



UNEXPO



Memorias de las

XIII JORNADAS DE INVESTIGACIÓN

20 y 21 de Mayo 2015

**Ingenier@ con Conciencia Social,
Alternativa Productiva para el Desarrollo Duradero**

ESTUDIOS GENERALES

ISBN: 978-980-6400-31-3

Depósito Legal: LFX08520150012225

ÍNDICE	PP.
Determinación de las Corrientes de Fuga en un Aislador Polimérico de 400 kV para Diferentes Tipos de Contaminación Usando el Método de Elementos Finitos	3
Educación y Responsabilidad Social Universitaria en Venezuela	13
Elaboración de un Modelo Electro-Conductivo para una Malla de Puesta a Tierra usando el Método de Elementos Finitos	19
Evaluación de la porosidad de un recubrimiento cuproníquel mediante técnicas potenciodinámicas y análisis de imágenes	28
La Identidad de Parseval y la Transformada Fraccionaria de Fourier	34

Determinación de las Corrientes de Fuga en un Aislador Polimérico de 400 kV para Diferentes Tipos de Contaminación Usando el Método de Elementos Finitos

Rojas, Francisco, González, Jesús, Rendón, Jesús, Rodríguez, Adra, Marcano, Frank.

frojashdez37@gmail.com, jdanielgg19@gmail.com, j.relectrica@gmail.com,
adrarodriguez@hotmail.com, frankvzlax@gmail.com.

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”.

(UNEXPO)

Resumen: En este trabajo se presenta un estudio para determinar la influencia de la contaminación en las corrientes de fuga y sus campos eléctricos asociados en un aislador polimérico sometido a una tensión eléctrica de 400 kV, usando el Método de elementos finitos. Se realizaron modelos de dichos aisladores en los cuales los resultados de las simulaciones electro conductivas mostraron que una contaminación que equivale a corrientes de fuga inferior a 5,0 mA, no implica condición de riesgo, pero que corrientes superiores a las 40 mA indica una condición de mantenimiento urgente. Una corriente de 100 mA ya involucra la condición de arco eléctrico. Este estudio está incluido dentro de un proyecto general titulado: “Diseño y construcción de un Sistema de monitoreo en tiempo real de las corrientes de fuga en aisladores sometidos a alta tensión eléctrica”, que tiene como objetivo principal la instalación de un sistema de monitoreo en tiempo real de las corrientes de fuga en las líneas de alta tensión de Sistema Eléctrico Nacional, para evitar los cortes de suministros eléctricos y salidas de líneas, producidos por fallas eléctricas prematuras en los aisladores.

Palabras clave: Aislador polimérico, corrientes de fuga, simulaciones, contaminación.

I. INTRODUCCIÓN

El diseño de los aisladores se ha ido desarrollando conforme se han producido mejoras en las características eléctricas y mecánicas de los mismos. Destaca la aparición de los aisladores poliméricos en las líneas de transmisión de energía eléctrica en los años sesenta, pero su uso comienza a generalizarse a partir de la década de los ochenta [1]. Las principales ventajas de estos aisladores sobre los de porcelana y los de vidrio son las siguientes: menor peso, mayor resistencia a los impactos, mejor comportamiento inicial frente a la contaminación, mejores características de auto limpieza y alta resistencia mecánica. Debido a estas ventajas disminuyen los costos de transportación, construcción y mantenimiento de las líneas eléctricas. Como consecuencias de estas ventajas los aisladores poliméricos han ido poco a poco desplazando a los otros tipos de aisladores. Sin embargo, en las líneas de alta tensión,

superiores a 400 kV, el uso de los aisladores poliméricos no ha sido superior a los otros aisladores.

La presencia de gotas de agua en los aisladores, junto a altas intensidades de campo eléctrico de las líneas de alta tensión producen una degradación más rápida de las propiedades eléctricas y mecánicas del polímero debido al efecto corona asociado en esas condiciones [2-4]. La intensidad del campo eléctrico necesaria para producir el efecto corona debido al agua oscila entre 4,4 y 7,2 kV/cm en la superficie del polímero del aislador [3]. El EPRI recomienda un valor límite de 4,5 kV/cm medido a 0,5 cm por encima de la superficie del polímero [5].

Estudios experimentales [6], [7] han demostrado que una contaminación alta (acumulación de una capa contaminante en la superficie del aislador) y un humedecimiento simultáneo producen descargas superficiales, las cuales destruyen la hidrofobicidad e incrementan la corriente de fuga,

disminuyendo la vida útil de los aisladores. También, dichas descargas pueden crecer y llegar a provocar una descarga total (flashover) con la consiguiente falla en el sistema eléctrico.

En el Sistema Eléctrico Venezolano (Sistema Eléctrico Nacional, SEN) se han producido importantes salidas de líneas debido a fallas en los aisladores poliméricos en las líneas de 400 kV [8], [9]. Considerando que el tiempo de vida útil de tales aisladores fue mucho menor a lo esperado, estudios recientes se han realizado para determinar las causas de las fallas, usando el Método de Elementos Finitos [10], [11].

Tomando en cuenta que en el mercado internacional ya existen Sistemas de Monitoreo en tiempo real de las corrientes de fugas, el Centro de Investigación Interdisciplinario Aplicado a la Ingeniería (CIAPI) de la UNEXPO Puerto Ordaz se ha planteado postular y desarrollar un proyecto de investigación cuyo objeto fundamental sea proteger el SEN de las fallas de los aisladores debido a altas corrientes de fugas, usando recursos y tecnología propia.

II. DESARROLLO

A. El modelo del Aislador Polimérico

La Figura 1 muestra las partes y las dimensiones del modelo del aislador polimérico usado en la simulación, las características de los materiales, necesarias para este estudio se muestran en la Tabla 1.

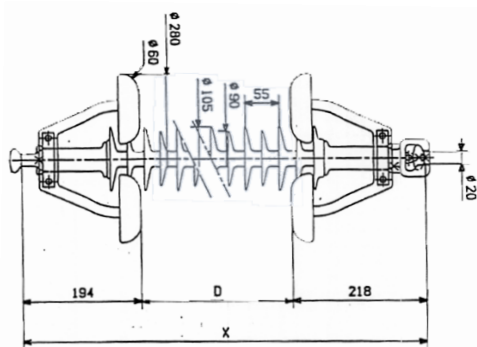


FIG. 1. Modelo del Aislador Polimérico marca Sediver para 400 kV

TABLA I.
MATERIALES DEL AISLADOR POLIMÉRICO Y SUS PROPIEDADES

Materiales	Densidad (kg/m ³)	Permitividad eléctrica relativa (F/m)	Resistividad (Ωm)	Conductividad térmica (W/mK)
Acero	7850,0	1,0	0,695x10 ⁻⁵	15,90
Vidrio	2,5	7,3	1x10 ⁹	1,00
Aire	1,2	1,0	3,33x10 ¹¹	0,026
Polímero	0,8	4,3	1x10 ¹⁴	0,365
Agua salada	1020,0	70,0	2	0,623

En la Figura 2 se observa una ampliación del modelo del aislador en dos dimensiones, en donde se incluye el anillo equipotencial. Al modelo se le agrega una capa continua de 0,5 mm de espesor de material contaminante por encima de la superficie del polímero de todas las aletas, con el fin de estudiar la intensidad del campo eléctrico con la condición crítica especificada en [5], ver Figura 3, en donde se resalta una ampliación de la zona de la segunda aleta y se muestra el mallado del modelo y del aire que lo rodea, (el color negro se debe a lo denso del mallado en las aletas).

El aislador polimérico escogido para la simulación es de suspensión, marca SEDIVER similar al usado en la línea de 400 kV del Tablazo-Cuatricentenario II, cuyos parámetros técnicos especificado por el fabricante se muestran en la Tabla 2. La tensión de fase aplicada entre los terminales del aislador es de 230 KV y en las fronteras del sistema se asumen potenciales nulos. Para la simulación con elementos finitos se usó el programa Ansys utilizando el PLANE230, el cual es un elemento eléctrico basado en corriente tipo 2-D de 8 nodos. Dicho elemento tiene un grado de libertad, voltaje en cada nodo, y se basa en la formulación del potencial eléctrico escalar y es aplicable a los análisis de campos eléctricos de bajas frecuencias siguientes: conducción eléctrica estable, armónicos cuasi estáticos y transitorios cuasi estáticos [12].

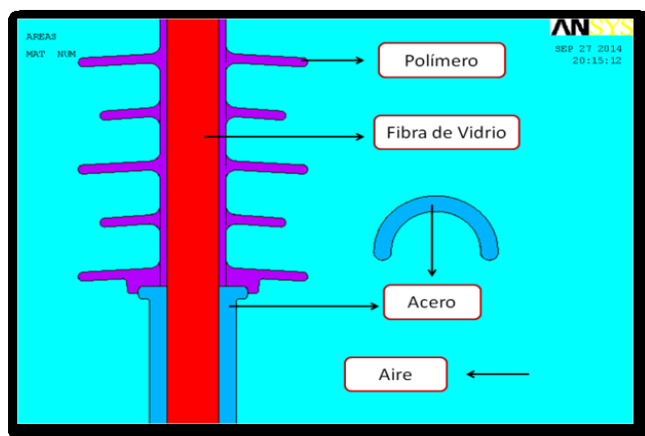


FIG. 2. Zona de la primeras aletas del aislador donde se observan sus materiales, incluido el anillo equipotencial de acero.

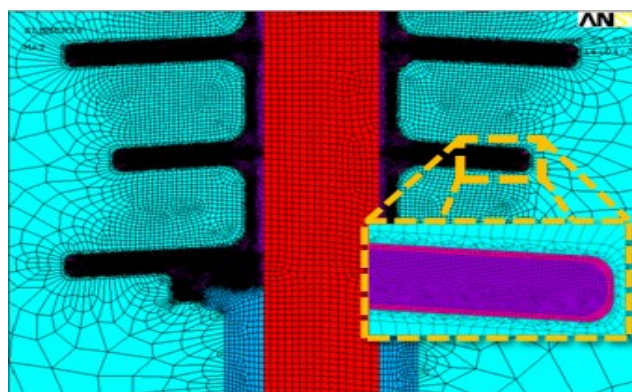


FIG. 3. Mallado del modelo en la zona de las primeras aletas del aislador donde se observa la capa del contaminante (la amplificación de la región del polímero de la segunda aleta)

TABLA 2
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AISLADOR.

Tipo	Aislador Polimérico
Marca	SEDIVER
Modelo (en torres de tipo suspensión)	160XM127S + 2AN1960280
Resistencia Electromecánica	160 KN
Numero de aletas	127
Peso neto + Anillo	16,1 Kg
Distancia entre aletas	55 mm
Distancia de arco (D)	3374mm
Longitud del aislador (x)	3792 mm
Distancia de Fuga	11147 mm

Es importante resaltar que en el Laboratorio de Ensayos Electromagnéticos del CIAP Macagua, CORPOELC en el marco de la investigación realizada por [13], [14] se ejecutaron pruebas para medir campo eléctrico en este tipo de aislador. La diferencia de potencial eléctrico entre los terminales del aislador usada fue de 150 kV. Los resultados de la prueba fueron comparados con las simulaciones del modelo del aislador, con el programa ANSYS, las cuales mostraron una diferencia menor al cinco por ciento.

B. La Formulación del Potencial Escalar Eléctrico

En la aproximación cuasi estática se desprecia la derivada temporal del vector densidad de flujo magnético $\left\{\frac{\partial B}{\partial t}\right\}$ en las ecuaciones de Maxwell, por lo tanto éstas convierten en

$$\nabla \times \{E\} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \{D\} = \rho \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \{B\} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \{H\} = \{J\} + \left\{\frac{\partial D}{\partial t}\right\} \quad (4)$$

donde:

$\{H\}$ =Vector de Intensidad de Campo Magnético

$\{J\}$ =Vector de Densidad de Corriente Eléctrica

$\{D\}$ =Vector de Densidad de Flujo Eléctrico

$\{E\}$ =Vector de Intensidad de Campo Eléctrico

$\{B\}$ =Vector de Flujo de Campo Magnético

ρ =Densidad de carga eléctrica

Como el campo eléctrico $\{E\}$ tiene rotacional nulo, éste está en función del potencial escalar eléctrico V por medio de la relación:

$$\{E\} = -\nabla V \quad (5)$$

De esta manera conocida la distribución del potencial escalar eléctrico en todo el modelo del aislador, el campo eléctrico $\{E\}$ se determina fácilmente con la Ecuación (5). La densidad de corriente $\{J\}$ se calcula por medio de la ley de Ohm,

$$\{J\} = [\sigma]\{E\} \quad (6)$$

Siendo $[\sigma]$ la matriz de conductividad eléctrica, dada por

$$[\sigma] = \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho_{xx}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\rho_{yy}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\rho_{zz}} \end{pmatrix}$$

ρ es la resistividad eléctrica del material y, por ejemplo, ρ_{xx} , indica la resistividad eléctrica en la dirección x. Para un material homogéneo e isotrópico estos elementos diagonales son iguales. El vector densidad de flujo eléctrico se determina por medio de la relación constitutiva:

$$\{D\} = [\varepsilon]\{E\} \quad (7)$$

donde $[\varepsilon]$ es la matriz de permitividad eléctrica definida por

$$[\varepsilon] = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

En la interface de los materiales se cumple las siguientes condiciones para los campos:

$$E_{t1} - E_{t2} = 0 \quad (8)$$

$$D_{n1} - D_{n2} = \rho_s \quad (9)$$

$$J_{n1} + \frac{\partial D_{n1}}{\partial t} = J_{n2} + \frac{\partial D_{n2}}{\partial t} \quad (10)$$

donde los sub índices t y n indican las componentes tangenciales y normales de los campos, respectivamente y el uno y el dos indican los medios a cada lado de la línea que los separa o interface. ρ_s indica la densidad de carga superficial en la interface de los medios.

