

## **Estudio de implementación de los conductores ACCC y GTACSR en la línea de transmisión de 220 kV entre los distritos de San Estanislao y General Aquino.**

**Ing. Enrique Fariña Arce; Ing. José Balmaceda Pérez**

**email:** enrifarina@gmail.com; jobalmagen54@hotmail.com

**Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Asunción**

**Paraguay**

### **RESUMEN**

El sostenido crecimiento de la demanda de energía eléctrica, sumado a las restricciones económicas y legales para la construcción de nuevas líneas de transmisión, ha impulsado el desarrollo de los conductores termorresistentes de baja flecha (HTLS). Estos permiten incrementar la capacidad de transmisión de líneas existentes, mediante el reemplazo de los conductores tradicionales del tipo ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced), y a la vez mantener las estructuras de apoyo y las distancias de seguridad a tierra.

Pese a sus interesantes propiedades, este tipo de conductores ha recibido poca atención por parte de los proyectistas de nuevas líneas, principalmente por su alto costo respecto al conductor estándar utilizado en dichos proyectos, el ACSR. No obstante, debido a la escasez de estudios más detallados sobre este tema, se ha creído conveniente analizar la utilización de los conductores HTLS en el diseño de nuevas líneas, explorando las posibilidades que ofrecen dichos conductores.

Para el análisis se han considerado al conductor de aluminio de núcleo compuesto (ACCC), y al conductor de aluminio tipo Gap (GTACSR), considerados como las tecnologías más representativas entre los conductores termorresistentes de baja flecha, con el objeto de comparar el uso de estos conductores en el diseño de la línea con un proyecto más convencional que emplea el conductor ACSR. El estudio incluye tanto un análisis de aspectos técnicos como económicos.

Para el estudio pretendido, se ha tomado como modelo de referencia la línea de transmisión de 220 kV entre los distritos de San Estanislao y General Aquino, en el departamento de San Pedro, Paraguay, con el objeto de formular conclusiones preliminares dentro del contexto del sistema eléctrico paraguayo.

### **PALABRAS CLAVES**

Líneas de transmisión, ACCC, GTACSR, conductores termorresistentes de baja flecha, HTLS.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las innovaciones en los últimos años dentro del campo de las líneas de transmisión ha sido el diseño de conductores que ofrezcan mejores prestaciones con respecto al conductor tradicional ACSR, en especial los denominados conductores termorresistentes de baja flecha o HTLS (High Temperature-Low Sag), por sus siglas en inglés.

La principal propiedad que ofrecen los conductores HTLS es la de mantener su resistencia mecánica a temperaturas superiores a los 100°C, sin producirse cambios sustanciales en la dilatación térmica, tal como ocurre en el caso de los conductores ACSR. Esta característica los hace idóneos para repotenciar líneas existentes, al no requerir cambios sustanciales en las estructuras de apoyo y conservar las distancias de seguridad a tierra.

Entre las diversas tecnologías existentes de este tipo de conductores, se han seleccionado para este estudio al conductor de aluminio de núcleo compuesto (ACCC- Aluminum Conductor Composite Core) (Figura 1) y al conductor de aluminio tipo Gap (GTACSR- Gap Type Aluminum Conductor Steel Reinforced) (Figura 2) ya que presentan destacadas propiedades de baja flecha con el aumento de la temperatura, que los destacan frente a tecnologías similares.[1]



**Figura 1: Conductor ACCC**



**Figura 2: Conductor GTACSR**

El conductor ACCC posee un núcleo compuesto de fibra de carbono que le confiere buenas ventajas mecánicas, pues dicho núcleo es 25% más resistente y un 60% más ligero que el núcleo de acero del conductor ACSR. Además, al tener los hilos de aluminio de forma trapezoidal, presenta un aumento en 28% en la sección conductora, lo cual reduce la resistencia óhmica del conductor y produce consecuentemente una reducción de las pérdidas de energía. Su excelente estabilidad dimensional, por su bajo coeficiente de dilatación térmica, trae como resultado bajas flechas a elevadas temperaturas, pudiendo trabajar a 150 °C en régimen permanente.

El conductor GTACSR es un conductor de aleación de aluminio con alma de acero que posee una separación física entre las hebras conductoras y el núcleo, la cual es rellena con una grasa termorresistente, lo que permite el tensionado del núcleo, dejando a las capas de aluminio inertes mecánicamente. Con este diseño, se obtienen bajas flechas a altas temperaturas mediante la participación casi exclusiva del acero en el comportamiento mecánico del conductor, pudiendo alcanzarse temperaturas de 150°C en régimen permanente.

