



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

EVALUACION QUINQUENAL POR DESCARGA ATMOSFERICA EN LA LINEA DE SUB TRANSMISION ELECTRICA ITAKYRY – CURUGUATY DE LA ANDE

Autores: Ing Hugo Acosta -Ing Roberto Pérez - Ing Raul Coronel

Administración Nacional de Electricidad

Paraguay

RESUMEN

En este informe se describe el análisis a que es sometida la Línea de Sub. Transmisión Eléctrica Itakyry – Curuguaty de 66 kV de la ANDE, ante los progresivos deterioros que venían sucediendo en la calidad del servicio eléctrico y que se acentuaban con fuera de servicios en días de lluvias debidas principalmente a descargas atmosféricas. También se examina el comportamiento, las averías y las soluciones dadas a distintos eventos con sus resultados en el tiempo.

El trabajo tiene un enfoque netamente práctico con sus soluciones, aunque fueron tomadas a partir de fases teóricas, en los cuales se analizaron el porqué del deterioro progresivo del terreno en gran parte de la línea, las medidas adoptadas en las torres para los SPAT y la búsqueda de otro material sustituto al de cobre para los mejoramientos del sistema de puesta a tierra, con el fin de desalentar la escalada de hurtos debidas al valor comercial de compra de este material(Cu), que dejó al 90% del tendido eléctrico sin la debida protección ante las descargas atmosféricas.

PALABRAS CLAVE

Puesta a tierra, jabalinas, cobre, hierro galvanizado, RPAT, descarga atmosférica

1. INTRODUCCION

En este trabajo se aborda uno de los componentes más conflictivos del sistema eléctrico, cual es Líneas de Transmisión, ya que éste tiene su propia característica y su propia complejidad por estar las Líneas sometidas a factores climáticos y ambientales que se escapan a un determinado control y que no responden a un patrón común como otras actividades de mantenimiento.

Dado que en los últimos años la expansión de los sistemas de transporte en alta tensión fueron muy lentas, en donde no se ha acompañado el crecimiento de la demanda, el gran desafío está en gestionar, no solamente un buen mantenimiento en vistas de mejorar la calidad del servicio, sino que también estudiar nuevas acciones complementarias que acompañen las estrategias de mantenimiento, tratando de minimizar los factores variables climatológicos y ambientales para mantener el servicio en estado óptimo. En los departamentos de mantenimientos de la ANDE estas acciones complementarias fueron creados a partir de estudiar los equipos en su contexto real operativo, recoger información de los deterioros ocurridos, analizar los tipos de daños y tratar de determinar las causas, para finalmente, establecer lo que se debe hacer para minimizar las fallas, ya que cada día son mayores las limitaciones que se tienen para disponer de los equipos.

El principal objetivo de este trabajo es demostrar entonces que no solamente es importante los cronogramas de mantenimientos en su fase operativa sino que también lo es el trabajo de gabinete, el cual es la fase de análisis, de donde surgen las soluciones más pertinentes y eficaces, mostrando cuáles han sido los principales lineamientos seguidos de modo tal a llegar a las soluciones descritas.

2. LINEA TRONCAL DE 92 KM

Las localidades de Ytakyry y Curuguayat están servidos por una línea con nivel de tensión de 66 kV, con una longitud total de 92 km, soportados por 436 estructuras ⁽¹⁾ tipo S1, S2, AA y AR, mostrados en las figuras 1.1 y 1.2. En las tablas I y II se consignan los datos de los conductores de fase ⁽²⁾ y del hilo ⁽³⁾ de guardia.

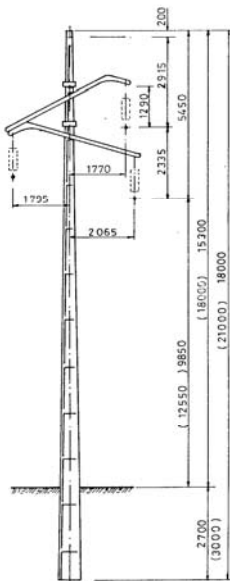


Fig. 1.1
Estructura tipo S1 (21 m) tipo S2 (18)

