



VII/CE B2-01

DIAGNOSTICO DE LA AGRESIVIDAD DEL SUELO DE LOS PIES DE TORRES DE LA LINEA DE TRANSMISION EN 220 kV, ACARAY- OVIEDO

Eduardo Velázquez Castillo, M. Sc. Ing.⁽¹⁾, João Carlos Sihvenger, Lic.⁽¹⁾, José Maurílio da Silva, Dr. Ing.⁽²⁾, Raúl Coronel, Ing.⁽³⁾, Oscar Naoki Shinya, AIC.⁽⁴⁾, Mayara Bidin Stecanella, AIC⁽⁵⁾ Nora Díaz Mora, Dra. Ing.⁽⁵⁾

(1) ITAIPU BINACIONAL - Paraguay, (2) LACTEC – Curitiba - Brasil, (3) ANDE – CDE - Paraguay, (4) Univerdidad Católica Nuestra Señora de la Asunción - Hernandarias – Paraguay, (5) UNIOESTE/PTI - Foz do Iguacu – Brasil.

RESUMEN

Con el creciente aumento de la demanda de energía por parte del mercado paraguayo, la disponibilidad y confiabilidad en todas las etapas, adquiere cada vez más importancia, especialmente en el sistema de transporte de energía. En las líneas de transmisión de alta tensión, diversos problemas de deterioración de materiales, por efecto del medio ambiente son observados. Entre esos problemas se destacan aquellos causados por corrosión de pies de torres, oxidación de los herrajes de las estructuras y oxidación de las interfaces metálicas de los aisladores más próximos a los conductores. También se han observado problemas causados por fatiga de espaciadores y amortiguadores, instalados en los conductores, así como desgaste del conjunto de herrajes de los aisladores. Todos estos factores guardan relación directa con la extensión de vida útil de las líneas de transmisión en Alta Tensión. En diversos estudios publicados, fue establecido que la corrosión en los pies de las torres no encapsuladas es uno de los principales problemas de las líneas de transmisión. La corrosión, en este caso, está relacionada directamente con la agresividad del suelo, debido a la presencia de iones que pueden propiciar la formación de un gradiente de concentración iónico. En este trabajo, es presentado un levantamiento de los problemas de corrosión y un estudio cuantitativo, del nivel de corrosividad del suelo proveniente de la región de afloramiento de los pies de algunas torres de la Línea de Transmisión en 220kV Acaray–Oviedo (circuito 1), de la Administración Nacional de Electricidad – ANDE del Paraguay.

Palabras-clave: Línea de Transmisión, Extensión de Vida Útil, Corrosión, Pies de Torres.

1 INTRODUCCIÓN

La continuidad del suministro de energía eléctrica depende grandemente de la confiabilidad de las Líneas de Transmisión de Alta Tensión y ésta depende del desempeño de los materiales que las componen. Por lo tanto, es necesario mejorar y/o aumentar el control de los factores relacionados con el envejecimiento de las líneas, siendo la corrosión de los materiales una de las principales causas de la fragilización de la estructura, influenciada por factores tales como la temperatura, humedad relativa del aire, la velocidad de los vientos, la radiación solar, intensidad de las lluvias y otros.

Con la fragilización de la estructura, aumenta la posibilidad de la caída de una torre de línea de transmisión y esta falla, casi siempre viene acompañada del denominado efecto dominó, o sea, la caída de varias torres causada por la primera. Este hecho trae como consecuencia directa, considerables pérdidas económicas por el cese en el suministro de energía y el dispendio de recursos en el periodo, generalmente grande, que lleva la reconstitución del sistema. Cabe destacar que, un colapso de esta naturaleza en el Sistema Eléctrico Paraguayo debe constituirse en una advertencia de que sucesivos casos podrían ocurrir.