A pesar las cualidades positivas de los conductores ACCC y GTACSR, que por lo general permiten alcanzar una capacidad de transmisión entre un 60 a 70% mayor que en líneas con conductores del ACSR, tienen como principal desventaja elevados costos relativos con respecto al conductor tradicional, de 2 a 3 veces superiores, así como mayores costos de instalación, en especial el conductor GTACSR, lo que se ha evidenciado en experiencias locales con su instalación por la ANDE (Administración Nacional de Electricidad).

## 2. ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONDUCTORES ACCC Y GTACSR EN LA LÍNEA ESTUDIADA.

La línea de transmisión de 220 kV adoptada para el estudio es una simple terna, con una extensión aproximada de 60 km, y que provee alimentación radial a la zona de Gral. Aquino. Para el análisis comparativo, se han seleccionado los siguientes conductores: ACCC de 816 MCM Grosbeak, GTACSR de 310 mm<sup>2</sup> y ACSR de 636 MCM Grosbeak, este último tomado como punto de referencia para el análisis.

### 2.1 Estudio técnico

En base a las propiedades de los conductores HTLS seleccionados, los principales aspectos técnicos a ser considerados en la comparación técnica son: las pérdidas de energía y la distribución de estructuras de apoyo a lo largo de la línea.

En cuanto a las pérdidas de energía, éstas son causadas en su mayor parte por la resistencia óhmica de los conductores. Para su cuantificación se requiere la utilización del concepto de factor de pérdidas, el cual se define como la relación entre las pérdidas promedio de una línea y las pérdidas en punta de carga. Según la fórmula en [2] el factor de pérdidas puede ser calculado a partir del factor de carga de un sistema eléctrico:

$$F_{pe} = 0,08 * F_c + 0,92 * F_c^2 \quad (1)$$

Donde  $F_{pe}$  es el factor de pérdidas y  $F_c$  el factor de carga de la demanda

Según datos proveídos por la ANDE, el factor de carga  $F_c$  del sistema interconectado paraguayo en el año 2010 es igual a 0,62. Asumiendo que la demanda de la zona de Gral. Aquino tiene un comportamiento similar al sistema interconectado, entonces el factor de pérdidas  $F_{pe}$  será igual a 0,4 por la fórmula (1) anterior.

Conociendo la proyección de demanda de potencia de la línea, se obtiene la corriente máxima anual, que combinada con el factor de pérdidas se puede calcular las pérdidas de energía anuales aproximadamente mediante la ecuación siguiente:

$$P_{perd} = 3 * I_{max}^2 * R * F_{pe} * 8760 \quad (2)$$

Donde  $P_{perd}$  son las pérdidas de energía óhmicas anuales en línea trifásica,  $I_{max}$  la corriente máxima anual durante punta de carga y  $R$  es la resistencia eléctrica del conductor.

Por otro lado, la distribución de torres a lo largo de la línea requiere realizar el análisis mecánico de los conductores. Para ello se han verificado diversas hipótesis de cargas de modo a establecer los esfuerzos axiales máximos bajo la acción de la temperatura y el viento.

Las hipótesis de carga o de cálculo son las de las tensiones de cada día, a 25°C, sin viento y con esfuerzos equivalentes al 20% de la resistencia de ruptura del conductor analizado; y la hipótesis de carga máxima, a 0°C, 750 Pa de presión de viento y con una resistencia máxima equivalente al 40% de la tensión de ruptura del conductor ACSR 636 MCM Grosbeak[3]. Debido a que en este estudio no se plantea un nuevo diseño de las torres, se adopta como criterio el empleo de las estructuras reticuladas autoportantes estandarizadas de ANDE. Esto impone la necesidad de uniformizar el criterio de límite de tensión máxima de todos los conductores estudiados al mismo valor del ACSR, lo que restringe las solicitaciones de trabajo, y por tanto, los vanos admisibles de los conductores termorresistentes.

Con las cargas de trabajo definidas, se obtienen las curvas de deformación de los conductores con flechas máximas, empleando tanto la ecuación de cambio de estado, como ecuaciones de transferencia de calor [4], estas últimas, de manera a estimar la temperatura máxima que alcanzarán los conductores transmitiendo una potencia de proyecto nominal de 250 MVA, temperatura ambiente de 40°C, velocidad de viento de 0,6 m/s y coeficientes de emisividad y reflectividad de 0,5.

