 [MCM] es menor al conductor actual (ACSR Flicker 477 [MCM]). Haciendo que el nuevo conductor, presente mayor distancia de seguridad hacia al suelo, mejore la confiabilidad de la línea de transmisión y cumpla a cabalidad las distancias de seguridad que estipulan las normas.

En la figura 11 se muestra la comparación de la distancia al suelo con el conductor adecuado para la repotenciación y el conductor actual.

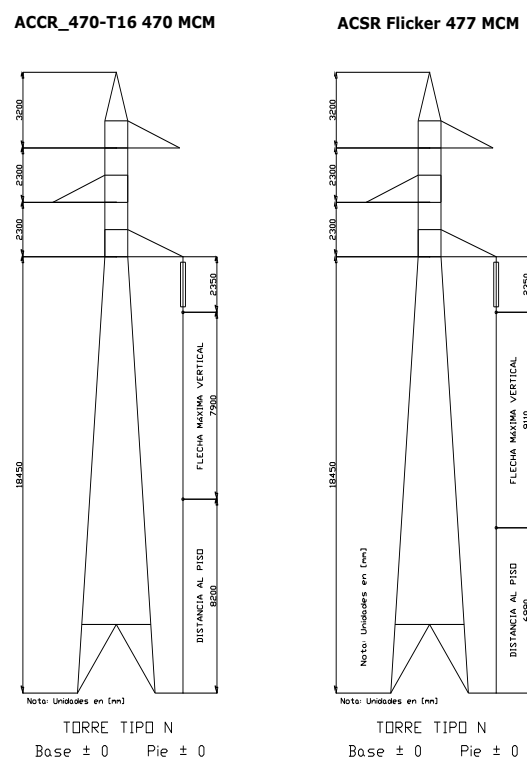


Fig. 11 Distancia al suelo, conductor nuevo y conductor actual

El valor del peso unitario del nuevo conductor es 13,13% menor que el peso del conductor actual. Esto hace que la carga vertical que ejerce el nuevo conductor sobre la estructura de soporte también sea mucho menor de la que ejerce el actual conductor.

El valor de la tensión en estado frío del conductor apto para la repotenciación es del 17,98% mayor que la del conductor actual. Esto hace que las cargas longitudinales y transversales que ejerce el nuevo conductor sobre las estructuras de soporte sean mayores que la del conductor actual.

En el figura 12 se muestra la comparación del árbol de cargas entre el conductor ACCR_470-T16 470 [MCM] y el ACSR Flicker 477 [MCM] para una estructura tipo N y tipo C (como remate), considerando el caso 1, [2].

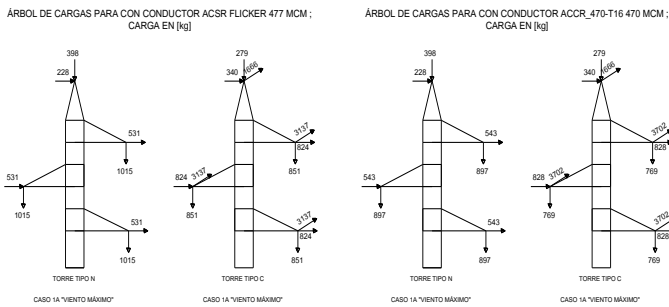


Fig. 12 Árbol de cargas del conductor actual y nuevo

V. ANÁLISIS ESTRUCTURAL MEDIANTE EL PROGRAMA SAP 2000 [10]

Para comprobar si las estructuras soportan al nuevo conductor se utiliza el programa SAP 2000 V 12. El análisis estructural se realiza a la estructura tipo N y tipo C.

Se utiliza el programa Autocad para armar en forma tridimensional las estructuras de soporte; figura 13. Para el diseño de geométrico de las estructuras se utiliza los planos de las torres referentes al proyecto Pisayambo.