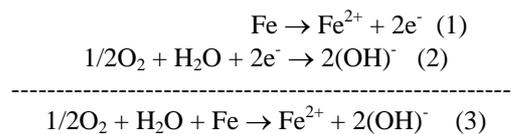
En una inspección visual de algunas torres de la Línea de Transmisión en 220kV Acaray–Oviedo (circuito 1), de la ANDE, fueron observados casos de corrosión en los de pies de torres y oxidación en diversas partes de las estructuras. Sin embargo, ya que estas torres son construidas de acero galvanizado y están instaladas en ambiente

constituido predominantemente de atmósfera rural, serían esperadas tasas de corrosión en torno de 1,1 $\mu\text{m}/\text{año}$, como citado por GENTIL [1]. Se verifica que actualmente, esa corrosión es apenas registrada como un detalle de la inspección y amerita por tanto, realizar una investigación sistemática con el objetivo de determinar las causas, las formas y los mecanismos de corrosión de estas estructuras, con el principal objetivo de proponer acciones correctivas que podrían de alguna manera, ayudar a minimizar este impacto. En este trabajo son relatados casos de corrosión metálica en las estructuras a partir de registro fotográfico y son descritos ensayos físicos y químicos realizados en muestras de tierra colectadas en los pies de algunas torres de la línea de transmisión en estudio, para determinar el nivel de agresividad del suelo.

2 Fundamentos teóricos

Es sabido que todos los metales, con excepción de los metales nobles (oro, plata y platino), en contacto con el medio ambiente sufren reacciones, transformándose en óxidos, hidróxidos y otras formas semejantes, de tal forma que esta transformación implique en una gran reducción de la energía libre y por tanto lleve al material a un estado termodinámico más estable. Los fundamentos teóricos presentados aquí pueden ser ampliados por la consulta de literaturas específicas [1-4].

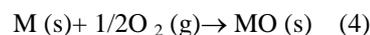
Los metales se deterioran por causa de procesos electroquímicos y con esto se fragilizan y pierden las propiedades y características con las que fueron proyectados. Una forma común de ataque electroquímico es la corrosión acuosa; por este mecanismo los átomos del metal se disuelven como iones, que viene acompañado de un cambio de concentración del medio. Como consecuencia de éste cambio químico es formada una región anódica que se corroe, o sea, pérdida de material por disolución propiciando la formación de corriente eléctrica. Así por ejemplo, la corrosión del hierro en agua que contiene oxígeno disuelto puede ser representado por un proceso que ocurre en dos etapas:



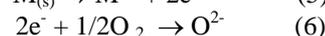
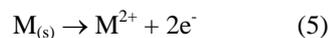
Donde el producto es el $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (hidróxido ferroso o hidróxido de hierro II) que en medio aeróbico, se transforma en Fe_3O_4 de color negro verdoso.

Además de la corrosión electroquímica en soluciones acuosas de electrolito, existe la oxidación de metales y aleaciones en atmósfera gaseosa (aire) la que es conocida como corrosión seca. Cuando no existe diferencia de concentración y par galvánico, ésta corrosión sucede por reducción gaseosa, estableciéndose una región catódica. El mecanismo consiste en una reacción química directa del metal con el oxígeno (O_2) atmosférico, como consecuencia se forma una película de óxido, que si es firme, protege la superficie del metal de otros ataques ambientales más serios, pero si es porosa se rompe. No obstante, el oxígeno no es el único responsable por el ataque químico ya que el nitrógeno y el azufre presentes en la lluvia ácida, también contribuyen.

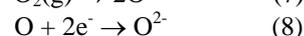
Así como en el caso de la corrosión acuosa, la formación de una película de óxido es también un proceso electroquímico:



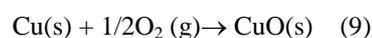
Esta reacción consiste en dos semi-reacciones que ocurren en la interfase metal-atmósfera (gas).



Inicialmente el O_2 molecular es absorbido por la superficie metálica en la cual se disocia según:



Esos electrones resultan de la formación de los iones metálicos M^{2+} . Como ejemplo puede ser citado el caso de la oxidación del Cobre:



La velocidad de crecimiento de la película de óxido dependen de su naturaleza y la del metal, así como de la temperatura. Siendo que a temperaturas normales, el crecimiento cesa antes que la película alcance 1nm.