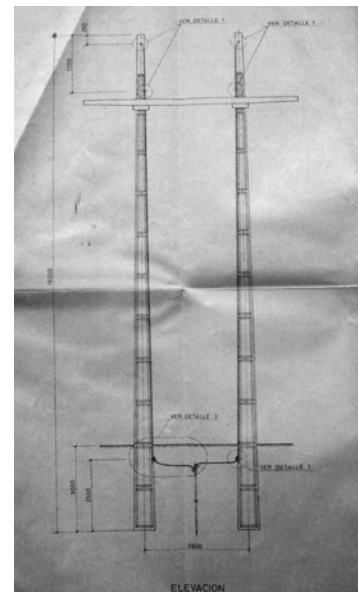


Fig. 1.2
Estructura AA

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Tabla I – Datos conductores de fases – tipo ACSR

Denominación	MCM	Formación	Sección Al (mm ²)	Sección total (mm ²)	Peso (kg/km)	Resistencia (Ω/km)		Capacidad (Amp)
						DC 20 °C	AC 75 °C	
Ostrich	300	26/7	152,01	176,74	614,4	0,186	0,227	492

Tabla II – Datos hilo de guardia – acero galvanizado

Diámetro nominal	Formación	Peso (kg/km)	Carga de ruptura (kg)	Resistencia (Ω/km)
3/8"	7	406	4899	3,02

3. DETALLES DE LA PUESTA A TIERRA

Estos tipos de torres tienen los conductores de bajada de puesta a tierra dentro de su estructura, y están hechos con conductores de cobre de 25 mm². Luego, para unir con los hilos de guardia se emplean tuercas y bulones, tal como se muestran en las figuras ⁽¹⁾ 2.1 y 2.2.