Con los resultados del análisis anterior, se procedió a determinar la cantidad y el tipo de estructuras autoportantes, bajo especificaciones ANDE, necesarias a lo largo del recorrido de la línea, con los tres conductores analizados. Esto se resume en la tabla I.

**Tabla I: Cantidad y tipo de estructuras en la línea.**

Tipo de torre	ACSR	ACCC	GTACSR
22A+3	5	6	45
22A±0	130	122	87
22A-3	14	4	2
22C±0	12	12	12
22D±0	5	5	5
<b>Total (unidades)</b>	<b>166</b>	<b>149</b>	<b>151</b>

Puede apreciarse que, mediante el uso de los conductores ACCC 816 MCM Grosbeak en el diseño de la línea, se ha conseguido una reducción de 17 torres, es decir, el 10,2% de la cantidad de torres requeridas con el uso del conductor ACSR 636 MCM Grosbeak. Por su parte, con el

conductor GTACSR 310 mm<sup>2</sup> se tuvo un ahorro de 15 torres, equivalente al 9% de la cantidad total con el mencionado conductor tradicional.

## 2.2 Estudio económico

Con los resultados obtenidos de las alternativas del proyecto con los tres tipos de conductores analizados, se hizo una comparación de los costos anualizados de cada alternativa, de forma a determinar la más conveniente desde el punto de vista económico.

Los parámetros empleados para el análisis son: costo de la energía de 34 USD/MWh, una tasa de descuento del 9% correspondiente a la tasa mínima de retorno de la ANDE, una tasa de interés anual de financiación del 4,3%, un horizonte de proyecto de 20 años y una vida útil estimada de 35 años. Para el cálculo de las pérdidas de energía, se tuvo en cuenta la proyección de la demanda de energía en la zona a ser servida por la línea, cuyos datos han sido proveídos por el Departamento de Estudios de Transmisión de la ANDE, en tanto que los demás costos de estructuras, herrajes, conductores, entre otros, fueron proveídos por el Departamento de Proyectos Electromecánicos de la misma institución.

Adicionalmente, con el objetivo de discriminar la influencia de cada componente en el costo global, se ha hecho la siguiente subdivisión de los costos: costo de conductores, costo de suministro de equipos y materiales, costo de obras civiles, costo de montajes electromecánicos, costo de indemnizaciones y gestión ambiental, así como el costo producido por las pérdidas de energía.

En la tabla II se presenta los costos anualizados equivalentes obtenidos con cada tipo de conductor estudiado.

**Tabla II: Costo anualizado del proyecto de la línea con cada tipo de conductor estudiado**

	<b>ACSR</b>	<b>ACCC</b>	<b>GTACSR</b>
Conductores	165.700	540.784	350.982
Equipos y materiales	786.277	729.220	758.498
Obras civiles	616.881	570.465	573.121
Montajes Electromecánicos	169.058	169.205	178.075
Indemnizaciones y Gestión ambiental	118.068	118.068	118.068
Pérdidas de energía	24.147	18.705	25.923
<b>Total (USD)</b>	<b>1.880.131</b>	<b>2.146.446</b>	<b>2.004.667</b>

Del análisis de los costos anualizados se puede advertir, que el proyecto más económico es el que emplea el conductor ACSR, seguido del que utiliza el conductor GTACSR, un 7% más

costoso que el primero y por último se encuentra el proyecto con el conductor ACCC, siendo 14% más costoso que el proyecto con el conductor tradicional.

Aunque se han obtenido pequeños ahorros en los costos relacionados con la distribución de torres en los proyectos elaborados con el GTACSR y ACCC, de entre 4 a 7% respectivamente, los mismos no pudieron compensar la gran diferencia de costos de los conductores HTLS, que son entre 2 a 3 veces más costosos que el ACSR, que combinado con el importante peso que dichos costos representan en el costo global, con un mínimo del 9% para el caso del ACSR y un máximo del 25% para el caso del ACCC, dan una explicación razonable del resultado obtenido.

Con relación a los costos por pérdidas de energía, se puede observar que con el conductor ACCC se obtuvo un ahorro del 23% respecto al ACSR, en tanto que con el GTACSR se obtuvo un sobre costo del 7% con relación al ACSR. Sin embargo, las menores pérdidas de energía con el ACCC no tuvieron prácticamente influencia en el costo global, debido a que la proyección de la demanda de energía en la zona estudiada, muestra una baja carga inicial en comparación con la capacidad de la línea, observándose que diferencias apreciables de pérdidas se presentan recién en los últimos años de estudio cuando la demanda alcanza valores mayores pero ya no influyen sustancialmente en el flujo de caja descontado, lo cual hace que el costo de las pérdidas represente apenas el 1% del costo total del proyecto.