Las torres de líneas de transmisión normalmente son galvanizadas y están sujetas a la agresividad de dos ambientes totalmente diferentes, uno de ellos es externo, constituido por la atmósfera y otro el suelo. La mayor parte de la corrosión atmosférica opera lentamente, de forma que toda la superficie metálica funciona como cátodo y ánodo al mismo tiempo.

En el caso del suelo, la presencia de iones (Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Al^{3+} y otros) puede proporcionar la formación de un gradiente iónico a lo largo de las fundaciones, haciendo con que las regiones mas ricas en sales se tornen anódicas y con el paso del tiempo, pueden corroer totalmente las fundaciones. Suelos arenosos con baja humedad serian considerados poco agresivos, al paso que, suelos agrícolas y para pasto, en principio serian considerados corrosivos.

La agresividad del suelo está íntimamente ligada a las propiedades locales del mismo, tales como: resistividad eléctrica, tenor de humedad, acidez o alcalinidad, permeabilidad, presencia de sales solubles, microorganismos y otras. Estos factores actúan conjuntamente y por ese motivo la corrosión de estructuras enterradas se constituye en una gran preocupación del sector eléctrico por los daños que puede causar y por las dificultades de realizar una inspección minuciosa.

3 MATERIAIS Y MÉTODOS

3.1 LA LÍNEA ACARAY-OVIEDO

La Línea de Transmisión en 220kV Acaray–Oviedo, que integra el sistema interconectado nacional del Paraguay, constituye un trecho de la línea Acaray-San Lorenzo con una extensión de 305 km, que consta de un total de 680 torres de suspensión y 43 torres de amarre.

Esta línea entró en operación en diciembre de 1988 y actualmente transporta una gran parte de la energía suministrada por la Itaipu Binacional, lo que torna de vital importancia mantener y/o mejorar la disponibilidad, controlando los parámetros que influyen en la confiabilidad y consecuente vida útil de las instalaciones.

La caracterización física y química del suelo de la región de afloramiento de los pies de las torres fue realizada con base a estudio preliminar del suelo de la región de Foz do Iguaçu y Ciudad del Este realizado en el LAMAT-Laboratorio de Materiales de la UNIOESTE Campus de Foz do Iguaçu [5].

3.2 ANALISIS FISICO QUIMICOS

Inicialmente fue realizado un levantamiento de los puntos de corrosión en los herrajes de las estructuras y de los pies de torres de la línea en estudio, tomando cuidado de registrar el ambiente en el cual las mismas están instaladas. El análisis físico químico fue iniciado con la colecta de muestras del suelo de los pies de torres números: 478, 480, 500, 520, 550, 570, 589, 606, 629, 648, 668, 682, 783, 788, 798 y 806. Con esas muestras fueron realizados ensayos de resistividad del suelo en función de la humedad, pH, capacidad de retención de agua, preparación de extracto acuoso y determinación de sales disueltos en el extracto acuoso.

3.2.1 ENSAYOS DE RESISTIVIDAD Y RETENCIÓN DE AGUA

Para la determinación de la resistividad del suelo en función de la humedad, la muestra es secada en estufa por 12 horas y posteriormente molida. Fue medido el valor de la resistividad en una caja entre dos placas laterales de cobre usando dos multímetros de alta impedancia y una fuente de corriente alterna (Vcc). Se adicionó agua destilada a la muestra, en la proporción de 5% en volumen, en relación al volumen del suelo seco y se midió nuevamente la resistividad. Se efectuaron adiciones sucesivas de agua destilada a la muestra con incrementos de 5% y 10% midiéndose siempre los valores de la resistividad para cada tenor de agua. Simultáneamente fue medida humedad del suelo.