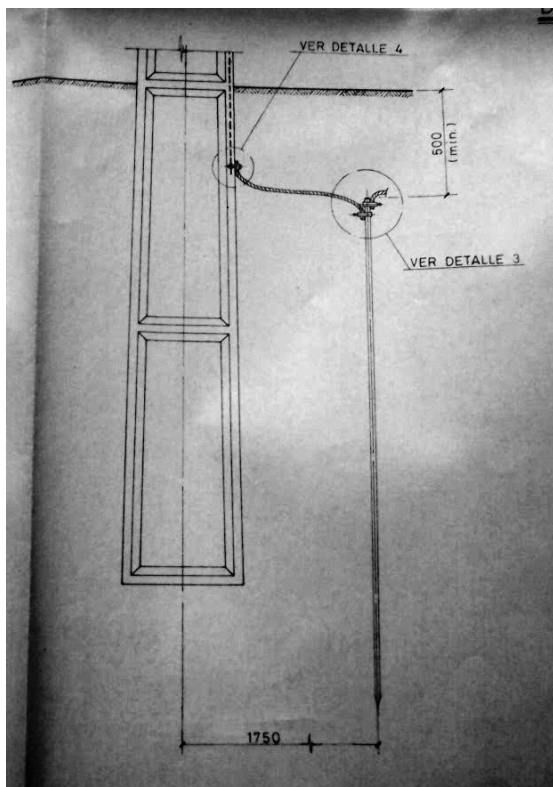


Fig. 2.1
Detalle PAT de las estructuras

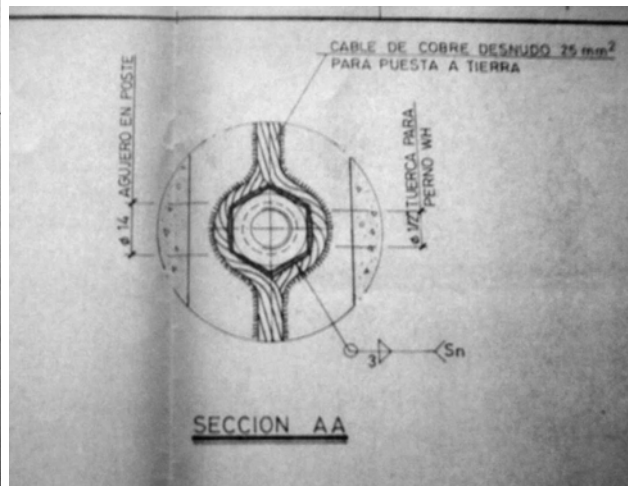


Fig. 2.2
Tuerca envuelto por conductor

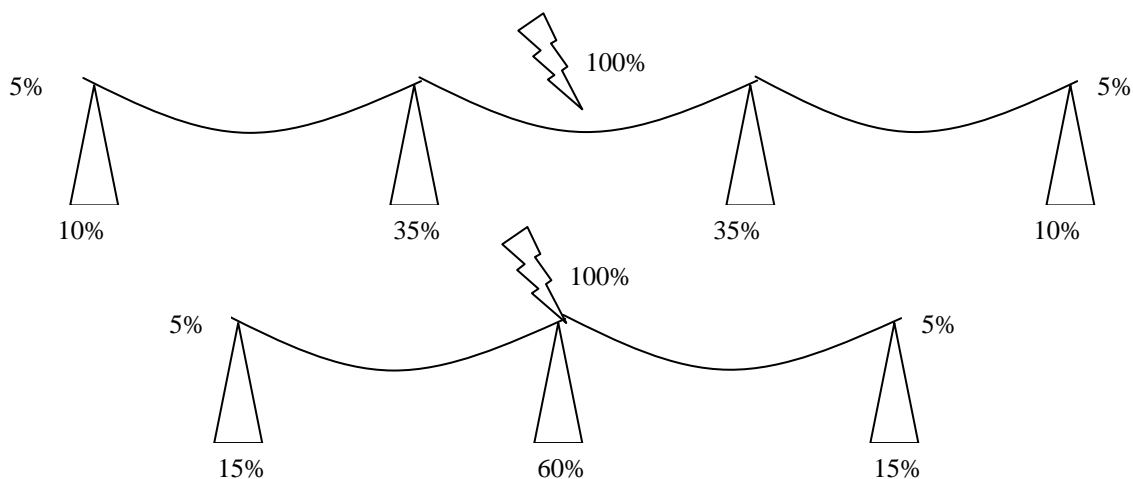
RECORRIENDO LA LINEA

La línea en su longitud recorre terrenos con distintas topologías, terrenos con suelos duros y secos y/o suelos húmedos, fangosos, terrenos con escasa vegetación, pasturas o pequeños bosques que mantiene la humedad, etc. Anualmente se miden las RPAT de las torres que componen la línea, llevándose un

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

registro de las mismas, como también se llevan registros de las interrupciones y de los deterioros de las cadenas de aisladores. En este punto sucede un hecho curioso: en las estructuras con mejores índices de RPAT ocurrían más roturas de aisladores.

Esto se explica de la siguiente manera: bien sabido es que la distribución de la corriente durante la incidencia de una descarga atmosférica sobre el hilo de guardia en las líneas de transmisión se da, teóricamente, de la manera esquemática siguiente, con incidencia en un vano o sobre la torre misma.



En cualquiera de los casos, la alta corriente siempre va a buscar un camino más fácil para descargar. Las torres con altas resistencias en sus puestas a tierra son como circuitos abiertos y los que poseen bajas resistencias es como si estuvieran en corto (una manera de expresar), ocurriendo una mayor incidencia de descarga en esos puntos. Esto se ve agravado por el hecho de que las torres sólo poseen jabalinas para drenar las altas corrientes, accesorio que no posee gran poder de disipación de la energía generada durante una descarga.

4. BUSCANDO LA SOLUCION

Evidentemente la solución se tenía que dar con el mejoramiento de los SPAT. Se analiza y estudia la zona en el cual ocurren más eventos de roturas y cambios de aisladores, las zonas marcadas por los relés en un fuera de servicio, etc. Con la ayuda del registro del perfil de las RPAT se opta por mejorar las zonas de las estructuras que poseen valores de resistencias altas como también mejorar las RPAT de las diez primeras torres de “llegada” y “salida” de las estaciones, de modo tal a proteger los diferentes equipos de potencia que se encuentran dentro de ellas.

Para el mejoramiento se deben introducir contrapesos en las estructuras. Ahí surge un inconveniente: los conductores de cobre en la actualidad son muy “cotizados” y susceptibles al robo, entonces, cuál material utilizar para los contrapesos? Se debe buscar un metal sustituto para el cobre. En los depósitos de almacenes de la empresa se tienen unas pletinas de hierro galvanizado en una buena cantidad, pero la pregunta era: ¿será conveniente utilizar este metal como sustituto?.

5. REALIZANDO COMPARACIONES

El cobre es el metal más utilizado como conductores de las mallas de PAT porque se tiene conocimiento acabado de sus características técnicas, como su conductibilidad superior comparado con otro metal, es poco atacado por la salinidad del suelo, hecho que lo hace libre de corrosión subterránea.