En la formulación del Potencial Escalar Eléctrico existen dos casos: el análisis eléctrico cuasi estático y el electrostático. El caso cuasi estático está gobernado por la Ecuación de continuidad de la carga eléctrica, definida por:

$$\nabla \cdot \left[\{J\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} \right] = 0 \quad (11)$$

Sustituyendo las ecuaciones (5), (6) y (7) en (11) se obtiene:

$$-\nabla \circ ([\sigma] \nabla V) - \nabla \left([\varepsilon] \nabla \frac{\partial V}{\partial t} \right) = 0 \quad (12)$$

La Ecuación (12) es la usada por el elemento PLANE230 para aproximar los campos eléctricos dependientes del tiempo, y es válida tanto para materiales conductivos y dieléctricos. En el caso para conducción de corrientes estables, la Ecuación (12) se simplifica en la Ecuación (13).

$$\nabla \circ ([\sigma] \nabla V) = 0 \quad (13)$$

Conocidas las condiciones de fronteras para el potencial eléctrico en el modelo, el ANSYS con el Método de Elementos Finitos resuelve numéricamente las Ecuaciones (12-13) y a partir de su solución calcula la intensidad del campo eléctrico, el flujo eléctrico y la densidad de corriente. La corriente de fuga en el aislador se obtiene a partir de la densidad de corriente y la longitud transversal donde está confinada dicha densidad.

En el caso electrostático (modelo no conductivo) a partir de las ecuaciones de Maxwell se obtiene la Ecuación (14):

$$-\nabla \circ ([\varepsilon] \nabla V) = \rho \quad (14)$$

En este último modelo no es posible obtener las corrientes de fuga del aislador.

C. Resultados y Discusión

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones para el potencial eléctrico, densidad de corriente e intensidad del campo eléctrico. Primero se analiza el modelo sin contaminación.

Sin contaminación.

En la Figura 4 se observa la distribución del potencial eléctrico, la simetría de las líneas equipotenciales a ambos lados del aislador se debe a la ausencia de elementos conductores alrededor del modelo. El color rojo siempre va a indicar el valor máximo de la variable estudiada, en este caso se corresponde con 230 kV, mientras que el azul más intenso se corresponde con el voltaje de cero voltios (valor mínimo).

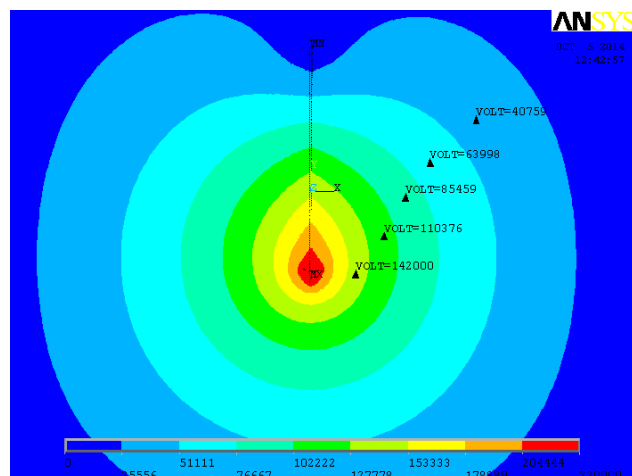


FIG. 4. Distribución de potencial eléctrico en el aislador sin contaminación.

El vector intensidad de campo eléctrico (V/m) se muestra en la Figura 5, la cual indica que el campo en las aletas y en la fibra de vidrio es mucho menor que el localizado en el anillo equipotencial (con valor máximo de $1,15 \times 10^6$ V/m), este comportamiento es el conveniente porque la función del anillo es impedir que las

altas intensidades del campo eléctrico alcancen las primeras aletas del aislador.

También, con la simulación se determinaron los valores de los campos eléctricos en el aire a lo largo de una línea vertical localizada a 10 cm del borde de las aletas mayores. Las primeras medidas se corresponden a la altura del herraje terminal inferior (conectado al conductor energizado) y las últimas al herraje superior (conectado a la torre), la distancia vertical entre medida y medida es aproximadamente 2,64 cm la cual corresponde a la distancia entre cada aleta del mismo tamaño. El resultado se puede observar en la gráfica de la Figura 6.

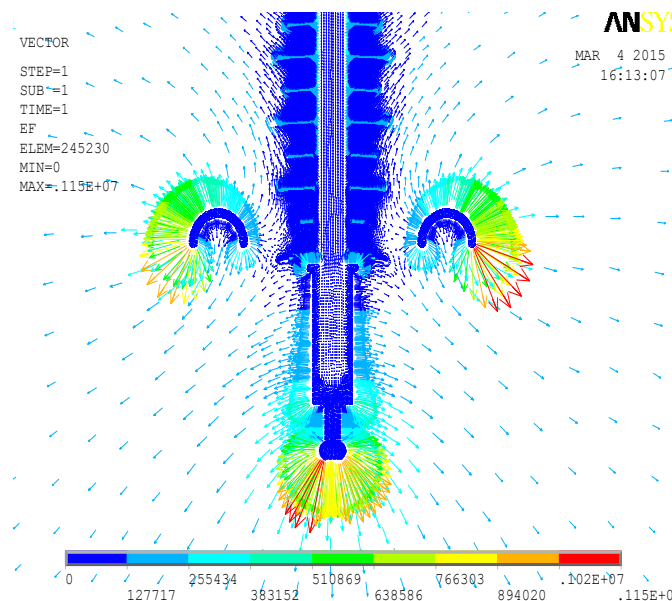


FIG. 5. El vector de la intensidad del campo eléctrico (V/m) en el aislador y en el aire circundante

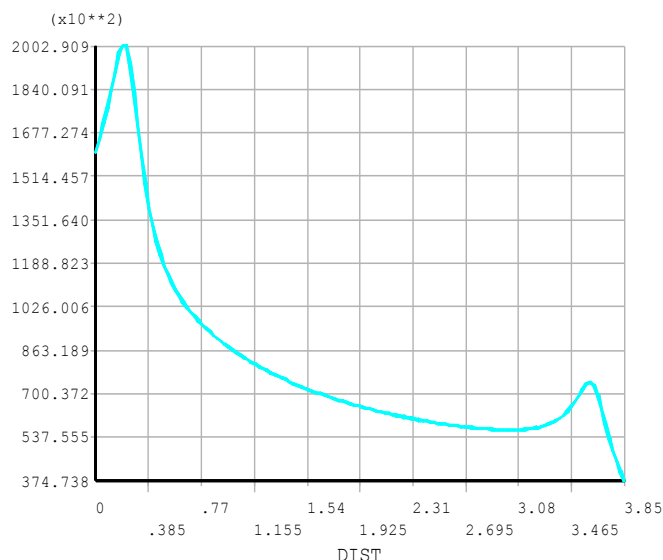


FIG. 6. Distribución del campo eléctrico a lo largo de un eje vertical del aislador

La curva obtenida está en concordancia con lo reportado por otros autores [5], [15].

El vector densidad de corriente en la fibra de vidrio se observa en la Figura 7, cuyo valor obtenido fue de $6,59 \times 10^{-3}$ A/m, la cual pasa a través de una longitud transversal de 0,024 m, con lo cual la corriente de fuga calculada es de $158 \mu A$, cuyo valor está en concordancia con los datos obtenidos en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Simón Bolívar [9].

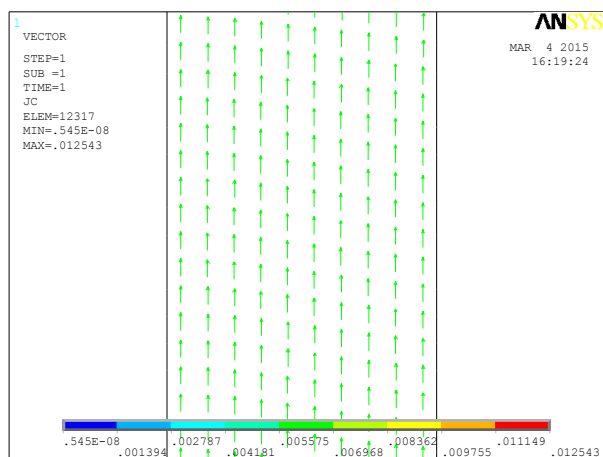


FIG. 7. Vector densidad de corriente en el vidrio

En el polímero la corriente de fuga se obtuvo una densidad de corriente de $0,83 \times 10^{-8}$ [A/m] y

una longitud de 0,003 m, lo que implica una corriente de $0,0000069 \mu A$, la cual es insignificante con respecto a la corriente de fuga en la fibra de vidrio.

Con contaminación: capa de agua salada de 0,5 mm de espesor

La distribución del potencial eléctrico es muy similar a que corresponde sin contaminación según se observa en la Figura 8,

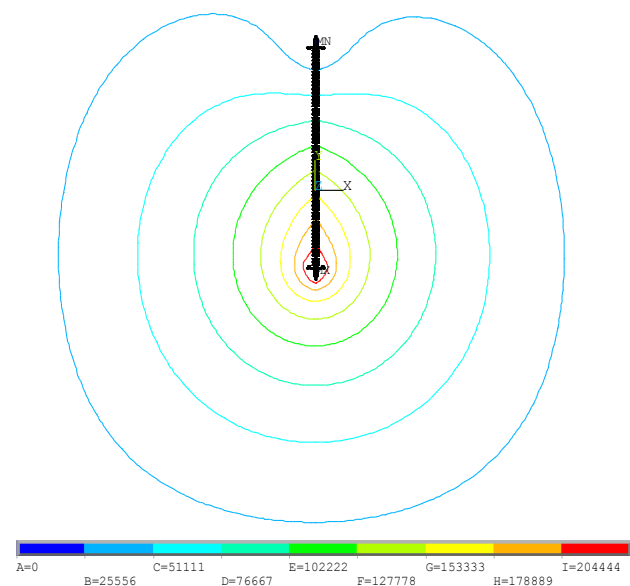


FIG. 8. Distribución del potencial eléctrico en el aislador con la capa continua de contaminante: agua salada

La simulación muestra que la densidad de corriente es mucho mayor en la capa de contaminación, lo que implica una corriente superficial muy significativa en dicha capa, tal y como se observa en la Figura 9. Igualmente, la simulación mostró que el vector densidad de corriente para la fibra de vidrio no fue afectado por la contaminación, porque mantuvo el mismo valor que corresponde a sin contaminación. Los valores de la densidad de corriente y de la corriente de fuga superficial en la fibra de vidrio y la capa contaminante se observan en la Tabla 3.

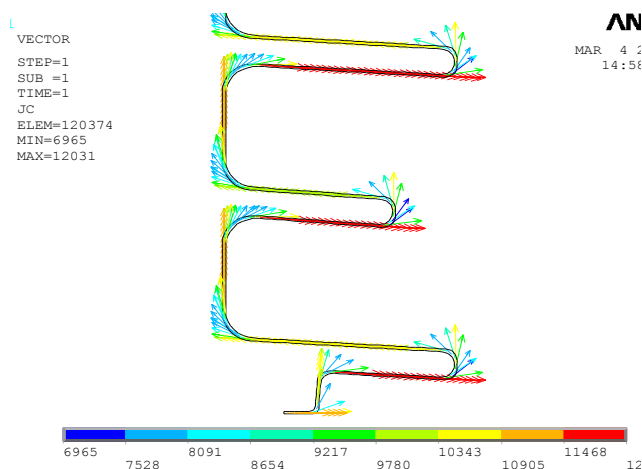


FIG. 9. Vector densidad de corriente en las tres primeras aletas

TABLA 3
CORRIENTE DE FUGA SUPERFICIAL

Zona	Densidad de corriente (A/m)	Corriente
Fibra de vidrio	0,0066	158,4 μ A
Capa agua salada	6900-12000	3,45 -6,00 A

En la fibra de vidrio se observa que la densidad de corriente mantiene el mismo valor que se corresponde a sin contaminación, mientras que en la capa de agua salada aparece una corriente superficial muy alta comprendida entre los 3,45 y 6,00 amperes.

La intensidad del campo eléctrico en la capa contaminante, aire y polímero para la tercera aleta se observan en las Figuras 10,11 y 12, respectivamente

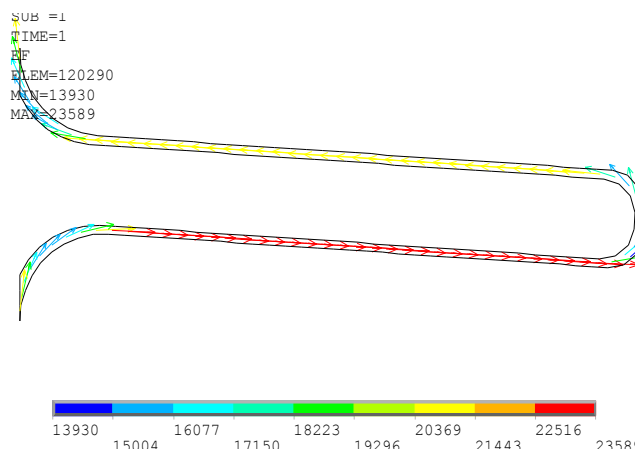


FIG. 10. Intensidad del campo eléctrico en la capa contaminante para tercera aleta del aislador

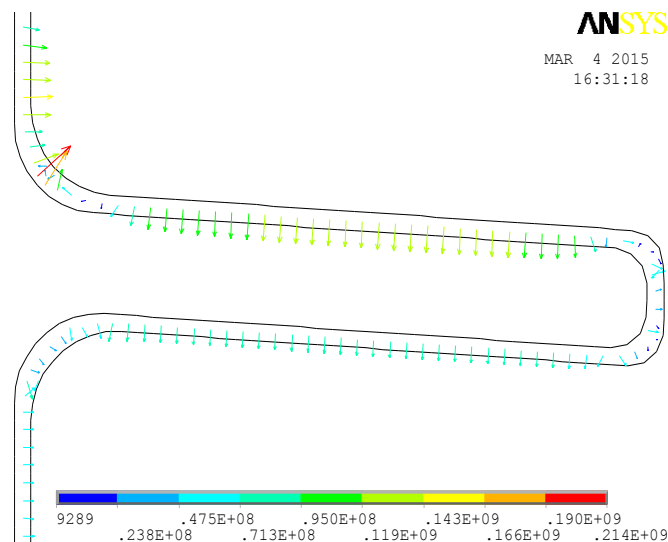


FIG. 11. Vector intensidad del campo eléctrico en el aire circundante a la tercera aleta del aislador.