El ensayo de retención de agua, realizado siguiendo las orientaciones de la norma ASTM D 2017, consiste en determinar cual es la capacidad del suelo de retener agua, siendo el resultado expresado en porcentaje. El procedimiento para la realización de éste ensayo, consiste en colocar una muestra del suelo, previamente seca y colada en un embudo de “buchner” de aproximadamente 5cm de profundidad y 2,5cm de diámetro, se cubre con un papel filtro y se llena con una cantidad de la muestra mas allá de su capacidad. Se adiciona agua a un vaso de precipitado hasta una altura ligeramente superior a la del papel filtro y se espera a que la muestra quede húmeda por capilaridad. Cuando la parte superior de la muestra presente señales de humedad, se adiciona mas agua hasta que su nivel se aproxime del tope del embudo. Ahora se cubre el vaso dejando la muestra humedecida en reposo por 12 horas para lo cual se cubre el embudo con paño húmedo sobre el cual se pone un vidrio de reloj para que la muestra quede herméticamente cerrada. Se coloca entonces el embudo cubierto en un frasco de succión que se conecta a una bomba

de vacío que opera a 200 mmHg durante 15 minutos. Después se remueve el embudo del frasco, transfiriendo la muestra para un recipiente previamente pesado. Este recipiente con el suelo vuelve para la estufa por 5 horas y solo después de este periodo es determinada la humedad en porcentaje.

3.2.2 ENSAYOS QUÍMICOS

Los ensayos químicos permitieron la determinación del tenor de sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y cloratos, así como los valores de pH y acidez total de las muestras. Para la realización de los ensayos químicos, es necesaria la obtención del extracto acuoso y del extracto de clorato de potasio, KCl. El procedimiento consiste en diluir muestra de suelo (pronta para análisis) en agua y KCl respectivamente.

Para la preparación del extracto acuoso, el suelo es molido finamente en un mortero y secado en estufa a 40°C por 1 hora. En un vaso graduado de 100ml, se agregan 25ml de agua destilada y 10g de la tierra fina y seca; esta mezcla se agita por 10min con agitador magnético y se deja en reposo por 30min. Posteriormente la mezcla se agita nuevamente por 5min. Para la preparación del extracto de KCl, los procedimientos son los mismos y apenas se sustituye el agua por KCl 1N. Después las soluciones se dejan decantando por 12 horas.

Todos los ensayos que utilizan los extractos son hechos en duplicata. Se sabe que el suelo contiene una gran cantidad de compuestos, pero la mayoría son insolubles y no influyen en la corrosión de metales y por eso son considerados inertes. Los compuestos solubles, sin embargo, son los responsables por la corrosividad del suelo, y entre ellos, se destacan las sales disueltas tales como carbonatos, bicarbonatos, cloratos y sulfatos. Bicarbonatos y carbonatos son determinados por método volumétrico con titulación por ácido sulfúrico (H_2SO_4 , 0,025N). El clorato se determina por titulación con nitrato de plata ($AgNO_3$ 0,05N) y el sulfato por titulación con solución de clorato de bario al 10%.

La obtención del potencial redox consiste en la determinación del potencial de oxidación-reducción del electrodo de platina enterrado en el suelo, medido en relación a un electrodo de referencia (el electrodo de referencia utilizado es el de $Cu/CuSO_4$ saturado).

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

En las figuras 1 y 2 son presentadas imágenes tomadas de parte de la estructura aérea de las torres nro. 648 y 629. En las figuras 3 y 4 son presentadas imágenes de los pies de torres nro. 570 y 629, respectivamente.

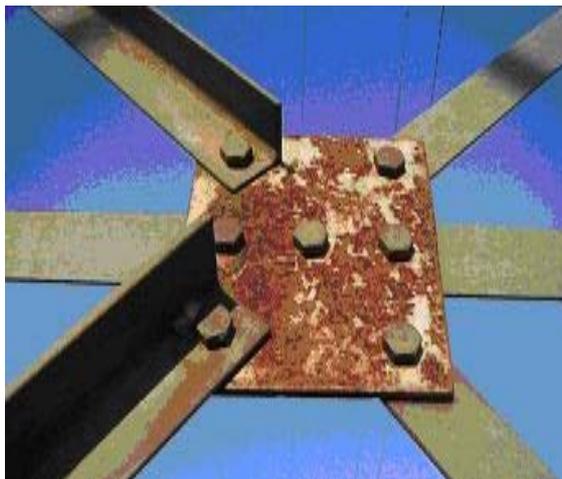


Figura 1: Evidencias de corrosión en la estructura de la torre nro. 648 de la Línea de Transmisión Acaray-Oviedo.