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Estas razones, más la falta de experiencia de utilizar otro tipo de metal en las PAT, la indisponibilidad de cualquier guía a seguir, el miedo a la corrosión, como así mismo información muy limitada proporcionada por la Norma IEEE para un sistema conectando a tierra con otros materiales que no sea cobre hacen difícil una buena y libre elección.

Pero, en el conocimiento de algunos ensayos efectuados en EE.UU al acero, de manera tal a sustituir el uso del cobre en los SPAT, detallan después de estudios y ensayos, que las claves de sus características técnicas más relevantes son:

- 1 Que el acero absorbe aproximadamente 1,36 veces el calor con un volumen igual de cobre antes de fundirse (considerando el peso específico, el calor específico y la temperatura de fundición).
- 2 Que el acero posee más alto nivel de temperatura de fusión, ya que puede resistir 1510 °C antes de fundirse (comparados con 1083 °C de la del cobre).
- 3 Se requiere aproximadamente 5,6 veces (proporción de resistividad = ρ_{Cu} / ρ_{Fe}) de la cantidad del acero para lograr la misma resistencia del cobre.
- 4 El acero es aproximadamente dos veces fuerte mecánicamente comparado con el cobre para la misma área transversal.

Por lo expuesto se nota que las características mecánicas del acero lo hacen apto para la sustitución, pero surge la duda respecto a la corrosión, si el material resistirá la acción de las sales en el suelo.

Una relación matemática es obtenida por la Oficina Nacional de Normas (National Bureau of Standards) para el cálculo de la proporción de corrosión de acero (Bessemer Steel). Estos datos son productos de los experimentos reales en 44 diferentes suelos o tierras, observados por un periodo de más de 12 años. Ellos establecieron que ninguno de los factores están presentes individualmente en cualquier suelo, entonces una ecuación general donde se incluyen los efectos de todos los factores anteriores es proporcionado por la siguiente fórmula.

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$$

Donde,

- Y = proporción de corrosión (mils/año)
- X₁ = resistividad del suelo(ohm-cm)
- X₂ = el valor del pH
- X₃ = la humedad (%)
- X₄ = la aireación (%)

Haciendo un simple análisis de regresión múltiple, la siguiente ecuación ⁽⁴⁾ experimental es obtenida para la estimación de corrosión del acero en cualquier ambiente

$$Y = 3,36 - 9,63(10^{-5})(X_1) + 0,29(X_2) + 0,034(X_3) + 0,012(X_4) \quad (1)$$

6. EJEMPLIFICANDO LO EXPUESTO

Considerando como ejemplo los siguientes parámetros para el uso del acero como sustituto del cobre.

- Características del suelo
 - X₁ (resistividad) = 2.500 ohm-cm,
 - X₂ (valor del pH) = 7
 - X₃ (humedad) = 30%,
 - X₄ (aeración) = 15%
- Presencia de corriente de falla a tierra = 20.000 A
- Duración de la falla = 1.0 segundo

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Considerando que no existe corrosión

Siguiendo las pautas designadas por la Norma IEEE No. 80-2000, el tamaño del conductor de acero puede ser calculado (sin tener en cuenta cualquier efecto de corrosión) mediante las fórmulas ⁽⁵⁾ simplificadas siguientes:

$$A_{kcmil} = I \cdot K_f \cdot \sqrt{t_c} \quad (2)$$

$$A_{mm^2} = \frac{I \cdot K_f \cdot \sqrt{t_c}}{1.974} \quad (3)$$

Donde,

A_{kcmil}	= área de conductor en kcmil
A_{mm^2}	= área de conductor en mm^2
I	= RMS (simétrico) corriente de falla en kA
t_c	= duración de la falla en segundos
K_f	= constante del material
T_m	= temperatura de fusión en °C

Los valores ⁽⁵⁾ de la constante “ K_f ” calculadas a 40°C de temperatura ambiente (T_a) son:
7,00 para el cobre ($T_m = 1083$ °C) y 15,95 para el acero ($T_m = 1510$ °C).