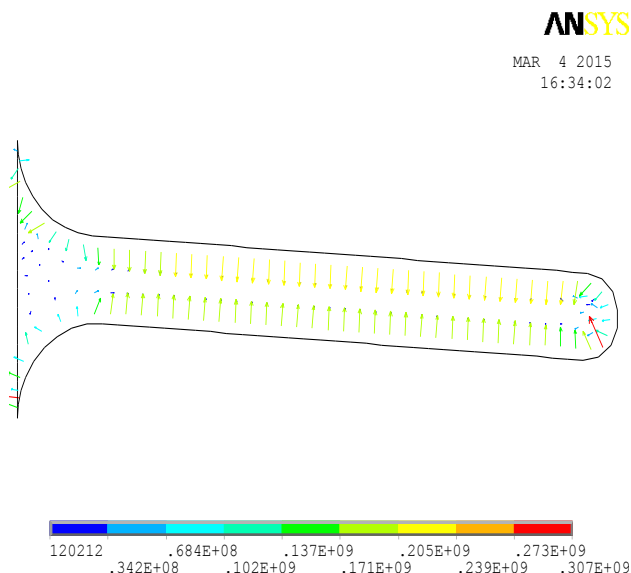


FIG. 12. Vector Intensidad del campo eléctrico en el polímero de la tercera aleta del aislador.

Se observa que la intensidad del campo eléctrico en el polímero y el aire presenta valores muy por encima de los valores permitidos, en el orden de los 0,2 -0,3 GV/m, lo que indica claramente que es imposible que el aislador

presente una capa contaminante de agua salada a lo largo de todas sus aletas sin que se produzca una salida de línea por efecto de arco eléctrico.

A objeto de observar la condición de arco eléctrico y descargas parciales en el polímero y la fibra de vidrio del aislador que se corresponden con el valor límite de 3000kV/m, según [5], en la Figura 13 se presenta la magnitud del módulo del vector intensidad del campo eléctrico en una escala entre 0- 3000 kV/m, con los que los valores por encima del valor límite se indica con color gris. Es importante destacar que el valor crítico mencionado coincide con el valor conocido para la rigidez dieléctrica del aire.

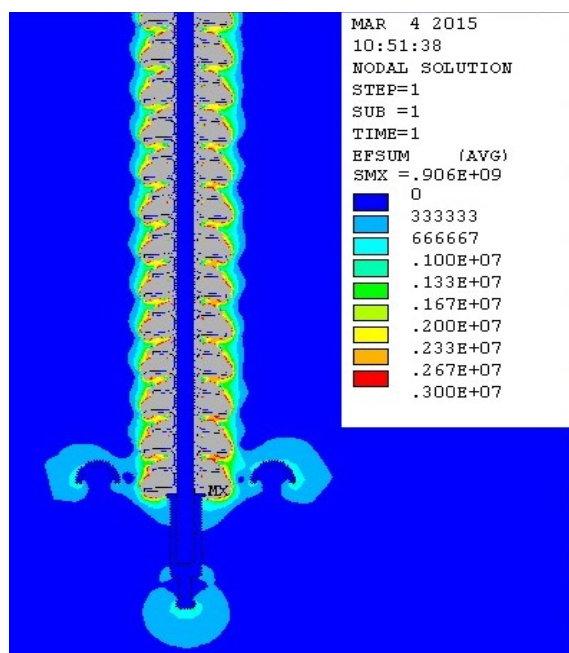


FIG. 13. Valores de la intensidad del campo eléctrico en las primeras aletas del aislador

La simulación mostró un área continua en toda la longitud del aislador que indican valores del campo eléctrico que excede el valor máximo para producir arco eléctrico, lo que indica condición de arco eléctrico.

Con el propósito de calcular la corriente de fuga mínima que soporta el aislador para que no presente flashover (arcos eléctricos) y descargas parciales se varió los valores de la resistividad eléctrica de la capa de contaminación, sin tomar

en cuenta el tipo de contaminación en particular. Los resultados de este estudio con sus respectivas observaciones se muestran en la Tabla 4.

TABLA 4
CORRIENTE SUPERFICIAL DE FUGA, DENSIDAD DE CORRIENTE EN FUNCIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONTAMINANTE

Resistividad Eléctrica [Ω m]	Densidad de corriente máxima [A/m]	Corrientes de Fuga máxima
2	12000	6,0 A
20	900	450,0 mA
100	241	120 mA
200	90	45,0 mA
600	25	12,5 mA
800	9	4,5 mA

En la Tabla V se presenta los campos eléctricos con las observaciones sobre la posibilidad de arcos eléctricos y descargas parciales en función de las corrientes superficiales de fuga señaladas en la Tabla 5.

TABLA 5
CONDICIÓN DEL AISLADOR EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE DE FUGA

Corriente de Fuga máxima	Campo eléctrico/observaciones
6,0 A	Campo eléctrico en el orden de 24, 200000 y 300000 kV/m en la capa agua salada, aire y el polímero, respectivamente. Se observó una continuidad en las zonas que exceden el valor del campo eléctrico para producir arco eléctrico en todo el aislador. Condición segura de arco eléctrico total o flameo.
450,0 mA	Se observó una continuidad de las zonas que exceden el valor para producir arco eléctrico, que se inicia en la primera aleta hasta un poco más de dos tercios de la altura del aislador. Condición segura de arco eléctrico total o flameo.
100 mA	Existencia de muchas zonas discontinuas (a veces relativamente grandes) donde el campo eléctrico excede el valor de la rigidez dieléctrica del aire y para producir efecto corona por la presencia de gotas de agua en el polímero (450 kV/m, valor definido por EPRI). Condición segura de numerosas descargas parciales.
45,0 mA	Existencia de varias zonas muy pequeñas donde el campo eléctrico excede el valor de la rigidez dieléctrica del aire. No hay continuidad en dichas zonas lo que implica Condición descargas parciales.
12,5 mA	Existencia de pocas zonas muy pequeñas donde el campo eléctrico excede el valor de la rigidez dieléctrica del aire. También hay pocas zonas que exceden el valor el valor máximo para producir efecto corona por la presencia de agua en el polímero.
4,5 mA	No se observan zonas que con campo eléctrico que excedan el valor de la rigidez dieléctrica del aire ni el efecto corona en el agua. No hay descargas parciales ni efecto corona por agua en las aletas del aislador.

Los resultados de la Tabla V son similares al resultado experimental publicado en [16], el cual se observa en la Tabla VI.

TABLA VI
ESTADO DEL AISLADOR SEGÚN SU CORRIENTE DE FUGA

Corriente de fuga	Síntoma
0-2 mA	No hay efectos visibles o audibles
3-5 mA	Poco ruido
5-10 mA	Chispas visibles de noche
10-15 mA	Quemado por corriente de fuga en crucetas de madera en postes
15-100 mA	Muchas Chispas
Sobre 100 mA	Flashover y salida de servicio inminente

III. CONCLUSIONES

1) Por medio de la simulación electro conductiva se logró relacionar las corrientes de fugas con las intensidades de campo eléctricos.

2) Una corriente de fuga superficial superior a 100 mA indica la presencia de campos eléctricos en las aletas de los aisladores que exceden los valores mínimos para producir efecto corona o descargas parciales.

3) Se sugiere que una corriente superficial igual o superior a los 40 mA indica que una condición de mantenimiento urgente de los aisladores.

4) Se recomienda desarrollar proyectos de ingeniería básica y de detalle para crear un sistema de monitoreo de corriente de fuga para las líneas de Alta Tensión igual o superior a los 400 kV.

5) Se recomienda realizar las simulaciones en 3D para compararlas con los resultados con simulaciones en 2D.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Centro de Investigaciones de Materiales (CIMAT) Dr. Mokka Rao, de la Universidad Nacional Experimental de Guayana (UNEG) por permitirnos el uso de la Licencia Ansys, a través de la Prof. Maritza Matta

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Almiral Juan. “Temas de Ingeniería Eléctrica”. Capítulo 5, Sección 5.2.4, página 293, disponible en <http://es.scribd.com/doc/156183176/Temas-De-Ingenieria-Elctrica-Dr-Juan-Almiral-Mesascribd>
- [2] A.J. Philips, R.H. Billings and H.M. Schneider, “Water Drop Corona Effects on Full-Scale 500 kV Non-Ceramic Insulators”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol 14, no.1, pp 258-265, junio 1999
- [3] A.J. Philips, D.J. Childs and H.M. Schneider, “Aging of Non-Ceramic Insulators Due to Corona from Water Drop Corona”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol 14, no.3, pp 1081-1089, julio 1999
- [4] V.M Moreno and R.S Gorur, “Effect of Long-term Corona on Non-ceramic Outdoor Insulators Housing Materials”, IEEE Transactions Dielectric and Electrical Insulations, Vo.2, pp 731on Power Delivery, vol 8, no.1, pp 117-128, febrero 2001
- [5] A. Phillips, C.S. Engelbrecht “Insulation for Power Frequency Voltage”, EPRI AC Transmission Line Reference Book-200kV and Above. Third Edition. Chapter 4, diciembre 2005.
- [6] Eugenio, Conchas I (Consulta en febrero, 2015). “Monitor de Corriente de Fuga en Aisladores”. Disponible en www.cadenaglobal.com
- [7] P. A. Calva et al, “Efecto de la humedad relativa sobre las tensiones de flameo en aisladores de EPDM sujetos a contaminación”, Científica, Vol 12, no.12, pp 79-86, enero 2006
- [8] M. Mendoza, V. Graffe. Informe Técnico REI-10-019, “Inspeccion visual a Aisladores Poliméricos de la línea Tablazo-Cuatricentenario II a 400 kV.” CIAP-CORPOELEC, Agosto 2010.
- [9] Universidad Simón Bolívar, Laboratorio A, Sección de Alta Tensión, “Evaluación de la Cadena de Aisladores Poliméricos 400 kV línea el Tablazo-Cuatricentenario (Clase 160 kN) Marca Sediver”. Informe técnico para la empresa EDELCA, Julio 2007
- [10] J. Gonzalez. “Estudio de las Corrientes de Fuga en un Aislador Polimérico de 400 kV para diferentes tipos de contaminación usando el Método de Elementos Finitos” Tutor Académico: Francisco Rojas. Trabajo de grado de Ingeniería Eléctrica de la UNEXPO. Octubre de 2014.
- [11] R. Escalona. “Estudio de la influencia de la geometría y la posición del Anillo Equipotencial en el Estrés Eléctrico de un Aislador Polimérico Sediver sometido a 400 kV”. Tutor Académico: Francisco Rojas. Trabajo de grado de Ingeniería Eléctrica de la UNEXPO. Octubre de 2014.
- [12] ANSYS 12.1 Theory Reference, 5.1.8 Electric Scalar Potential.
- [13] A. Beria. “Simulación del comportamiento Termo Eléctrico en cadena de Aisladores de Vidrio y

Polimérico ante agentes contaminantes". Tutor Académico: Francisco Rojas. Trabajo de grado de Ingeniería Eléctrica de la UNEXPO. Agosto de 2013.

- [14] A. Beria et al. **"Simulación del comportamiento Electro-Térmico en cadenas de aisladores de vidrio y polimérico ante contaminación salina."** Memoria del XII Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencia Aplicadas CIMENIC. IBSN: 978-890-7161-04-6. Sociedad Venezolana de Métodos Numéricos en Ingeniería (SVMNI) 2014. Universidad Central de Venezuela.
- [15] T. Zhao, M.G. Comber. "Calculation of electric field and potential distribution along non-ceramic insulators and transmission tower", IEE Transactions on Power Delivery, vol.15, no.1. pp.313-318, 2000
- [16] D. Méndez. **"Fallas en una línea de transmisión provocadas por contaminación en los aislamiento"**. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista, Universidad Veracruzana, Xalapa, México, 2010. Disponible en <http://cdigital/uv.mx/bistream/123456789/32856/mendezmapel.pdf>

Educación y Responsabilidad Social Universitaria en Venezuela

Lezama, Elizabeth.

elezama2@hotmail.com

UNEXPO Vice-Rectorado Puerto Ordaz,
Centro de Investigaciones Socio-Histórica de Guayana

Resumen: Los cambios y transformaciones de la sociedad actual repercuten en la manera en que los individuos perciben la realidad, se trastocan los sistemas de valores, creencias individuales y colectivas, y por ende, impactan en el sistema educativo en todos sus niveles imponiéndoles nuevos retos. De allí la necesidad de repensar el rol de la Universidad en función de su responsabilidad social-moral como agente generador de cambios en el ser humano como individuo y como actor social. En tal sentido, el objetivo principal del presente trabajo es reflexionar sobre la educación superior y la responsabilidad social universitaria frente al reto que representa el presente milenio. Para realizar la presente investigación se utilizó como estrategia metodológica un enfoque hermenéutico-crítico. Como resultado se espera develar la necesaria interrelación entre la Universidad-entorno social y la construcción de un nuevo profesional/ciudadano responsable socialmente.

Palabras clave: Educación, Responsabilidad Social Universitaria, Universidad, Venezuela.

IV. INTRODUCCIÓN

Los vertiginosos cambios internos, las evidentes contradicciones sociales y el carácter global de los problemas económicos, sociales, políticos y medioambientales que de distintas formas está afectando a las sociedades actuales, requieren nuevas formas de respuestas multifuncionales y multidireccionales que involucren a los espacios gubernamentales, sociales y educativos. En este escenario el sistema educativo en todos sus niveles, y de manera particular las Universidades, están llamadas a dar respuesta a las necesidades sociales como parte de las exigencias del presente milenio.

En el mundo contemporáneo, las instituciones de educación universitaria deberían cumplir el papel trascendental de acompañar los cambios y transformaciones que se adelantan en la sociedad.

Actualmente las Universidades y las instituciones públicas y privadas en el mundo y de manera particular en Venezuela se convierten en valiosos actores sociales en el marco de la discusión sobre el papel de estas y su impacto en

la transformación social. Esto lleva a pensar y repensar lo universitario desde otra perspectiva: la interacción Universidad-Comunidad-Estado, en la formación integral de los nuevos profesionales/ciudadanos y la pertinencia social del quehacer universitario. De allí, que el objetivo del presente es reflexionar hermenéuticamente sobre la educación superior y su responsabilidad social universitaria frente al reto que representa el presente milenio.

Es por ello que en el contexto actual es fundamental establecer nuevos horizontes discursivos que permitan construir una Universidad autoreflexiva en relación a sí misma (académico-institucional), y de su compromiso social; sobre todo, de su parte de responsabilidad en los problemas crónicos de la sociedad, dejando de pensarse como un espacio sólo de racionalidad instrumental.