Figura 2: Evidencias de corrosión en la estructura de la torre nro. 629 de la Línea de Transmisión Acaray-Oviedo



Figura 3: Evidencias de corrosión en los pies de la torre nro. 570 de la Línea de Transmisión Acaray-Oviedo.



Figura 4: Evidencias de corrosión en los pies de la torre nro. 629 de la Línea de Transmisión Acaray-Oviedo.

De la observación de esas figuras es posible levantar algunas hipótesis sobre las causas de la corrosión. La torre nro. 648 (Figura 1) está instalada en una región agroindustrial. Es posible que en este caso la intensa corrosión observada sea resultado de la atmósfera industrial en que la torre está instalada. En ese tipo de atmósferas están presentes efluentes gaseosos (como el SO_2) y partículas de polvo que son captadas por la humedad formando sustancias ácidas que se depositan en las superficies expuestas propiciando posiblemente células de aeración diferencial.

No se puede descartar también un posible mecanismo de oxidación sobre el hierro (mas propiamente dicho sobre el acero, una vez perdida la protección con Zinc) ya que la película de óxido que se forma en este metal es porosa y no protege de futuros ataques del medio. Por otro lado la torre nro. 629 (Figura 4) que está instalada en las proximidades de una plantación de maíz, muestra francas evidencias de corrosión tanto en la estructura como en los pies de la misma.

Estudios deben ser realizados para confirmar la influencia que el uso de defensivos agrícolas pueda tener en este proceso corrosivo. Almeida y Siquiera [6], relataron estudios de corrosión de cables de aluminio por la acción de iones de cobre resultantes del uso de defensivos agrícolas. La figura 3 presenta claras evidencias de proceso corrosivo en los pies de la torre nro. 570. Esta torre está instalada en una región de pastos y debe ser estudiada la influencia de nutrientes en ese tipo de suelo.

En general puede afirmarse que la atmósfera rural a pesar que no contiene contaminantes químicos fuertes, puede sí, ser agresiva para las estructuras metálicas de las líneas de transmisión por contener partículas orgánicas e inorgánicas en suspensión, humedad y elementos gaseosos como O_2 y CO_2 . Según Silva y colaboradores [7], no existe aun método de diagnóstico de la corrosión de los herrajes de las estructuras basado en ensayos cuantitativos, pero el autor sugiere como una opción el uso de la técnica de fotopotencial para una clasificación e identificación de los productos causados por esa corrosión extrema.

En la Tabla I son presentados resultados de las medidas de resistividad del suelo del pie de torre nro. 648. Con esos valores y los tenores de agua medidos fue trazado un gráfico de la resistividad eléctrica en función del teor de agua. Este gráfico es presentado en la Figura 5. En la figura 6 es presentado también un gráfico de los resultados de resistividad obtenidos para el suelo de puesta a tierra de la torre nro. 629.

Tabla I: Resistividad del suelo del pie de Torre nro. 648

E(eV)	I(mA)	I(mA)	I(mA)	I(mA)	I(mA)
10000	0.062	0.983	6.94	23.0	28.6
20000	0.070	1.911	12.76	45.0	55.6
30000	0.090	2.78	18.00	67.7	82.3
40000	0.121	3.67	25.00	90.1	110.0
50000	0.141	4.65	30.3	112.1	137.9
60000	0.170	5.67	36.3	135.4	164.0
70000	0.216	6.60	42.1	158.4	192.7
80000	0.243	7.57	48.3	184.5	224
90000	0.262	8.55	54.4	211.0	250

¡Error! Marcador no definido.