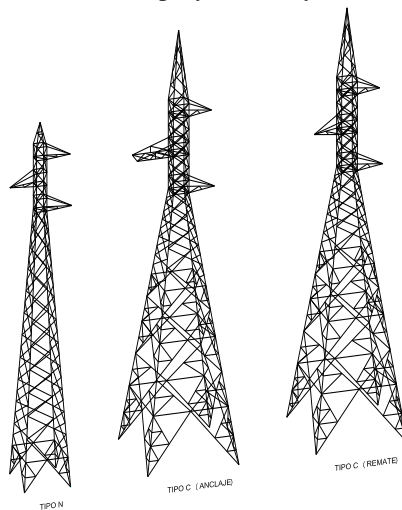


Fig. 13 Diseño geométrico de las estructuras de soporte

Determinada la geometría de la torre en el programa AutoCad se exporta al programa SAP2000; figura 14.

El programa SAP 2000 permite analizar a la estructura de soporte, en función de parámetros como: tipo de material, y combos de cargas. En la figura 15 se muestra a una estructura de soporte, soportando a un determinado combo de cargas.

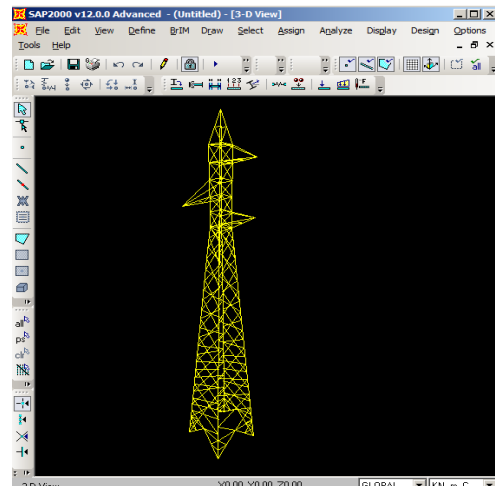


Fig. 14 Geometría de la estructura de soporte en el programa SAP 2000

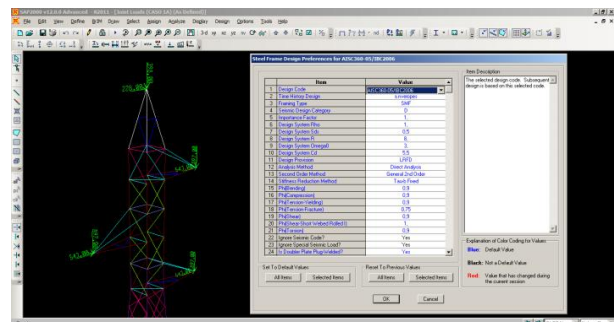


Fig. 15 Combos de carga en el programa SAP 2000

Para el análisis de las estructuras de soporte de la línea de transmisión Pucará Mulaló se corre el programa SAP 2000 considerando la norma AISC360-05 LRFD. Los resultados del comportamiento de los elementos de la estructura de soporte se los puede visualizar mediante la coloración sobre los elementos.

En las figuras 16, 17 y 18 se muestran los resultados de la simulación para la torre tipo N (suspensión) y tipo C (anclaje y remate).