V. DESARROLLO

El reto de la Educación Universitaria en el Siglo XXI

La universidad tradicional (moderna) sustentada en el paradigma ilustrado del siglo XVIII, el cual consiste en la organización del conocimiento de manera fragmentaria, ordenada de acuerdo a las especialidades de la ciencia, arte u oficios; y donde, la cientificidad, la objetividad, disciplinariedad y la racionalidad se convierten en su eje central, está siendo cuestionada en su viejo modelo de hacer ciencia, concepción de la sociedad según la Ilustración; como señala Méndez (2000) [1]

“hoy realmente tenemos es una crisis universitaria, porque la universidad se encuentra en un estado de problemática prolongada que está incidiendo no solamente en su estructura y funcionamiento sino que está incidiendo en su legitimidad y en su papel histórico. Es por ello, que diversos estudiosos del área han venido expresando la necesidad urgente de repensar la Universidad con el fin de dar respuesta a las exigencias del nuevo milenio”. (p. 20).

Repensar la Universidad desde una nueva concepción que la vincule estrechamente con la sociedad, la ciencia, la innovación y, sobre todo, con el profesional que egresa, mediante la creación de nuevos constructos teóricos que liberen a las caducas universidades del andamiaje educativo instaurado por el enciclopedismo francés de inicios del Siglo XVIII. Hoy se reconocen nuevas formas de organización del saber y del aprendizaje, es la época del pensamiento complejo, la transdisciplinariedad, la hermenéutica, aunado a un pensamiento multidimensional capaz de concebir la complejidad de lo real, como señala Morín (1999) [2] “se trata de buscar siempre las relaciones e inter-retro-acciones entre todo fenómeno y su contexto, las relaciones recíprocas entre el todo y las partes: cómo una modificación local repercute

sobre el todo y cómo una modificación del todo repercute sobre las partes”. (p. 27).

La universidad moderna no soporta más reparaciones o intentos de reformas. En este país esa ha sido la discusión a lo largo del siglo pasado, es tiempo de construir nuevos fundamentos para el abordaje de la nueva ciencia, las nuevas profesiones, la nueva organización, la articulación con otros actores sociales: comunidad, entes públicos, empresas entre otros; y no solo, pensar en la reforma Universitaria a partir de los planes de estudios tal como lo sostienen Fergusson & Lanz (2001)[3]:

“Los modelos universitarios tradicionales ya no pueden mantenerse con la excusa de “servir a la búsqueda de la verdad” pues en todos los casos se ha tratado de una ideología encubridora enteramente desenmascarada en los tiempos que corren. La reforma universitaria de la que se trata es justamente una voluntad de rearticulación con la sociedad que emerge, en un doble sentido: como redefinición de la pertinencia, entendida, entonces sí, como universidad comprometida con el conjunto de la sociedad y como redefinición de su quehacer interno, ahora en clave de los nuevos paradigmas epistemológicos, pedagógicos y organizacionales que se debaten en el mundo entero”. (p. 4).

La clásica discusión del tema de la vinculación de la universidad con su entorno adquiere de este modo una nuevas dimensión: se trata de asumir integralmente el reto de la vinculación social más allá de la vieja idea de la “extensión” universitaria entendida generalmente como “servicio” o como presencia dadivosa y arrogante de la “academia que sabe” frente al “pueblo ignorante” (Ob. Cit. p.4).

La nueva universidad debe construirse desde lo colectivo, entendiéndose en este trabajo como la discusión permanente entre el quehacer universitario y su relación con la sociedad y sus necesidades. Por lo tanto, lo colectivo se construye desde la discusión permanente entre los actores que componen la

comunidad universitaria (Estudiantes, Profesores, Administrativos, Obreros) planteándose interrogantes que conlleven a responder el rol de la educación universitaria ante los desafíos de la nueva sociedad. No obstante, sería ingenuo pensar que la primacía de lo colectivo sobre lo individual sería la única variable en el salto cualitativo estructural que deben dar las universidades tradicionales ante la sociedad, este problema que reviste gran complejidad debe verse de manera multifactorial y multidimensional; pues “el estancamiento de los procesos de cambios en las universidades suele estar asociado con las dinámicas burocráticas desde las cuales son pensados y agenciados estos cambios”. (Ob. Cit., 2011) [4]

La nueva Universidad debe estar comprometida con las comunidades, con el territorio en función de fortalecer el desarrollo endógeno e impulsar la participación colectiva y el poder popular. A fin de dar respuesta a las necesidades de formación y conocimiento requeridas por el Plan de Desarrollo Económico y Social de la Nación a fin de facilitar los objetivos de la universalización y la municipalización de la educación universitaria en el país. Asimismo, debe promover una formación humanista como aspecto fundamental para la formación integral del futuro profesional, sustentada en la integración de contenidos y experiencias dirigidas a la formación en el ejercicio de la ciudadanía democrática, la solidaridad, la corresponsabilidad, la construcción colectiva y la acción profesional transformadora con responsabilidad ética y perspectiva sustentable.

Para ello, debe tener una estrecha vinculación con las comunidades y el ejercicio profesional a lo largo de todo el proceso formativo; el abordaje de la complejidad de los problemas en contextos reales con la participación de actores diversos; la consideración de la multidimensionalidad de los temas y problemas de estudio; así como el trabajo en equipos interdisciplinarios y el desarrollo de visiones de conjunto, actualizadas y orgánicas de

los campos de estudio, en perspectiva histórica, y apoyadas en soportes epistemológicos coherentes y críticamente fundados (Misión Alma Mater) .

En este nuevo escenario mundial y regional de cambios, que busca la refundación social que ha venido rearticulando la vida social, la educación también debe refundarse sobre nuevos principios que tengan en cuenta la realidad actual con su diversidad, complejidad y contradicciones y su relacionamiento con el medio ambiente.

El nuevo sistema educativo debe formar individuos que sean capaces de enfrentar los problemas académicos-sociales desde dos niveles: 1) desde los llamados problemas globales, vinculados a la conciencia planetaria. En este sentido se trata de la construcción de una ciudadanía planetaria basada en el conocimiento de la interdependencia de todos los seres humanos y que sus acciones tendrán repercusión en el resto de los seres vivos y la naturaleza; y 2) es el nivel donde se inserta la nueva escuela, es el del contexto inmediato, lo local, es el espacio donde se siente el impacto de los problemas globales, por lo tanto, la nueva escuela se debe preocupar por la formación de educandos críticos conscientes de los factores que unen a nuestros pueblos y de las riquezas de su cultural.(Cuevas, 2012; 197) [5]

En este sentido debe entenderse la educación como un proceso que pretende transformar al hombre en ciudadano, con el fin de construir un pensamiento colectivo, generador de una nueva sociedad. La educación es una actividad condicionada por diversos factores que inciden en el sujeto, como: su crianza, sus valores, las relaciones interpersonales, sus posturas ideológicas entre otras, además dependiente de la existencia de otras actividades cognoscitivas previamente forjadas. Cabe destacar, que no se debe dejar de lado la influencia de la política asociada a la noción de Estado, su funcionamiento y las relaciones de poder social en el sistema educativo. De allí, que Lárez (2012) [6] señale que “la política develaría el papel del Estado, la separación de los poderes y las tensiones que genera

la lucha por el poder independientemente del grado de diferenciación y especialización de sus estructuras e instituciones...” (p. 12).

Es por ello, que la relación entre educación y la política, es que, la educación responde a la praxis política y ésta a su vez, está ligada necesariamente a la filosofía, y que lo mismo les ocurre a la filosofía y a la política con respecto a la educación. Por su parte, la filosofía es un saber complejo que debe estar institucionalizada, toda vez que se encuentra vinculada con la política y la educación. Tanto Platón como Aristóteles, conocidos pilares de la filosofía occidental vieron claro que el Estado necesitaba de la filosofía para ser justo y que la buena filosofía sólo se daría en un Estado justo. Es decir, la filosofía no es posible al margen de la educación. Tampoco existe una filosofía apolítica, no partidista y la política democrática no es posible sin ideas y sin filosofía. En base a lo anterior, se pueden establecer algunas relaciones entre política, educación y filosofía: 1) Es el Estado el que regula la enseñanza; 2) La formación del ciudadano está conectada con la filosofía y ésta, a su vez, es asunto del Estado y 3) El Estado puede determinar la existencia de la filosofía en la enseñanza, así como, la educación impartida en las instituciones educativas.

Las tres ideas Filosofía, Política y Educación se relacionan entre sí, pero es el Estado, lo político la determinante de las otras dos, y no a la inversa. Para ampliar la perspectiva de una nueva teoría educativa, es necesario desmontar la educación como un hecho formal, en donde el educando es sólo un receptor del conocimiento del educador, definida como educación bancaria por el pedagogo Paulo Freire. Por lo tanto, se deben romper las fronteras y empezar la construcción de una meta-teoría que replantee de manera reflexiva el rol del ser humano en la expresión más amplia de sus potencialidades creativas y afectivas confrontándolas con el debate político y la crítica asociada al quehacer cultural, rescatando al sujeto de las fronteras de las ciencias clásicas conocidas o disciplinarias sustentada en un sistema escolarizado.

En consecuencia, el nuevo rol del sujeto debe estar estrechamente vinculado a valores y debe servir de base para la construcción de una teoría educativa crítica y de acción. Al respecto, Oliva (2008) [7]

, señala que “la meta-teoría pretende expresar las estructuras profundas de las distintas ciencias que representan y coexisten en el mundo de la educación (...) y en su conjunto resultan esclarecedora de la acción social educativa, para lo cual es indispensable, sin duda alguna, la reflexión crítica” (p. 31). Por consiguiente, repensar el sistema educativo en su conjunto debería llevar a la construcción de un ser humano/ciudadano, crítico y reflexivo en una realidad histórico-cultural, social, económica y espacial, detectando situaciones que le permitan confrontar lo que es y lo que debería ser, en la búsqueda de la construcción de una educación en valores morales y cívicos que permita su emancipación, mediante el ejercicio cotidiano de la solidaridad, convivencia social, tolerancia, respeto a la familia, valorización del trabajo, conservación del ambiente, en resumen, una educación para la formación integral del ser humano.

Hacia una Universidad Socialmente Responsable

El concepto de Responsabilidad Social, llámese Empresarial y/o Universitaria, es una noción de gestión que se ha extendido a todo tipo de organizaciones. Aunque el término responsabilidad social se ha desarrollado mucho más en el sector empresarial, que cuenta en la actualidad con numerosos estándares (como las normas SA 8000, AA 1000, ISO, etc.), herramientas de gestión y una nutrida casuística en la materia. Sin embargo, la RSE no puede ser aplicada tal cual a las universidades. El criterio central que preside a esa nueva “manera de hacer” de las organizaciones se concreta en la posición y la función de cada organización con respecto a la Sociedad. En tal sentido como señala Pérez (2009) [8],

- En la valoración de la posición y la función de la Organización respecto a la Sociedad entran en juego criterios éticos, que niegan la

indiferencia de la Organización hacia los problemas y las personas de su entorno y plantean un nuevo patrón de relación de la organización con su entorno social y natural, basado en la reciprocidad y la interdependencia.

- La relación de la Organización con la Sociedad se identifica a través de sus efectos, repercusiones o impactos en diversos ámbitos: el económico, el de las personas (ámbito social y laboral) y el medioambiental. La identificación de estos ámbitos de desarrollo de la gestión socialmente responsable permite la conexión de la RC, en general, y de la RSE, en particular, con los actuales debates de principios de siglo sobre la sostenibilidad económica y ambiental y el manejo de los efectos negativos de la globalización.

- La puesta en práctica de iniciativas de responsabilidad social en la actividad de las organizaciones es una decisión unilateral y voluntaria de las mismas, con la que se asumen compromisos – ante sus propios miembros y ante la Sociedad en general – que van más allá de las obligaciones legales a las que esté sujeta la organización.

- La Responsabilidad Corporativa es un concepto suficientemente desarrollado tanto en la teoría como en la práctica, lo que permite su aplicación a todo tipo de organizaciones que quieran redefinir su posición y su relación con la Sociedad a la que sirven y de la que forman parte. De ahí que sea ahora aplicable también a la Universidad (Pp.5-6).

Para lograr una efectiva aplicación de la Responsabilidad Social, tanto las empresas como las universidades deben romper con el paradigma del trabajo altruista, de voluntariado que conduce sólo en un relacionamiento asistémico con la sociedad. Como sostiene Vallaeys. (2009) [9].

“La RSU propone además transformar a la universidad y su entorno social en laboratorios para aprender, enseñar, investigar e innovar: por un lado, un campus responsable representa un excelente laboratorio interno para desarrollar investigaciones socialmente responsables, al mismo tiempo que constituye

un modelo ejemplar de coherencia institucional para la formación ética de los estudiantes. Por otro lado, los diversos programas sociales en comunidad constituyen el lugar ideal para la formación profesional y ciudadana y para darle a la enseñanza la significación de servicio solidario que le falta en las aulas. Asimismo, dichos programas sociales permiten vincular estrechamente las demandas sociales de innovación para el desarrollo con la generación y gestión del conocimiento especializado en forma socialmente pertinente” (p.15).

La noción de Responsabilidad Social en el ámbito universitario debe articular todas las partes orgánicas de la Universidad, incluyendo en una misma estrategia de gestión a la administración en cuanto a la docencia, la investigación y la extensión, la cual comprende todos los demás servicios universitarios vinculados con el entorno social (servicios de consultoría, asesorías, asociaciones, y proyección social, oficina de comunicación institucional, etc.); lo cual dista mucho del modelo de proyección social voluntaria que solo abarca al cuarto rubro de los impactos (Martínez, 2011) [10].

Cabe destacar, que la noción de responsabilidad social es un área todavía en construcción, pero goza ya de un protagonismo notable entre organizaciones y empresas. No obstante, esta tendencia ha llegado a las universidades, que empiezan a rendir cuentas de los impactos de su misión de formación, investigación y participación en la sociedad. Hay en la actualidad muchas expectativas, pero todavía se muestra un largo camino para romper con el viejo paradigma del claustro académico. Corresponde a la educación y al subsistema de educación universitaria crear los espacios para la construcción de ciudadanía en y desde la interacción con la comunidad.