Realizando cálculos se obtiene:

$$\text{Área del conductor de acero} = 161,6 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área del conductor de cobre: } 70,92 \text{ mm}^2$$

$$\text{La proporción real del área del acero sobre el conductor de cobre} = 161,6 / 70,92 = 2,28$$

Incluyendo la corrosión:

La proporción de corrosión se calcula mediante la ecuación (1) dada y es la siguiente:

$$Y = 3,36 - 9,63 (10^{-5}) (2.500) + 0,29 (7) + 0,034 (30) + 0,0121 (15) = 6,35 \text{ mils/año}$$

Asumiendo, que el promedio de vida del conductor conectado a tierra es de 25 años (la proporción de corrosión se reduce a la mitad durante el segundo 12 años), con un factor de seguridad de 1,5, la pérdida de corrosión total está dado por:

$$Y = (12) (1,5) (6,35) (1,5) = 171,47 \text{ mils} = 0.436 \text{ centímetros}$$

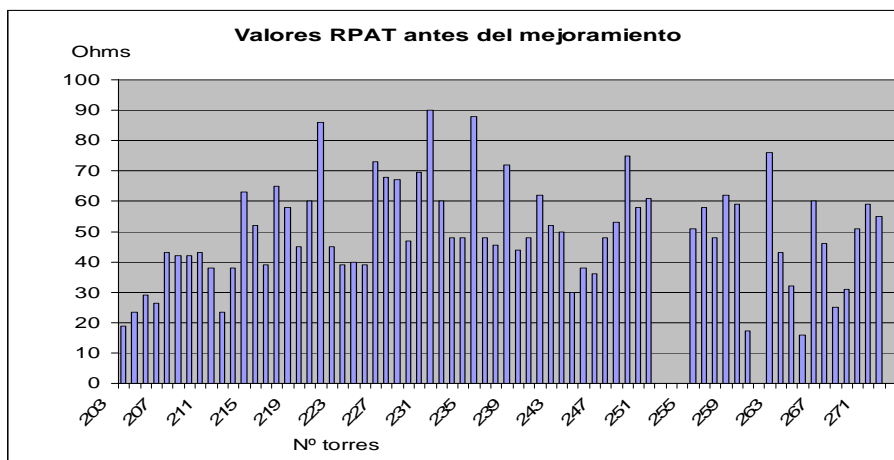
Entonces, para compensar la pérdida de corrosión, el tamaño del radio del conductor debe ser aumentado en 0,436 cm.

7. ESCOGIENDO PUNTOS PARA EL MEJORAMIENTO

Quedando establecido el uso de las pletinas como sustituto del cobre para el mejoramiento del SPAT se establecen cuáles son las torres que presentan puntos críticos para el sistema. Para ello se hecha mano a las estadísticas que se poseen, como ser en qué lugares ocurren más roturas de discos aislantes, cuál es la zona que marcan los instrumentos en un fuera de servicio, etc. Se revisan además los bancos de datos de las mediciones de RPAT realizadas en pie de torre.

Se decide realizar los mejoramientos en tres zonas: diez primeras torres hasta el pórtico de cada estación y la zona del medio de la línea. El perfil de la zona media se muestra en el siguiente gráfico. ⁽⁶⁾

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008



Estas torres ocupan una extensión aproximada de 15 km y son de muy difícil acceso. Se escogen las torres n°s 221, 231, 235, 241, 249, 262 y 270 para el mejoramiento de sus respectivas PAT.

A modo de que la solución arrimada sea efectiva se crea un pequeño software para el cálculo de los contrapesos a introducir, basados en la Norma IEEE 80 en los que respecta a la resistividad de las capas de suelo, cantidad de material a utilizar, etc.

8. TRABAJANDO EN EL TERRENO

En una primera etapa se miden las resistividades de los suelos en donde están asentadas las torres, utilizando para ello el método Wenner.

Teniendo en cuenta los valores de resistividades se encara la segunda etapa, que consiste en el mejoramiento en sí. Se miden las RÂT antes del mejoramiento y se prueba la continuidad del hilo de guardia con la puesta a tierra.

Según cálculos realizados, a cada torre se colocan contrapesos de pletinas de 24 o 36 metros, enterrados a una profundidad de 60 cm, con la colocación de jabalinas en los extremos. Para los empalmes entre la jabalina existente y/o las jabalinas nuevas colocadas y las pletinas se utilizan conectores de Cu, prensados con una presión de 60 Tn. Por otro lado, los empalmes entre pletinas se realizan, primeramente mediante bulones y tuercas y luego posteriormente son soldados unos con otros, que luego son aislados pasándole una capa de pintura antioxidante que le servirá de protección.