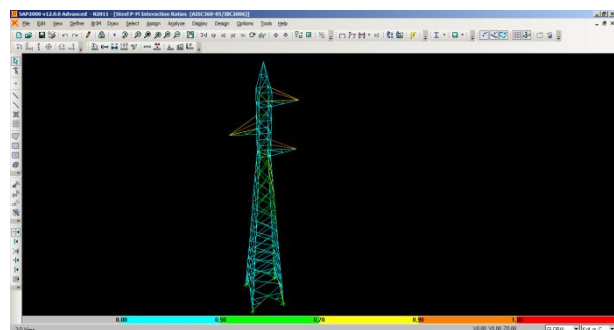


Fig. 16 Análisis de la torre tipo N en el programa SAP 2000

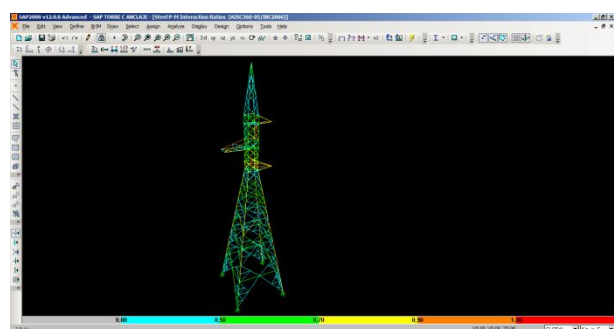


Fig. 17 Análisis de la torre tipo C (Anclaje) en el programa SAP 2000

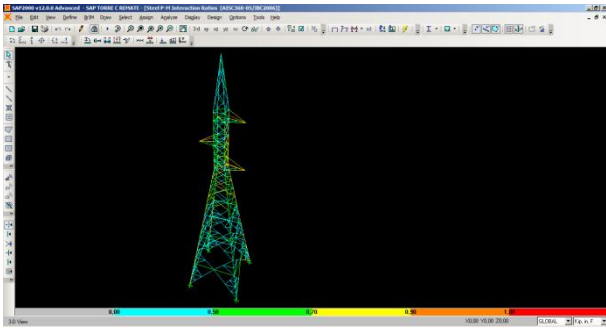


Fig. 18 Análisis de la torre tipo C (Remate) en el programa SAP 2000

VI. CONCLUSIONES

- Se concluye que la repotenciación de líneas de transmisión es una alternativa válida tanto desde el punto de vista técnico como económico, ante el crecimiento de la demanda de energía eléctrica.
- Se realiza el estudio técnico económico de varios conductores tales como: el ACCR, ACCC, ACSS, ACAR y se llega a la conclusión de que el conductor convencional ACAR 700 MCM es el más económico, entre los conductores seleccionados para el estudio; sin embargo, en condiciones de flecha máxima no cumple con las distancias de seguridad hacia el suelo quedando descartado para la repotenciación de la línea de transmisión Pucará - Mulaló.
- De acuerdo al estudio estructural de las estructuras de tipo N y tipo C (anclaje y remate), realizado mediante el programa SAP 2000, se llega a la conclusión, de que las estructuras estudiadas si soportan al nuevo conductor (ACCR_470-T16 470 [MCM]).
- Para el caso de estudio de la repotenciación de la línea de transmisión Pucará - Mulaló, se comprueba que el conductor ACCR_470-T16 470 [MCM] es el más recomendado para la repotenciación, ya que este, cumple con la condición de transmitir 560 amperios requeridos por la demanda en la barra Mulaló a 138 kV en las peores condiciones; condición que ocurre en el año 2013, cumple con las distancias de seguridad hacia el suelo, no sobrecarga mecánicamente a las estructuras de soporte estudiadas y es el más económico entre los conductores aptos para la repotenciación.
- Mediante el programa de flujo de potencia DIGSILENT PowerFactory, se pudo comprobar que el conductor económico ACCR_470-T16 470 [MCM], recomendado para la repotenciación de la línea de transmisión Pucará - Mulaló, cumple con parámetros eléctricos como: perfiles de voltaje, intensidad de corriente, potencia reactiva y activa.
- El conductor ACCR_470-T16 470 [MCM] tiene una gran capacidad de reserva para la transmisión de potencia, por lo que puede ser utilizado en eventos de contingencia del SNI, sin que exista inconvenientes con valores de flecha y distancias de seguridad hacia al suelo.
- Los conductores de tipo ACCR tienen una constitución muy parecida a los conductores ACSR, por lo que el tendido de estos conductores no necesitan de una técnica especial (utilizan el método convencional para el

tendido) y además los conductores ACCR, en caso de la repotenciación de líneas de transmisión tienen la ventaja de utilizar los mismos accesorios y herrajes ya instalados en las estructuras de soporte.