La Responsabilidad Social Universitaria debe verse desde una visión holística de la gestión integral de las instituciones de educación superior, pero además debe verse como un potenciador de

los elementos sociales del desarrollo sostenible (económico, socio-cultural y ambiental).

VI. CONCLUSIONES

En este nuevo escenario, de cambios en América Latina, en general y Venezuela en particular, busca la refundación social que ha venido rearticulando la vida social, la educación también debe refundarse sobre nuevos principios que tengan en cuenta la realidad actual con su diversidad, complejidad y contradicciones y su relacionamiento con el medio ambiente.

Es por ello que se hace necesario dilucidar nuevos horizontes discursivos que permitan superar el sistema educativo formal atrapado por un tecnicismo pedagógico desprovisto de base cultural y dimensión humana.

Uno de los desafíos que enfrenta la educación actual es la lucha contra la desigualdad social en un panorama, multicultural y multiforme geográficamente. Por lo tanto debe contribuir a fortalecer una conciencia social a fin de apostar por una sociedad donde la equidad sea uno de sus valores fundamentales.

Es urgente procesar científica y filosóficamente los supuestos éticos del hecho educativo con el fin de proporcionar conocimientos, habilidades y actitudes para la emancipación individual y colectiva en la actual sociedad globalizada.

A pesar de lo novedoso de la noción de Responsabilidad Social en el ámbito Universitario este aporta un importante mecanismo de comunicación con la sociedad.

La Responsabilidad Social Universitaria, debe ir más allá de las tres funciones sustantivas que son la docencia, la investigación y la extensión, y de confiar a esta última la tarea de vincular a la universidad con la sociedad. Son los cuatro procesos, gestión, formación, producción de conocimientos y participación social, los que constituyen la función social universitaria.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Méndez, E. (2000). Gerencia Académica. Maracaibo: Ediluz, Segunda Edición.
- [2] Morín, E. (1999) Los Siete Saberes Necesarios para la Educación del Futuro, UNESCO, Francia.
- [3] Fergusson, A. y R. Lanz (2011). La Transformación Universitaria y la Relación Universidad-Estado-Mundo, Observatorio Internacional de Reformas Universitarias Orus-Ve-UCAB, Caracas. (Recuperado en http://www.ucab.edu.ve/tl_files/Home-Images/noticias/)
- [4] Fergusson, A. y R. Lanz (2011). La Transformación Universitaria y la Relación Universidad-Estado-Mundo, Observatorio Internacional de Reformas Universitarias Orus-Ve-UCAB, Caracas. (Recuperado en http://www.ucab.edu.ve/tl_files/Home-Images/noticias/)
- [5] Cuevas, R.(2012) Refundar la Escuela, Refundar la Sociedad, Refundar la Vida, en A refundar la Escuela, Ediciones Olejnik, Chile.
- [6] Lárez, R. (2012) Una Reflexión Sobre la Educación y la Praxis del Saber Social en el Porvenir, en A Refundar la Escuela, Ediciones Olejnik, Chile.
- [7] Oliva, E. (2008). Meta-Teoría de la educación como meditación filosófica: sentido e importancia. Revista de filosofía y socio política de la educación. Numero 8/año 4/2008.
- [8] Pérez, F. (2009) La Responsabilidad Social Universitaria (RSU). Consejo Social de la Universidad de Huelva-España.
- [9] Vallaey, F. et al (2009) Responsabilidad social universitaria Manual de primeros pasos, Banco Interamericano de Desarrollo. <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=35125786>
- [10] Martínez, C., (2011) Responsabilidad Social Universitaria y su Articulación con las Funciones Docencia-Investigación-extensión para su Vinculación con el Entorno Social.

Elaboración de un Modelo Electro-Conductivo para una Malla de Puesta a Tierra usando el Método de Elementos Finitos

Rodríguez, Adra¹., Sanzonetty, Elizabeth¹., Rojas, Francisco¹., y Jiménez, Oswaldo².

rodriguezadra@gmail.com, ecsa26@gmail.com, frojashdez37@gmail.com,
oswjig2000@gmail.com,

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Vice-Rectorado
Puerto Ordaz¹, Universidad Nacional Experimental de Guayana².

Resumen: Usando el Método de Elementos Finitos (MEF), con el programa comercial ANSYS, se logró realizar un modelo electro conductivo para una malla de puesta a tierra similar al de la Sub Estación Planta de ELEBOL de Ciudad Bolívar. Los resultados de la simulación mostraron que dicho software es una herramienta computacional versátil para el sistema estudiado, porque ofrece la ventaja de observar la distribución del potencial eléctrico en toda la superficie del terreno, además se pueden variar parámetros como las propiedades conductivas del terreno (efecto del agua sobre el terreno), la presencia de conductores y evaluar y comparar las variaciones de los voltajes de paso y de toque en cada zona del terreno. Los resultados fueron validados con el estándar 80-2000 de la IEEE, y otra herramienta computacional como el ETAP.

Palabras clave: Malla de puesta a tierra, Método de Elementos Finitos, voltaje de contacto, voltaje de paso.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de puesta a tierra (SPT) eliminan las corrientes de falla que se presenten en el sistema eléctrico de potencia que se esté trabajando, desvían hacia el suelo los potenciales originados por diversos fenómenos como electricidad estática, descargas atmosféricas, sobretensiones de falla, entre otras. El diseño de un SPT debe suministrar los medios para trasladar las corrientes eléctricas hacia la tierra bajo circunstancias normales y de falla, sin exceder algún límite de operación o de equipo sin afectar adversamente la continuidad del servicio, además de asegurar que las personas en el área no estén expuestas al peligro de descargas eléctricas críticas.

Para la protección contra sobretensiones en las subestaciones, lo más importante es contar con una red o malla de puesta a tierra (MPT) adecuada, a la cual se conectan el neutro de los aparatos, los pararrayos, los cables de guarda, las estructuras y todas aquellas piezas metálicas que deben estar a potencial de tierra.

El avance tecnológico en los últimos años ha

permitido el desarrollo de modelamientos del SPT, aportando una disminución en costos y un ahorro significativo en el tiempo empleado para la elaboración del diseño, el procedimiento matemático más usado es el Método Simplificado de la Norma IEEE Std 80-2000 [1], además de las herramientas computacionales, tales como: ETAP, CDEGS, CYMGRD, entre otros, los cuales presentan simulaciones en 2D y 3D de un sistema. Tanto el método como los programas permiten ver resultados óptimos del diseño de la MPT y el comportamiento de la misma cuando es sometida a situaciones críticas.

En esta investigación se incorporó una herramienta matemática para la realización de una simulación computacional de la MPT usando el Método de Elementos Finitos (MEF), con el programa ANSYS y así, permitir evaluar el comportamiento de la tensión en los electrodos y el suelo, a fin de garantizar la dispersión de la corriente de falla a tierra para mantener la continuidad del suministro confiable de energía eléctrica, la vida útil de los equipos y principalmente la vida de las personas.

II. DESARROLLO

A. Descripción del SPT de la Subestación Planta

La subestación Planta ubicada en Ciudad Bolívar, Estado Bolívar, Venezuela, suministra energía eléctrica a 6 circuitos de las principales zonas de la ciudad, es alimentada por un nivel de tensión de 34.5 kV proveniente de la subestación Bolívar la cual se encuentra a una distancia de 21 km.

En la Figura 1, se presenta el diagrama unifilar de la subestación planta. Esta es alimentada por dos líneas de transmisión de 34.5 kV las cuales energizan los transformadores 34.5 kV/ 13.8 kV de 20 MVA cada uno. La subestación planta cuenta con ocho salidas de distribución de las cuales 6 están activas [2].

En la Tabla I, se describen los equipos más relevantes para el funcionamiento de la Subestación Planta los cuales están conectados a la MPT.

TABLA I
DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS MÁS RELEVANTES EN EL FUNCIONAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN PLANTA

Tipo de Equipos	Descripción Técnica de los Equipos	
Transformadores Tx1 Tx2	Marca	Pauwels trafo
	Numero	99. 2.4287
	Año	2003
	Potencia	20 MVA
	Frecuencia	60 Hz
	Peso	25700 kg
	Conexión	Dyn11
Interruptor de Alta Tensión	Marca	Siemens
	Tipo	Vs 30027 [d2]
	Frecuencia	60 Hz
	Ubicado	ALTA TENSION 34.5 kV
Interruptor de Baja Tensión	Marca	Holec middenspaning
	Numero	360190
	Frecuencia	60 Hz
	Ubicación	BAJA TENSION 13.8 kV

A continuación en la Figura 2, se muestra el pórtico tipo presente en el lado de alta y baja tensión en la subestación.

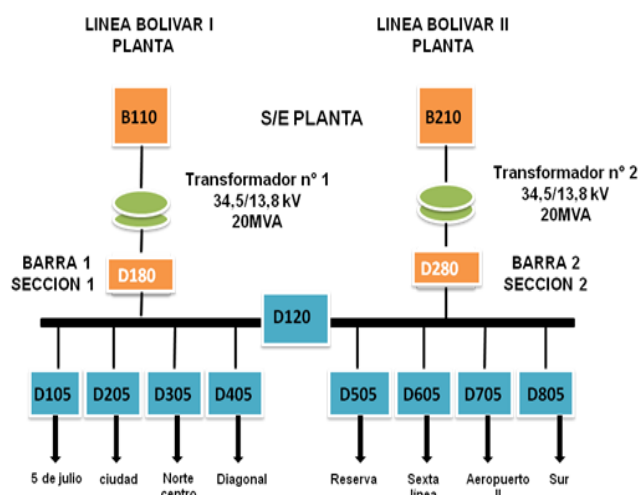


Figura 1. Diagrama Unifilar de la Subestación Planta
Fuente: La electricidad de Ciudad Bolívar.



Figura 2. Pórtico presente en el lado de alta tensión
Fuente: La Electricidad de Ciudad Bolívar.

El SPT cuenta con un conductor de cobre blando trenzado desnudo de calibre 2/0 AWG tanto en su electrodo como en sus derivaciones, enterradas en zanjas. Posee unas barras cobrizadas por electro deposición (similar a la conocida como Copperweld), de 3/4 de pulgada diámetro y 10 pies (3.05 m) largos. Todas las conexiones necesarias para unir partes del electrodo y sus derivaciones son exotérmicas marca CADWELD o similar.

B. Criterios de Diseño de la MPT

Los criterios básicos para el diseño de la MPT de una subestación eléctrica están determinados por:

1. La seguridad de las personas y de los animales que pueden tener contacto con elementos de la instalación o que pueden encontrarse en la vecindad de ésta.

2. Minimizar el alza de potenciales en la red, para la protección de los equipos de comunicación y control ubicados en la instalación.

3. Mantener las tensiones de paso y de toque por debajo de los valores máximos tolerables, para brindar confiabilidad del diseño propuesto.

La tensión de paso se refiere a la diferencia de tensión en la superficie, experimentada por una persona con los pies separados a una distancia de un metro y sin estar en contacto con ningún objeto puesto a tierra. La tensión de toque se refiere a la diferencia de tensión entre la tensión transferida (GPR) y la tensión en la superficie en la que una persona tiene sus manos en contacto con una estructura puesta a tierra [3].

Los peligros a que se someten las personas y los animales están relacionados con los voltajes de toque, de paso y de GPR durante la presencia de fallas en el sistema eléctrico. La protección del equipo de comunicación y de control dependerá de la máxima elevación de potencial de la red. En general, el sistema de conexión a tierra deberá diseñarse para:

1. Limitar la elevación de potencial del sistema de puesta a tierra de la subestación a valores aceptables para cualquier condición de falla en el sistema eléctrico.

2. Controlar los voltajes de toque, de paso y de GPR dentro y fuera de las instalaciones a valores inferiores a los de electrocución.

Hernández [4] propuso un diseño de la MPT de igual separación en los conductores, una piedra picada de 3.4", y espesor de la capa de piedra picada de 0.1 m con resistividad eléctrica promedio que oscila entre 2500-3000 Ωm . La malla enterrada a una profundidad de 0.5 m con respecto a la

superficie del suelo, con un reticulado de 10x10 m² para cubrir un área de 100 x 100 m², por lo tanto, la geometría de la MPT propuesta tiene forma cuadrada, cuyo conductor perimetral está a un metro separado de la cerca metálica que rodea la subestación. El modelo de la MPT está conformado por 11 varillas ubicadas a una distancia de 36.36 m entre ellas, en el perímetro del terreno cuadrado de 100 m x 100 m; es importante mencionar que las barras horizontales se cruzan cada 10 m.

A razón de la propuesta planteada y los datos suministrados por [2] se procedió a realizar una comparación entre los valores obtenidos con el programa ETAP, los calculados con la norma [1] y los simulados con el Software ANSYS.

C. Cálculos basados en la Norma IEEE Std 80-2000

El calibre del conductor y los parámetros necesarios para el diseño de la MPT se determinan por medio de las ecuaciones contenidas en [1], [5]. La corriente de falla, I_{cc} , debe ser la corriente máxima esperada en la red, la cual fluirá por los conductores del SPT en un periodo de tiempo determinado, t_c .

De acuerdo al estudio de cortocircuito que realizó el departamento de protecciones eléctricas de la compañía ELEBOL se consideró $I_{cc} = 8.6$ kA como la máxima corriente de falla que pudiera originarse en la S/E Planta.

A continuación en la Tabla II se muestran los valores del conductor de cobre recocido, material que se utilizó para la conformación de la MPT.

TABLA II DATOS ESPECÍFICOS DEL COBRE SUAVE RECOCIDO	
Descripción	Valores del cobre suave recocido
Conductividad [%]	100.0
α_r a 20 °C [1/°C]	0.00393
k_0 a 0 °C	234
T_m [°C]	1083
ρ_c a 20 °C [$\mu\Omega/\text{cm}^3$]	1.7241
Factor $TCAP$ [$\text{J}^\circ\text{C}/\text{cm}^3$]	3.422

La Ecuación (1) calcula la sección transversal del conductor:

$$A_c = I_{cc} \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (1)$$

donde:

A_c : Sección transversal del conductor, mm².

I_{cc} : Corriente de cortocircuito, kA.

t_c : Tiempo de despeje de falla, s.

$TCAP$: Factor de capacidad térmica, J/cm³.°C.