Figura 5: Resistividad en función del % de humedad del suelo extraído del pie de la torre nro. 648

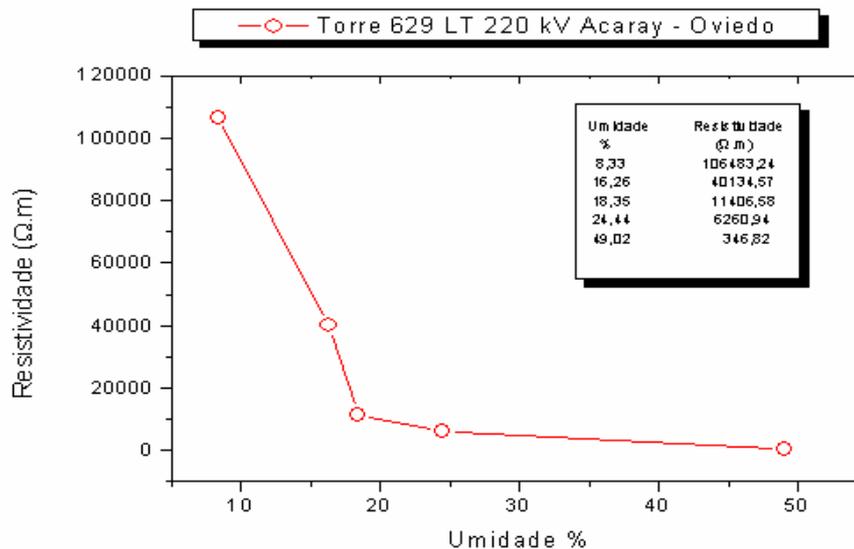


Figura 6: Resistividad en función del % de humedad del suelo extraído del pie de la torre nro. 629

Por el criterio de resistividad eléctrica del suelo, puede afirmarse, con base en los resultados obtenidos aquí, que el suelo de puesta a tierra de la torre nro. 648 puede ser clasificado como un suelo de baja resistividad presentado una tasa de corrosión variando entre 100 a 200 μ /año. Diagnostico similar puede ser emitido para los resultados obtenidos con el suelo de la torre nro. 629.

Estos resultados pueden ser comparados con aquel obtenido en 2004 para una muestra de suelo extraída del pie de torre nro. 806 instalada en una área de reserva de la ANDE en Hernandarias, en las proximidades de la Subestación de Acaray. En la época de la colecta del suelo, esa torre no presentaba indicios de corrosión. En la Tabla II son descritos los principales parámetros obtenidos en aquella época, que influyen la corrosividad del suelo, al mismo tiempo provee de criterios básicos para evaluación de la misma. Como se observa en esa tabla el suelo de la torre nro. 806 puede ser clasificado como poco agresivo diferentemente de los resultados encontrados para las torres nro. 648 y nro.629.

TABLA II: Corrosividad del suelo del pie de la torre nro. 806 de Ciudad del Este

BOLETIN DE CORROSIVIDADE DE SOLOS				
TORRE DA ANDE NO (PARAGUAI) 29/06/2004				
TESTES DE LABORATÓRIO: SOLO POUCO AGRESSIVO (TAXA DE 10 A 100 um/ano)				
	valores	classificação	critério	valor referencia
capacidade de retenção de água (% água)	31	humidade elevada		15 a 20
Resistividade na retenção de água em Ohm.m	390	levemente corrosivo	Tomashov	100 a 1000
resistividade média em Ohm.m	300	levemente corrosivo	pc por limf	100 a 1000
Potencial redox em mV			Stark/Wigt	100 a 400
(% água na resist. mínima)	50	elevada	Booth	15 a 20
Clorito em mEq/100g de solo (5ppm)	0,03	Baixa agressividade	Tomashov	0,1 a 1
Sulfatos em mEq/100g de solo n.d	n.d.	Baixa agressividade	Tomashov	0,1 a 1
pH Região passiva	7	Não corrosivo	Tomashov	5 a 7
desvio da saturação em % (capacid. Ret. Agua	38	((%sat-cretagua)/%sat)*100	limitrofe	30 a 50
tx de stratful pH	10	um/ano pouco corrosivo	Stratful	25 a 100
Índice de Trabanelli	1	Não corrosivo	Trabanelli	(-1 a -8)
acidez total e resistividade	1,3	baixa agressividade	10,83 Girard	10 a 100
bicarbonatos em mEq/100gsolo	0,06			
Categoria de corrosividade (tabela abaixo)	3			
resistividade média em Ohm.m (teste campo)				
	micrometro/ano			
1	<5	não corrosivo		
2	5-10	Proteção quase permanente (norma iso - 15589-1)		
3	10-100	Pouco agressivo		
4	100-200	Meio Agressivo (8mm em 40 anos ou 30 anos comerciais)		
5	200-500	Agressivo		
6	>500	Alta agressividade		