A modo de referencia, en la siguiente tabla se incluyen los costos de inversión asociados a cada alternativa.

**Tabla III: Costo de inversión inicial para cada alternativa de conductor**

ACSR	ACCC	GTACSR
8.677.380 USD	9.957.480 USD	9.257.100 USD

### 3. ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONDUCTORES ACCC Y GTACSR EN UNA LÍNEA GENÉRICA

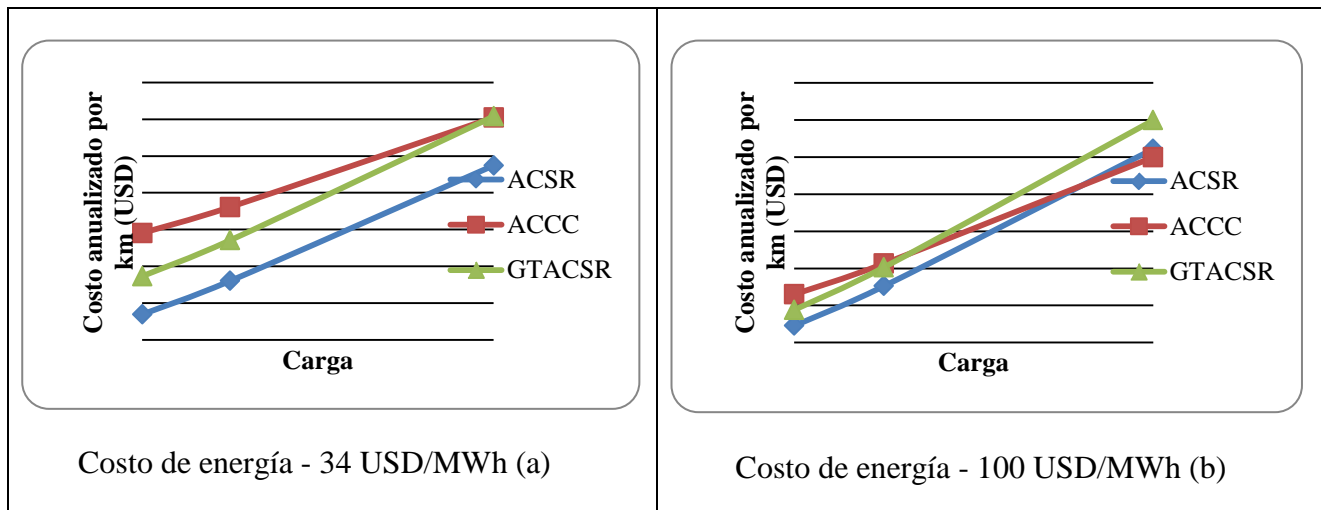
De manera a obtener conclusiones más generales, se ha realizado un análisis de una línea genérica de 220 kV, empleando como base del mismo los resultados del proyecto entre las ciudades de San Estanislao y General Aquino.

A pesar que las particulares condiciones ambientales, geológicas, topográficas y económicas que rodean al proyecto considerado, limitan la precisión de un estudio más abarcante, se cree que la extensión del análisis a partir del caso particular de la línea San Estanislao-Gral. Aquino puede resultar interesante como una primera aproximación para posteriores estudios más detallados.

En la generalización propuesta, se asumen los mismos costos anualizados por kilómetro de infraestructura del caso anterior. En cuanto a los costos anualizados por pérdidas de energía, los mismos son recalculados en base al índice de crecimiento de la demanda de energía y a los precios de la energía eléctrica a nivel de transmisión adoptados. De igual forma, se analiza el efecto de la demanda inicial al momento de la puesta en servicio de las líneas, tomándose para el efecto una carga inicial de 10%, 20% y 50% de la potencia nominal de proyecto de 250 MVA.

Los resultados del estudio de generalización son comentados a continuación.

En la Figura 3 se presenta el efecto de la carga inicial en los costos anualizados por kilómetro considerando una tasa de crecimiento anual de 7%, evaluadas para un costo de energía de 34 USD/MWh y 100 USD/MWh.