α_r : Coeficiente térmico de resistividad a 20 °C

ρ_r : Coeficiente de conductividad del conductor a 20 °C.

K_0 : Inverso del coeficiente térmico.

T_m : Temperatura máxima permisible por el conductor, °C.

T_a : Temperatura ambiente, °C.

Resultando la sección del conductor igual a 21.576 mm². Usando la tabla de características de los materiales conductores de cobre desnudos, se seleccionó un conductor trenzado tipo "B", calibre 2 AWG; sin embargo, para cumplir con los estándares ELEBOL a fin de lograr una mayor resistencia mecánica y resistencia a la corrosión, se utilizó el calibre 4/0 AWG el cual tiene una sección de 107.2 mm².

Para el diseño se consideró una resistividad de puesta a tierra de 400 Ωm [4], y de 3000 Ωm para la piedra picada de 0.1 m de espesor.

La Ecuación (2) calcula el factor de reducción que depende del espesor de la capa superficial (piedra picada) de la superficie de la subestación.

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 h_s + 0,09} \quad (2)$$

donde:

C_s : Factor de reducción que depende del espesor de la capa superficial de la subestación.

ρ : Resistividad del terreno.

ρ_s : Resistividad de la capa de acabado de la superficie (piedra picada).

h_s : Espesor de la capa superior.

El factor de reducción obtenido para el diseño propuesto fue de 0.731, el cual se consideró para determinar las tensiones de toque y de paso, dadas por las Ecuaciones (3) y (4), respectivamente, para un peso estimado de 70 kg.

$$E_{t(70kg)} = (1000 + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

$$E_{p(70kg)} = (1000 + 6 C_s \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (4)$$

donde:

$E_{t(70Kg)}$: Tensión de toque.

$E_{p(70Kg)}$: Tensión de paso.

t_s : tiempo de duración del choque.

En esta investigación se asumió que el tiempo de duración del choque, t_s , es el mismo que el tiempo de despeje de la falla t_c .

Tomando en cuenta las dimensiones del diseño, se determinó una longitud efectiva, L , de la MPT de 2236.3 m, y mediante la Ecuación (5) se obtuvo el valor de la resistencia de puesta a tierra.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20 A_m}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{20 / A_m}} \right) \right] \quad (5)$$

donde:

R_g : Resistencia de tierra de la subestación Ω.

A_m : Área ocupada por la MPT, m².

h : Profundidad de enterramiento de la malla, m.

L : Longitud efectiva de la MPT, m.

En el cálculo de la Ecuación (5), se obtuvo una resistencia de tierra de 1.95 Ω. Para determinar la corriente simétrica de la malla se utilizó la Ecuación (6).

$$I_g = I_f \cdot S_f \quad (6)$$

donde:

I_g : Corriente simétrica de la malla.

$I_f = I_{cc}$: Corriente de falla, kA.

S_f : Factor del divisor de corriente de falla.

El factor de divisor de corriente de falla, S_f , se calculó determinando la magnitud de la

impedancia de tierra utilizando la Tabla C1 de [1] a través de la Ecuación (7).

$$S_f = \left| \frac{Z_{eq}}{R_g + Z_{eq}} \right| \quad (7)$$

donde:

Z_{eq} : Impedancia equivalente aproximada de las líneas de transmisión y las de distribución, Ω .

En la Figura 1 se observa que la subestación consta de dos líneas de transmisión con puesta a tierra en las torres de 15 Ω y 8 líneas de distribución con una puesta a tierra de 25 Ω . De acuerdo a estos parámetros el valor encontrado con la Ecuación (7) fue de 0.085. Con este valor se encontró la corriente simétrica de malla la cual fue de 738.09 A.

La corriente máxima de la malla se determinó con la Ecuación (8).

$$I_G = I_g D_f C_p \quad (8)$$

donde:

D_f : Factor de decremento para tener en cuenta la componente DC.

C_p : Factor de crecimiento futuro de la corriente de falla de la subestación.

Para una razón $X/R=10$, a partir de la Tabla 10 de [1], se obtuvo un valor $D_f = 1.026$, y teniendo en cuenta la capacidad total de la subestación sin aumentos futuros de carga ni de alimentadores se asumió $C_p = 1$.

La tensión transferida GPR, se determinó mediante la Ecuación (9):

$$GPR = I_G R_g \quad (9)$$

Si $GRP > E_{p(70Kg)}$ se procede a calcular la tensión de retícula, E_m , la cual representa la máxima tensión de toque encontrada en un lazo o retícula de una MPT y la tensión real de paso, E_p [3]. Estos parámetros se determinan a través de las Ecuaciones (10) y (11).

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} \quad (10)$$

$$E_p = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{L_s} \quad (11)$$

donde:

K_m : Factor de geometría para tensiones de retícula.

K_i : Factor de irregularidad.

L_M : Longitud efectiva enterrada para tensión de retícula, m.

K_s : Factor de geometría para tensiones de paso.

L_s : Longitud efectiva enterrada para tensión de paso, m.

Considerando los criterios de diseño, se obtuvieron los parámetros mencionados anteriormente, tal como se presentan en la Tabla III.

TABLA III
PARÁMETROS OBTENIDOS PARA DETERMINAR LAS TENSIONES DE DISEÑO DE PASO Y DE RETÍCULA

Parámetro	Valor Obtenido
K_m	0.849
K_i	2.124
K_s	0.380
L_M	2057.298
L_s	1530.885

D. Simulación de la MPT con ETAP

En la Tabla IV se muestran los datos obtenidos a través de la documentación de una propuesta ya existente [4], se procedió a simular la MPT.

TABLA IV
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL SPT PROPUESTO PARA LA SUBESTACIÓN PLANTA

Características eléctricas del SPT
Máxima corriente de falla (I_f) = 8.6 kA
Tiempo máximo de despeje de la corriente de falla (t_c) = 0.5 s
Factor de divisor de corriente (S_f) = 0.085
Resistividad del suelo (ρ) = 400 Ω . m
Resistividad de la piedra picada (ρ_s) = 3000 Ω . m
Espesor de la capa de piedra picada (h_s) = 0.10 m
Profundidad de colocación de los conductores de la malla = 0.50 m
Área disponible para la malla de tierra (A) = 100 m x 100 m

A continuación en las Figuras 3 y 4 se observa el comportamiento de los voltajes de paso y de toque.

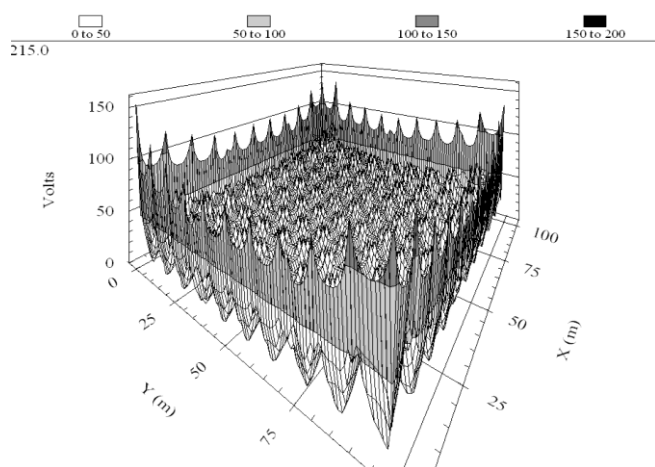


Figura 3. Gráfica del comportamiento de la tensión de paso.

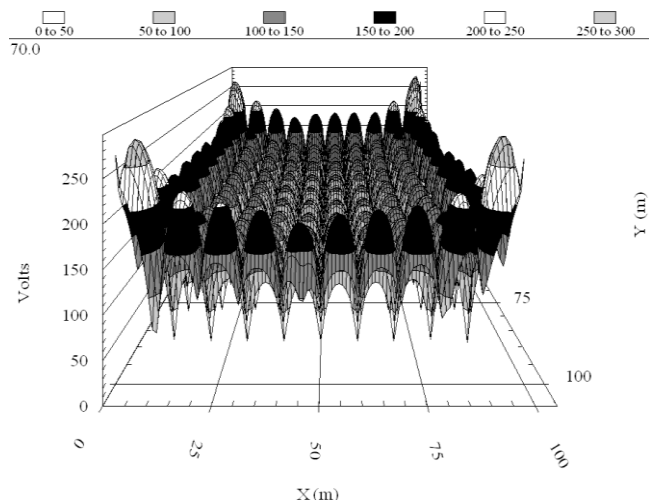


Figura 4. Gráfica del comportamiento de la tensión de toque.

En la Figura 3 se obtuvo un pico máximo de tensión de paso de 155.1 V, y en la Figura 4 una tensión máxima de toque 258.9 V.

En la Tabla V, se presentan los valores de la tensión de toque, de paso y la tensión tolerable obtenidos por ETAP.

TABLA V
VALORES DE TENSIÓN OBTENIDOS POR ETAP

Tensión de Toque	Tensión Tolerable
258.9	952.4
Tensión de Paso	Tensión Tolerable
155.1	3143.7
Tensión GPR	
1468.7	

En la Figura 5 se muestra la MPT obtenida por el programa ETAP.

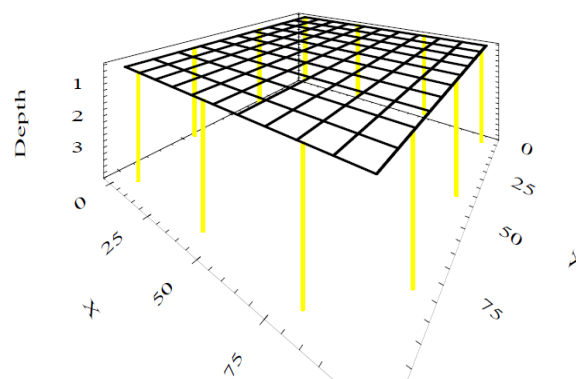


Figura 5. Modelo de la MPT en 3D.

A continuación en la Tabla VI se exponen los resultados obtenidos basados en la Norma [1] y el software ETAP.

TABLA VI
COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS BASADOS EN LA NORMA [1] Y ETAP

Parámetro	IEEE STD 80-2000	ETAP
$E_{t(70)}$	952.44	952.40
$E_{p(70)}$	3143.66	3143.70
R_g	1.95	1.95
GPR	1475.30	1468.70
E_m	261.61	258.90
E_p	155.75	155.10

E. El Modelo usando MEF

En un trabajo previo [6] se simuló un modelo en 3D con ANSYS, para un STP real y se obtuvieron resultados igualmente apropiados tanto para bajas y altas frecuencias, como para estados estables y

transitorios.

Cabe destacar que en este trabajo el estudio en ANSYS es electroconductivo y las corrientes son aproximaciones estáticas a bajas frecuencias (60 Hz).

Para la simulación de la distribución de potencial eléctrico, el programa resuelve numéricamente la Ecuación (12) por medio del MEF.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (12)$$

donde σ es la matriz de conductividad eléctrica dada por la Ecuación (13)

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (13)$$

A partir de los datos suministrados por la empresa ELEBOL, los valores obtenidos bajo los criterios de diseño y cálculos manuales basados en [1], y la simulación en ETAP, se obtuvo un modelo en 3D usando la herramienta computacional ANSYS. En la Figura 6 se muestra el modelo elaborado de la MPT desarrollado por [7].

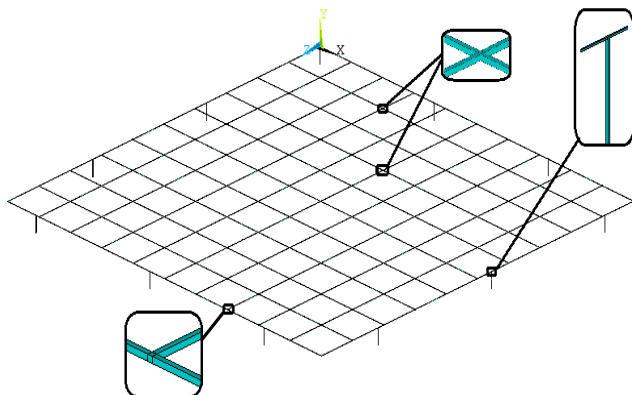


Figura 6. Modelo de la MPT elaborado en ANSYS.

En esta investigación se realizó la simulación con un cuarto del modelo mostrado en la Figura 6, ya que el equipo utilizado para realizar el proyecto (procesador I7 con 12 GB de memoria RAM) resultó insuficiente para desarrollar los cálculos debido a la complejidad geométrica. La suma de toda la data de la corrida del programa ocupó un espacio de 50 GB, lo cual ameritó el uso del 98 por ciento de memoria RAM disponible.

La Figura 7 muestra un cuarto de la MPT modelada donde la geometría de color rojo representa la piedra picada, el color morado la tierra, y se observa la malla incrustada a 0.5 m dentro de la tierra.

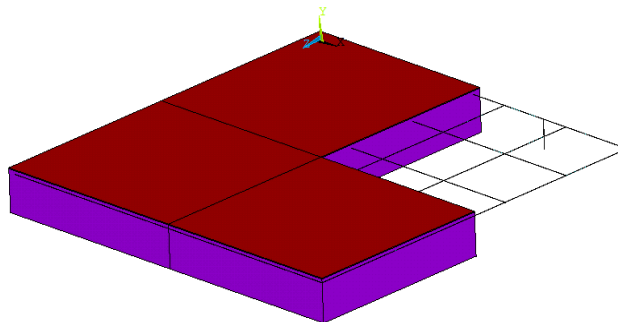


Figura 7. Un cuarto de la MPT detallando la geometría de la piedra picada y la tierra.

La Tabla VII señala las propiedades de los materiales asignadas al modelo.

TABLA VII
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES ASIGNADAS AL MODELO

Propiedades de los materiales
Densidad del cobre: 8960 kg/m ³
Resistividad del cobre: 1.71 x 10 ⁻⁸ (20°C a 25°C) (Ω.m)
Resistividad de la piedra picada: 3000 (Ω.m)
Resistividad del suelo (ρ) = 400 Ω m

En la Figura 8 se presenta el modelo discretizado.