VII. REFERENCIAS

- [1] Checa, María. (2000). *“Líneas de transporte de Energía”*, Tercera edición, Editorial Alfaomega. Bogotá”
- [2] EX INECEL. *“Normas de proyectos para las líneas de 138 kV – Sistema Nacional de transmisión”*
- [3] EX INECEL. (1974). *“Proyecto Pisayambo, líneas de Transmisión, Memoria descriptiva del proyecto”*. Quito – Ecuador.
- [4] EX INECEL. (1974). *“Proyecto Hidroeléctrico Pisayambo, Central Pucara, Memoria descriptiva del proyecto”*. Quito – Ecuador.
- [5] EX INECEL. (1974). *“Proyecto Hidroeléctrico Pisayambo, Planos 138 kV Torre tipo N”*. Quito – Ecuador.
- [6] EX INECEL. (1974). Proyecto Hidroeléctrico Pisayambo, *“Planos 138 kV Torre tipo C”*. Quito – Ecuador.
- [7] IEEE Standard 738-1993. *“IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors”*. IEEE. USA. 1993.
- [8] *“MANUAL DIGSILENT PowerFactory”* Version 13 Germany: DIGSILENT GmbH (2003)
- [9] *“DISEÑO DE LA LINEA DE TRANSMISION A 138 kV PALANDA – LOJA”* [Online] http://hidroelectricadelsur.com/uploads/Memoria_T..._1_.doc
- [10] Semblantes, Marcelo. *“Diseño de una torre de transmisión eléctrica autosoportante para una línea de 69 kV”* Proyecto de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2010.
- [11] GENERAL CABLE. *“TransPowr™ ACSS Bare Overhead Conductor”* [Online] http://www.generalcable.com/NR/rdonlyres/DA8BE4C0-28F9-463F-8859-1A05FAA7B2F1/0/108116_TransPowr_ACSS.pdf.
- [12] SHANGHAI CABLE WORKS CO.,LTD. *“Conductores para Líneas Aéreas Tipo ACCC”* [Online] www.innoconsulting.com.ar/innorep/html/pdf/Cat_accce.pdf
- [13] 3M™. *“Aluminum Conductor Composite Reinforced”* [Online] http://multimedia.3m.com/mws/media/mediawebserver?mwsId=SSSSSu7zK1fs1xtUNYtSn8_Bev7qe17zHvTSeVSeSSSSSS--&fn=ACCRSpecSheet_8002800_DMR.pdf
- [14] ElectroCable. *“Conductores de Aluminio Reforzados con Aleación de Aluminio 6201-T81 ACAR”* [Online] <http://www.electrocable.com/electrocables/espanol/aluminio/acar.htm>.
- [15] Canelos, Raúl. EPN - 2010. *“Diseño de Líneas de Transmisión de Alta Tensión”*

VIII. BIOGRAFÍA



Joaquín Alfredo Chasipanta González, nació en Quito, Ecuador, el 16 de noviembre de 1984. Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Industrial “Miguel de Santiago”. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero Eléctrico en 2011.

Áreas de interés: Líneas de Transmisión, Subestaciones, Protecciones Eléctricas,

joaqui_chops@hotmail.com

Raúl Antonio Canelos Salazar, Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional, Postgrado en Microprocesadores (Italia), Master Ejecutivo en TI convenio España-EPN, Master en Administración de Negocios del Sector Eléctrico EPN. Profesor de Confiabilidad de SEP y Diseño de Líneas de Transmisión en la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la EPN. Ejecutor del Proyecto: Paute Fase C, Agoyán, Línea de Transmisión Tena-Coca, Machala-Frontera, Pasto-Quito II, Quevedo-Portoviejo. Conferencista de la ECUACIER en países latinoamericanos. Jefe de División de líneas de Transmisión CELEC EP – Transelectric, rcanelos@transelectric.com.ec