**Figura 3: Efecto de la demanda inicial en el costo anualizado por km de línea de 220 kV, considerando 7% de crecimiento de demanda y costo de la energía de 34 USD/MWh (a) y 100 USD/MWh (b)**

Como se observa en la Figura 3 (a), en condiciones similares que se presentan actualmente en el sistema interconectado paraguayo, el proyecto más económico es con el conductor tradicional ACSR, independientemente de la carga inicial. En cambio, en el caso del costo de energía de 100 USD/MWh, el conductor ACCC resulta ser atractivo para cargas iniciales superiores al 40% de la potencia de proyecto, tal como señala la Figura 3 (b).

Finalmente, cabe mencionar que estos resultados no difieren significativamente si analizamos distintas longitudes de línea.

#### 4. CONCLUSIONES

El estudio desarrollado ha analizado la posibilidad de utilizar conductores de tipo HTLS, específicamente los conductores ACCC y GTACSR, en la nueva línea de transmisión de 220 kV a ser construida entre San Estanislao y Gral. Aquino. El análisis incluyó una comparación económica con un proyecto tradicional empleando conductores ACSR, demostrándose que en las condiciones analizadas, el empleo de los conductores ACSR resulta más conveniente, teniendo en cuenta los costos relacionados con la construcción y operación de dicho tipo de líneas en Paraguay.

Si bien los altos costos de los conductores ACCC y GTACSR atentan contra su utilización, se ha encontrado que existe un potencial de ahorros en pérdidas eléctricas, así como costos de inversión por reducción del número de torres requeridas. Para el caso de las pérdidas, los bajos costos de generación del Paraguay, asociados a una generación hidroeléctrica, hacen que los ahorros en pérdidas eléctricas no sean sustanciales. Por otro lado, la adopción del diseño estándar de torres de ANDE, ha limitado la tensión de carga admisible, lo cual también limita los ahorros introducidos por la adopción de conductores del tipo HTLS. Estudios específicos más detallados deberán efectuarse de manera a analizar el efecto de un re-diseño de las estructuras con el objeto de minimizar el número de torres y con esto reducir los costos de inversión para contrarrestar el mayor costo de los conductores HTLS.

De igual forma, a partir del caso particular de la línea San Estanislao - Gral. Aquino, en el trabajo se presenta una generalización preliminar de otras líneas de transmisión nuevas en 220 kV. En general, se observa que líneas nuevas con conductores del tipo ACSR se presentan económicamente más convenientes en comparación a las líneas con conductores del tipo HTLS. Se resalta sin embargo, que los conductores HTLS, específicamente del tipo ACCC, resultarían más convenientes cuando se combinan altos costos de la energía, alrededor de 100 USD/MWh, y cargas iniciales de operación de la línea, superiores al 40% de la potencia de proyecto

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] CTC Cable Corporation. “Optimizando la Eficiencia de la Energía en Líneas Aéreas Expuestas: Una introducción a la Nueva Tecnología de los Conductores Compuestos de Fibra de Carbono y el uso de los Conductores ACCC para reducir pérdidas y aumentar el rendimiento”. [en línea] CIGRÉ, Santiago, Setiembre 2008. Disponible en web: [http://www.cigre.cl/sem\\_9\\_sept/presentaciones/Composite%20Technology%20Corporation.pdf](http://www.cigre.cl/sem_9_sept/presentaciones/Composite%20Technology%20Corporation.pdf)
- [2] M. Gustafson, J. Baylor and S. Mulnix, IEEE Transactions on Power Systems, “The equivalent hours loss factor revisited”, Volume 3, Issue 4, November 1988, Pages: 1502 - 1508
- [3] Especificaciones Técnicas de la Licitación Pública Internacional N° 624/2011 “Proyecto de interconexión en 220 kV San Estanislao-Gral. Aquino bajo la modalidad de Leasing operativo”. Administración Nacional de Electricidad-ANDE, Paraguay, 2011.
- [4] P. Labegalini, J. Labegalini, R Fuchs, M. Tadeu. *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*, 2ª Edición. Editorial Edgard Blücher Ltda, Sao Paulo, Brasil, 1992.
- [5] J-Power Systems Corp. Catálogo de los conductores GTACSR y GZTACSR [en línea] Disponible en web: [http://www.jpowers.co.jp/english/product/pdf/gap\\_c1.pdf](http://www.jpowers.co.jp/english/product/pdf/gap_c1.pdf)
- [6] Midal Cable. Catálogo de conductores ACCC [en línea] Disponible en web: <http://www.midalcable.com/DataSheets/ACCCMidalData%28Eng%29.pdf>