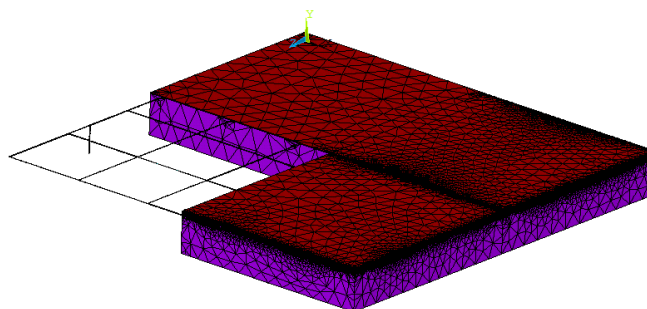


Figura 8. Modelo discretizado de la MPT.

F. Resultado de la Simulación a través de MEF con ANSYS

En la Figura 9 se presenta la distribución de tensión obtenida en el modelo. Se observa que los valores más altos de tensión se concentran en las retículas y los electrodos de la MPT y estos se

disipan hacia el fondo de la tierra.

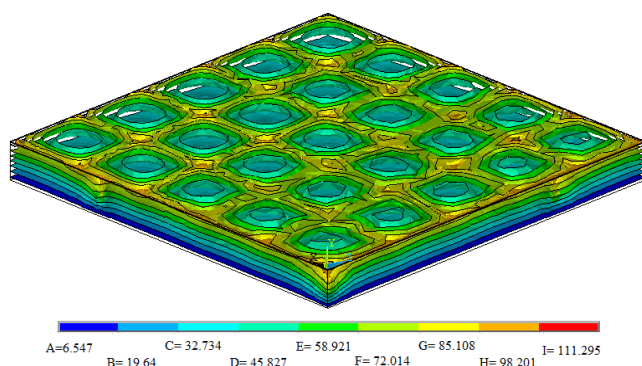


Figura 9. Distribución del gradiente de potencial eléctrico.

En la Figura 10 se muestra una vista diagonal del perfil de tensión en el modelo.

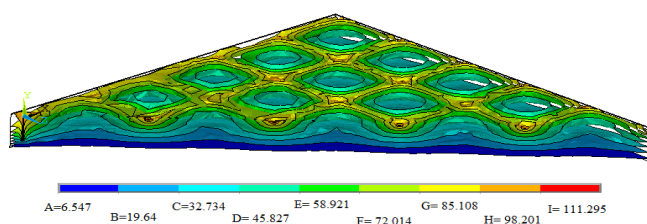


Figura 10. Vista transversal de la distribución del gradiente de potencial eléctrico.

A continuación en la Figura 11 se presenta una gráfica que describe el comportamiento de la tensión en la superficie del modelo. Se obtuvo una tensión de toque de 90.792 V y una tensión de retícula estimada de 51.803 V.

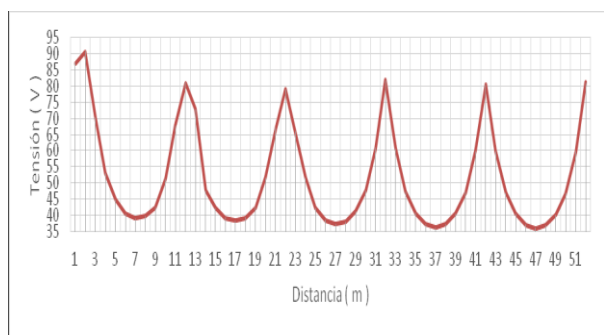


Figura 11. Perfil de tensión en la superficie del modelo.

El programa ANSYS ofrece la ventaja de observar la distribución del potencial eléctrico en

la superficie o en cualquier capa del terreno a través de los cortes transversales del mismo. De esta manera se puede determinar con suficiente precisión cuales son los voltajes de paso en cada sitio del terreno. También, para estudios futuros se pueden variar las propiedades conductivas del terreno y evaluar las variaciones de las tensiones de paso y de toque.

G. Comparación de Resultados del Modelo diseñado en ANSYS con ETAP

A través del módulo MEF contenido en el software ETAP se realizó la simulación utilizando los mismos criterios presentes en el modelo elaborado con ANSYS. En la Figura 12 se observa el modelo de un cuarto de la MPT.

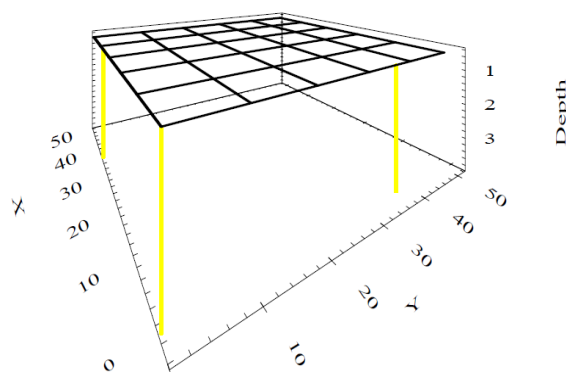


Figura 12. Un cuarto de la MPT elaborada en el software ETAP.

En las Figuras 13 y 14, se muestra el comportamiento de las tensiones de toque y de paso.

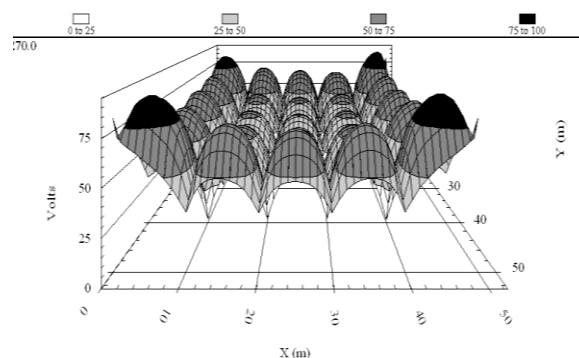


Figura 13. Tensión de toque para el modelo de un cuarto de malla.

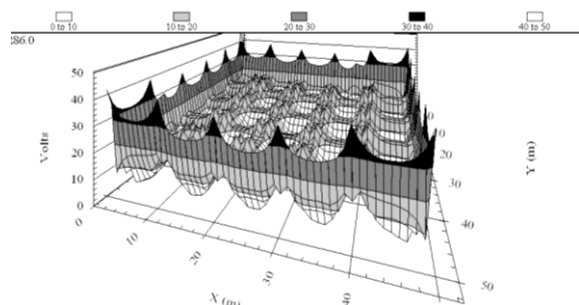


Figura 14. Tensión de paso para el modelo de un cuarto de malla.

En la Tabla VIII se realiza la comparación de las tensiones de toque y de paso obtenidas por los programas ANSYS y ETAP y los determinados para este diseño a través de [1].

TABLA VIII

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES

Tensiones (V)	ANSYS	ETAP	IEEE STD 80-2000
E_m	90.792	91.0	86,52
E_p	51.893	48.2	46,70

Para todos los diseños estudiados anteriormente se cumple que $E_m \leq E_{T(70Kg)}$ y $E_p \leq E_{p(70Kg)}$ por lo tanto las MPT (malla completa y cuarto de malla) cumplen con los estándares establecidos en [1].

III. CONCLUSIONES

En el modelo de malla completa, los errores porcentuales entre ETAP y la norma [1] difieren en un 0.45% para la tensión GPR, 1.04% para la tensión de retícula, E_m , y 0.42% para la tensión real de paso, E_p .

En el modelo de un cuarto de malla, los errores porcentuales entre ETAP y la norma [1] difieren 5.18% para E_m y 3.21% para E_p . Los obtenidos entre ANSYS y [1] fueron de 4.94% para E_m , y 11.12% para E_p .

En todos los modelos estudiados se cumplen los requisitos exigidos por la norma [1], donde la tensión de retícula debe ser menor a la de toque tolerable para un peso de 70 kg, y la tensión de paso debe ser menor a la tensión de paso tolerable para un peso de 70 kg, es decir: $E_m \leq E_{T(70Kg)}$ y $E_p \leq E_{p(70Kg)}$.

El perfil de tensión obtenido en la simulación de ANSYS tuvo un comportamiento esperado, donde el máximo valor de tensión se concentra en el conductor y se disipa a lo largo del terreno hasta llegar al punto de potencial cero (fondo de la tierra) lo cual cumple con los estándares de seguridad establecidos en los criterios de diseño.

Los resultados obtenidos a partir del modelo simulado con ANSYS son muy precisos, ya que ofrece la ventaja de observar la distribución del potencial eléctrico tanto para el sistema de puesta a tierra como para el terreno, y muestra cómo se distribuye de manera exacta los niveles de tensión en toda la estructura, sin importar el punto donde se alimente, haciendo una simbiosis con el tipo de terreno y el material del mallado.

IV. REFERENCIAS

- [1] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Std 80-2000, 2000.
- [2] ELEBOL, "Estudio de Cortocircuito para la Subestación "Planta" de la Electricidad de Bolívar ubicada en Ciudad Bolívar, estado Bolívar". No publicado.
- [3] C. F. Ramírez. "Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión". Ed. Mejía Villegas, S.A., 2003, pp. 543–600.
- [4] H. Hernández. "Diagnóstico y Rediseño del Sistema de Puesta a Tierra de la Subestación Eléctrica "Planta" de 34.5/13.8 Kv en Ciudad Bolívar – Estado Bolívar, en Régimen Permanente Según la Norma IEEE 80-2000". Tesis de Grado, Dpto. Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", Vice-Rectorado Puerto Ordaz, 2010.
- [5] J. S. Ramírez y E. A. Cano. "Sistemas de Puesta a Tierra: Diseñando con IEEE-80 y Evaluado con MEF". Ed. Blanecolor Ltda., 2010, pp. 23–48.
- [6] International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11) (Consulta en febrero, 2015). "Grounding system impedance characterization using FEM". Disponible en www.icrepq.com/crepq'11/353-bueno.pdf
- [7] O. Jiménez. "Determinación de una Malla a Tierra a través del Método de los Elementos Finitos". Tesis de Grado, Dpto. Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", Vice-Rectorado Puerto Ordaz, 2012.

Evaluación de la porosidad de un recubrimiento cuproníquel mediante técnicas potenciodinámicas y análisis de imágenes

Gutiérrez, Natasha., Boet, Luisa.

natashagutierrez84@gmail.com, eleteboet@gmail.com

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”.
(UNEXPO)

Resumen: Los recubrimientos depositados por electrodeposición poseen poros y otros defectos estructurales propios de las condiciones a las que son aplicados; por lo tanto, es importante determinar si a pesar de estos defectos, los recubrimientos protegen al sustrato de los efectos nocivos de la corrosión. En esta investigación se depositó un recubrimiento de una aleación de cobre-níquel sobre sustratos desnudos de latón, mediante la técnica de electrodeposición, y se estudió su capacidad de proteger al sustrato contra efectos corrosivos.

Además se midió la resistencia eléctrica de poro de un recubrimiento electrolítico cuproníquel a partir de técnicas potenciodinámicas y se determinó el grado de porosidad de un recubrimiento electrolítico cuproníquel mediante análisis de imágenes digital IMAJE J.

Los resultados obtenidos permiten establecer que los recubrimientos obtenidos proporcionan una buena capacidad protectora, ya que estos poros no se encuentran interconectados.

Palabras clave: Aleación, Porosidad, Electrodeposición Recubrimiento.

I. INTRODUCCIÓN

Investigaciones más avanzadas y el desarrollo de la ingeniería de superficies y especialmente de procesos como el rociado térmico, electroless, anodizado, fase-vapor y electrodeposición, se ha podido depositar recubrimientos de aleaciones especiales y de materiales cerámicos, los cuales están compuestos por capas que se depositan sobre un sustrato desnudo con el propósito de mejorar sus propiedades o de restaurar sus dimensiones. Estos recubrimientos han resultado ser una alternativa técnica y económicamente favorable para la solución de problemas de desgaste, corrosión, corrosión – erosión, corrosión a alta temperatura y daños por hidrógeno entre otros.

Las aleaciones cuproníqueles, es un tema bastante extenso y ya en varias ocasiones han realizado muchos estudios para su aplicación a nivel industrial ya que presenta excelente resistencia a la corrosión. El níquel tiene un radio atómico próximo a la de cobre, y níquel es también FCC y similar a la química del cobre. No es de extrañar, por lo tanto, para descubrir que el cobre y el níquel se disuelven completamente uno en el otro [1].

La resistencia a la corrosión es proporcionada por una capa depositada en el producto de reacción y este varía de acuerdo con la aleación y la composición de la solución electrolítica, y las propiedades de espesor y eléctricos [2].

En este caso se realizó un recubrimiento a cuatro lochas de latón donde la película protectora fue una aleación de cobre y níquel, donde este recubrimiento fue depositado sobre la superficie del latón (sustrato), efectuando la técnica de electrodeposición.

Chen [3] indica que porosidad es prácticamente inevitable. En consecuencia, la corrosión localizada puede ocurrir en los sitios de micro-defectos que alcanzan el sustrato en la película del recubrimiento, y puede causar un significativo recorte del recubrimiento y el resultado la falla del material. En este caso, la presencia de incluso un ligero micro-porosidad reduciría considerablemente la vida útil de los revestimientos, especialmente en ambientes agresivos. Por lo tanto, la porosidad de recubrimientos debe ser capaz de ser evaluado cuantitativamente para estimar su rendimiento.

Pruebas de porosidad proporcionan el número de poros por unidad de superficie de revestimiento o el

área del sustrato expuesto a través de poros expone Banczek [4].

Los métodos de evaluación de la porosidad se pueden dividir en dos tipos:

(I) métodos en los que los poros individuales se determinan por agentes físicos-químicos, análisis de imagen o evaluación electroquímica.

(II) los métodos a través de los cuales la porosidad total es obtenida por permeación de gas o químicos y/o el análisis electroquímico.

Los métodos electroquímicos son adecuados para la evaluación de la eficacia de la porosidad, el área de sustrato expuesta por debajo de los poros, y defectos en el recubrimiento. Varios métodos han sido utilizados para evaluar cuantitativamente la porosidad de revestimiento [3,4,5], pero los métodos que se estudiarán en esta investigación son:

1. Medidas de resistencia de polarización (R_p).
2. Medidas de polarización potenciodinámicas.
3. Mediciones del potencial de corrosión (E_{corr}).

Las mediciones del E_{corr} , R_p y mediciones coulométricas son tipos de pruebas que producen una medición de la porosidad, relacionada con el área de metales comunes expuestos en los poros.

Las técnicas para evaluar la porosidad y caracterizar las propiedades de los recubrimientos son valiosas para establecer condiciones adecuadas para la deposición de recubrimientos de alta calidad.