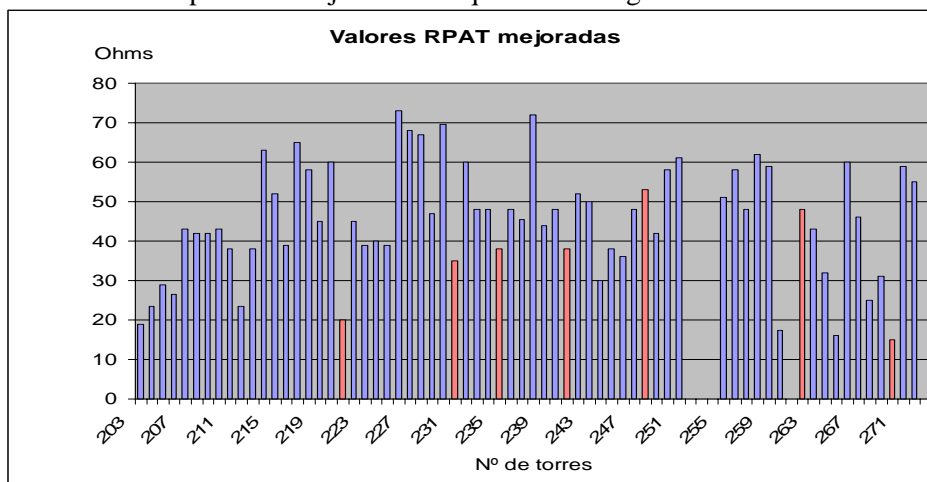
Como se sabe la buena compactación del terreno ayuda a mejora la resistencia del suelo, el relleno de la zanja es hecho en capas de aproximadamente 20 cm de espesor, que luego son apisonados. Completado el relleno, la última compactación se realiza utilizando el peso de las camionetas, que son pasadas por encima de las zanjas recién rellenas.

Posteriormente se mide la RPAT de las torres mejoradas, con una aclaración importante del porqué los valores de los mejoramientos no llegan a los valores exigidos por las normas. Como ya se ha explicado anteriormente las corrientes de altas frecuencias generadas durante una descarga atmosférica son distribuidas entre las distintas PAT de las torres que componen el entorno. Entonces, para que la distribución de las ondas de corrientes sean más o menos iguales y que las PAT de las torres que componen el entorno tengan la misma capacidad de disipación de energía es que se opta por bajar (peluquear) los valores dentro del nivel en que se encuentran las resistencias de las otras torres, evitando así las sobrecargas innecesarias a las cadenas de aisladores de las LT's.



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

El perfil de la RPAT ⁽⁶⁾ después del mejoramiento quedo de la siguiente manera:



9. CONCLUSIONES

Este trabajo, encarado por los distintos Departamentos de Mantenimiento de la ANDE en el marco de los mantenimientos preventivos, y a partir de los resultados prácticos obtenidos permite concluir que muy bien puede ser utilizado las pletinas de hierro galvanizado en los SPAT en sustitución del cobre. Pero, como todo ensayo, estas medidas adoptadas deben seguir siendo monitoreadas a través del tiempo, ya que no se poseen registros de estadísticas del deterioro de éstos metales en los distintos suelos que componen nuestra geografía.

En lo referente a los fueros de servicios de la línea ocurridas por inclemencias del tiempo, se nota perfectamente que en estos últimos meses la línea en estudio no ha sufrido muchos fueros de salida del sistema, situación puesta a prueba por las últimas fuertes tormentas ocurridas en la zona. Este hecho puntual brinda seguridad y confianza para encarar trabajos futuros, buscando siempre garantizar un desempeño apropiado de las LT's dentro del SIN.

Finalmente se demostró la importancia del trabajo en equipo, observándose que se pueden obtener muy buenos resultados cuando todos aportan sus conocimientos y habilidades.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Planos ANDE
- [2] FURUKAWA Industrial S.A. (catálogo de productos, pág. 6)
- [3] SURAL SRL (rod, wire and cable, catálogo de productos, pág. 90)
- [4] Manohar, N. N. and Nagar, R. P., "Design of Steel Earthing Grids in India", IEEE transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, N° 6, nov/dec 1979.
- [5] IEEE 80-2000 (Guide for Safety in AC Substation Grounding)
- [6] Banco de datos DMA/LT2 – ANDE (Mediciones RPAT LT 66 kV IRY – CUR, año 2005)