5 CONCLUSIONES

De la inspección visual realizada para levantar problemas de oxidación y corrosión de los herrajes y de los pies de algunas torres de la Línea de Transmisión en 220kV Acaray–Oviedo (circuito 1) y con base en un estudio cuantitativo realizado por los autores, es posible hacerse una clasificación de los niveles de corrosividad del suelo proveniente de la región de afloramiento de los pies de torre de esa línea.

Por estos resultados, es posible admitir que el método de protección de los pies de torre actualmente realizado por la aplicación de alquitrán de hulla no está siendo suficiente para proteger los pies de torre de un avanzado proceso de corrosión. Se hace necesario, por tanto, seguir recomendaciones técnicas sobre pintura anticorrosiva mas rigurosamente en esa región, así como desarrollar un método mas efectivo para aumentar la vida útil de esas estructuras.

Con todos los datos levantados aquí y con el diagnóstico emitido sobre la corrosividad del suelo, los autores esperan poder contribuir con el sector de mantenimiento de líneas del sector eléctrico paraguayo, en la adopción de soluciones para los problemas de corrosión, especialmente en la línea Acaray-Oviedo de la ANDE. Se espera también, en un trabajo futuro, proponer acciones preventivas que permitan un mayor control de la corrosión en líneas de transmisión de energía eléctrica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al LACTE/Curitiba y Laboratorio de Química de la Itaipu Binacional por el auxilio técnico. Así mismo, a los Programas PDTA/Parque Tecnológico de Itaipu-PTI y al PIBIC/UNIOESTE por el apoyo financiero a los Alumnos de Iniciación Científica - AIC.

BIBLIOGRAFIA

- [1] V. Gentil “ Corrosão” (4ª. Edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 2003).
- [2] W. D. Callister Jr, “Material Science and Engineering” (New York: J. Wiley, 1996).
- [3] E. T. Serra e M. M. Araújo – “ Corrosão em fundações metálicas de torres de transmissão – Avaliação da agressividade dos solos e técnicas de proteção anticorrosiva” (VIII SNPTEE, Brasil, 1986).
- [4] Z. Panossian – “ Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas” (Vol. I e II, Editora IPT, São Paulo, 1993).
- [5] E. L. K. Burin; N. Díaz Mora y J. C. Sihvengher – “ Estudio da corrosividade do solo em pés de torre de linhas de transmissão” (EAIC – XIII Encontro Anual de Iniciação Científica 29 de agosto a 1 setembro, Londrina, Paraná, Brasil, 2004).
- [6] N. L. de Almeida y F. J. S. de Siquiera – “ Corrosão em cabos de alumínio, por corrente alternada e pela ação de defensivos agrícolas” (IV Seminário de Materiais no Setor Elétrico COPEL/UFPR 14 a 18 de agosto, Curitiba, Paraná, Brasil, 1994).
- [7] J. M. Silva, J. Lázaris y L. H. Tersariol – “ Avaliação da corrosividade de solos pertencentes a região de afloramento de pés de torres de linhas de transmissão” (ERIAC - X Encuentro Regional Latinoamericano de la Cigré 18 a 22 de mayo, Puerto Iguazú, Argentina, 2003).