Se propone la siguiente investigación, considerando como objetivo general “Evaluar la porosidad de un recubrimiento cuproníquel mediante técnicas potenciodinámicas y análisis de imágenes.”, donde se perfilan unos objetivos específicos, determinar la porosidad y la resistencia eléctrica de poro de un recubrimiento electrolítico cuproníquel a partir de técnicas potenciodinámicas y determinar el grado de porosidad de un recubrimiento electrolítico cuproníquel mediante análisis de imágenes usando el programa IMAJE J, donde se realizan un análisis metalúrgico para observar mediante microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB), como

fue depositado el recubrimiento en el sustrato, observándose así los poros que está presente. La estructura del poro y su mediciones una tarea ardua debido a que se utilizan métodos desde visuales en los cuales los poros son visibles y métodos ópticos y de microscopio electrónico para determinar la estructura tridimensional de los poros. Aprobando esta investigación para conocer la importancia que tiene esta aleación como recubrimiento protector y observándose las características que este presenta.

II. DESARROLLO

Métodos y materiales.

El estudio corresponde a un diseño experimental de laboratorio, con un nivel de investigación de carácter exploratorio y descriptivo.

a. Caracterización Microestructural.

Se utilizó cuatro muestras de latón, con una forma representativa (lochas) como se muestra en la Figura 1.



Fig.1. Lochas de latón.

Se realizó la técnica metalográfica, para remover todo tipo de suciedad y tener una superficie plana y lisa en las muestras, teniendo especial cuidado en no distorsionar la superficie de las muestras. (Figura 2).

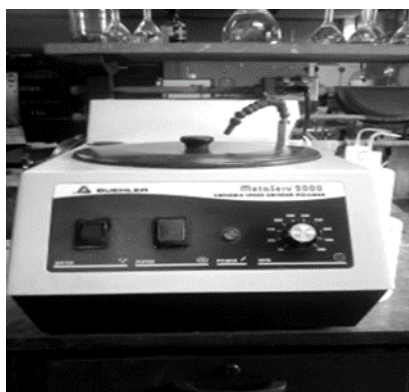


Fig.2. Equipo de desbaste y pulido Buehler Metaserv 2000 variable speed grinder-polisher.

b. Obtención del recubrimiento.

El electrolito utilizado fue de Sulfato de Cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), Sulfato de Níquel ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y de Citrato de Sodio ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); cuya relación del radio molar Ni(II)/Cu(II) en la solución de 11,65. A temperatura ambiente y pH 6. En un Galvanostato *BK Precision CE, Model 1626A DC Power Supli*, (Figura 3) cuyos parámetros máximos de operación son: 30 Voltios de salida y 3,0 Amperios de corriente máxima.



Fig.3. Galvanostato *BK Precision CE, Model 1626A DC Power Supli*

c. Determinación de la resistencia eléctrica de poro a través de las técnicas potenciodinámicas.

Se debe de estimar la calidad protectora del recubrimiento, para este caso se hace una evaluación de la porosidad. Un método utilizado para evaluar porosidad de los sistemas de recubrimientos es la técnica de electroquímica de resistencia a la polarización (R_p).

En este método el incremento de porosidad está asociado al contacto de la superficie del sustrato y

la solución, a la influencia de la resistencia a la corrosión total del sustrato recubierto.

Ecuación (1) con el fin de estimar el poder protector del recubrimiento depositado y resistencia ante la corrosión [6] es la siguiente:

$$R_e = R_{p(\text{sustrato} + \text{recubrimiento})} - R_{p(\text{sustrato})}$$

R_e : resistencia eléctrica de poro.

R_p : resistencia a la polarización.

d. Determinación de la porosidad a través de técnicas potenciodinámicas.

Elsener [4,5,7] propone un método electroquímico para estimar la porosidad de las películas delgadas basado en el uso de la ecuación (2).

$$P = \left(\frac{R_{p,s}}{R_p} \right) \cdot 10^{-\left(\frac{\Delta E_{corr}}{B_a} \right)}$$

Donde:

$R_{p,s}$: Resistencia a la polarización del sustrato.

R_p : Resistencia a la polarización del sustrato más recubrimiento.

ΔE_{corr} : Diferencia de potencial entre el recubrimiento y el sustrato.

B_a : Pendiente anódico del sustrato.

Varios autores emplearon esta ecuación para estimar la porosidad de las películas delgadas a partir de las curvas de polarización.

e. Grado de porosidad del recubrimiento mediante el análisis IMAJEJ

En este caso particular, el número de porosidades preexistentes se pueden observar al microscopio, ser contados con el IMAJEJ, y la porosidad estimada como el número de puntos de color por área de superficie recubierta.

III. RESULTADOS

a. Caracterización Microestructural

Se preparó las muestras realizándose un

desbaste grueso, con un set de lijas (240-600). Obteniéndose una superficie lisa y libre de suciedad. (Figura 4)



Fig.4. Locha de latón

b. Obtención del recubrimiento.

Se obtuvo el recubrimiento que polariza la superficie del sustrato. Con el objetivo de obtener un recubrimiento homogéneo en toda la superficie del metal aplicando la técnica de electrodeposición.



Fig.5. Lochas de latón con el recubrimiento depositado.

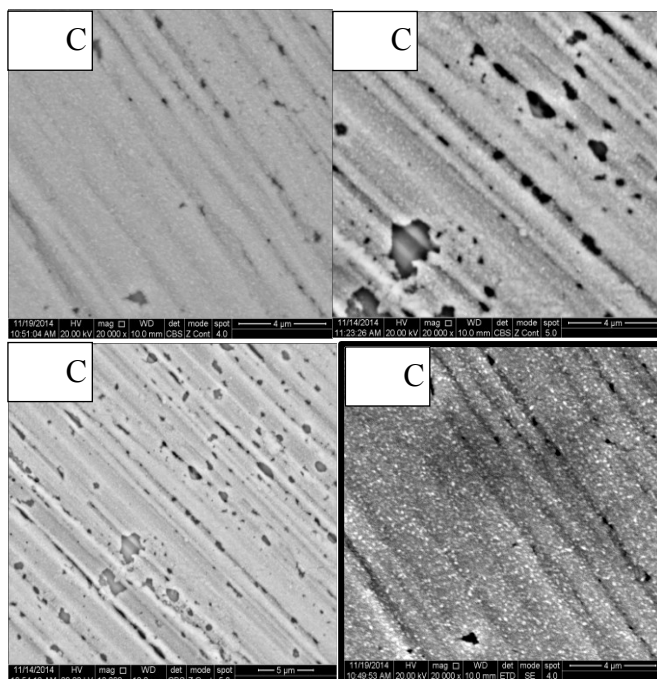


Fig.6. Fotomicrografía del recubrimiento depositado sobre sustratos desnudos de latón, mediante la técnica de electrodeposición utilizando (MEB).

c. Determinación de la resistencia eléctrica de poro a través de las técnicas potenciodinámicas.

En la tabla 1 se presenta los valores de los resultados obtenidos aplicando la técnica de polarización potenciodinámicas, donde se obtiene los valores de R_p , así mismo incluyen el potencial de corrosión (E_{corr}) determinado a circuito abierto y la resistencia eléctrica de poro (R_e), del recubrimiento con respecto al sustrato.

Tabla 1. Resultados experimentales de R_p , E_{corr} y R_e para la condiciones estudiadas.

Condición	$E_{corr}(Mv)$	$R_p(K\Omega.cm^2)$	$R_e(K\Omega.cm^2)$
1	-300,0	9,033	7,958
2	-307,0	8,010	6,935
3	-282,8	4,818	3,743
4	-298,0	9,784	8,709
CC	-296,95	7,911	6,836
Sustrato	-363,0	1,075	-

En cuanto a los resultados visto en la tabla 1 se resalta que la condición 4 es la más favorable, ya que arroja la mayor resistencia eléctrica de poro sobre el sustrato,

que corresponde a un valor de $8,707 \text{ K}\Omega.\text{cm}^2$ y el potencial de corrosión menos negativo mV. Esto nos indica que el recubrimiento es menos poroso y por consiguiente resistente a la corrosión.

d. Determinación de la porosidad a través de técnicas potenciodinámicas.

Utilizando los datos de la tabla 1 se aplica la fórmula para la determinación de porosidad en los revestimientos.

La pendiente anódica del sustrato (Ba) tiene como valor 86,80 Mv.

Tabla.2. Resultados experimentales de la porosidad para las condiciones estudiadas.

Condición	% Porosidad
1	0,77
2	0,78
3	0,85
4	0,75

Observándose que la condición 4 se tiene el menor porcentaje de poros de **0,75%**, con respecto a los demás resultados obtenidos para la tabla 2, se puede decir que el recubrimiento es resistente a los agentes agresivos y las propiedades de protección al sustrato va a depender de la interconexión del poro con el sustrato.

e. Grado de porosidad del recubrimiento mediante el análisis IMAGEJ

Tabla.3. Resultados cuantitativos de la porosidad para las condiciones estudiadas utilizando IMAGEJ.

Condición	Número de poros	Tamaño promedio	% Área de porosidad	Perímetro del poro
1	59	0.137	0.756	1.329
2	167	0.278	5.234	1.825
3	523	0.098	5.768	1.106
4	50	0.073	0.410	0.979

Se puede observar en la tabla #3 y en la figura 5, que la condición 4 que se resalta es la más conveniente ya que el %porosidad del recubrimiento es de **0,410%**, con un número total

de **50** poros, con un tamaño promedio **0,073%**, esto nos indica que el recubrimiento es menos poroso con respecto a las demás condiciones estudiadas, adquiriendo la capacidad de proteger al sustrato contra efectos corrosivo.

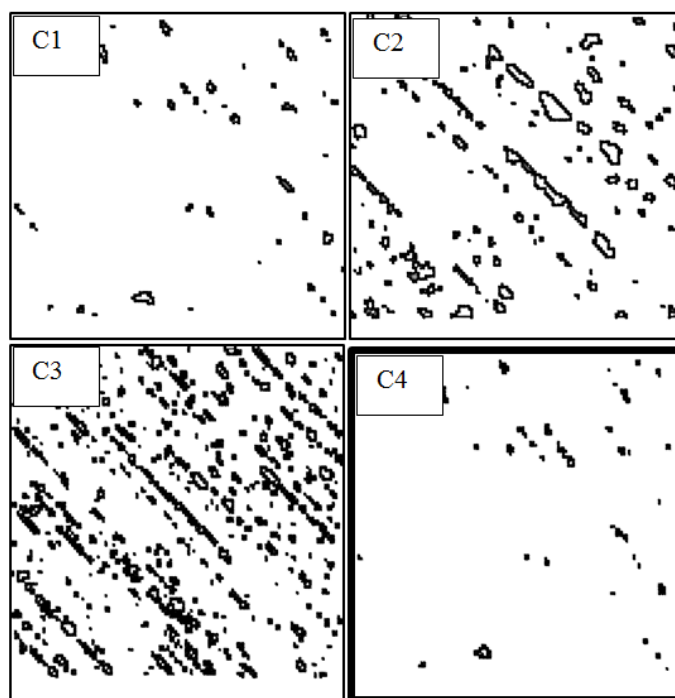


Fig.7. Poros preexistentes contados por IMAGEJ.

IV. CONCLUSIONES

De los resultados del análisis digital IMAGEJ, medidas de resistencia de polarización (R_p), medidas de polarización potenciodinámicas, y mediciones del potencial de corrosión (E_{corr}) realizados a cada una de las muestras, ver tablas 1, 2 y 3 se puede apreciar que en general los resultados obtenidos permiten establecer que el recubrimiento a pesar de tener poros, tienen la capacidad de aislar y proteger al sustrato de sustancias líquidas y efectos corrosivos.

La porosidad es un factor que influye en la resistencia a la corrosión, pero no de una manera determinante, considerando que la porosidad interconectada constituye el camino de acceso del electrolito corrosivo hacia el sustrato, podemos decir que la porosidad de este recubrimiento no es

interconectada ya que los %porosidad nos da en los tres casos relativamente bajos.

Los métodos electroquímicos son adecuados para la evaluación de la eficacia de la porosidad, el área de sustrato expuesta por debajo de los poros, y defectos en el recubrimiento.

V. REFERENCIAS

[1] Giles F. Carter, Donald E. Paul-Materials Science & Engineering-CRC Press (1991), pp. 133

[2] R. E. Reed-Hill and R. Abbaschian; Physical Metallurgy

Principles, 3rd ed., PWS Publishing company, 20 Park Plaza, Boston, MA 02116-4324 (1994).

[3] Y.M. Chen, "Comparison of electrochemical porosity test methods for TiN-coated stainless

Steel", Surface and Coatings Technology. Vol. 150, 2002, pp. 309–318.

[4] E.P. Banczek, P. R. P. Rodrigues and I. Costa, "Evaluation of Porosity and discontinuities in Zinc phosphate coating means of anodic voltammetry", Surface & Coatings Technology, Vol. 203, 2009, pp.1213–1219.

[5] H. Traujo Ponte, E. de Azevedo Alvarenga and A. M. Moul, "Analysis of Electrochemical Porosity of Phosphatized Coating on Galvanized steel substrate", Materials Research, Vol. 5, N. 4, 2002, pp.439–446.

[6] Boet L.Desarrollo de un recubrimiento electrolitico Sn-Co alternativo mediante la aplicacion de tecnicas de manipulacion de corriente"2006,pp.35-36

[7] N. Rajasekaran and S. Mohan, "Preparation, Corrosion, and Estructural Propieties CuNi Multilayers from Sulphate/Citrate Bath", Corrosion Sience, Vol. 51, 2009, pp. 2139–2143.

LA IDENTIDAD DE PARSEVAL Y LA TRANSFORMADA FRACCIONARIA DE FOURIER

Dr. Héctor Martínez

Resumen: En esta investigación analizamos el tópico de la transformada fraccionaria de Fourier en especial una propiedad muy importante que se cumple en diferentes definiciones de algunas transformadas integrales particularmente en la transformada de Fourier tanto la clásica como algunas transformadas fraccionaria. En nuestro trabajo se definen dos transformadas fraccionarias de Fourier (FRFT) una que se define en la teoría de operadores [1, 2, 4, 7] y otra desde el punto de vista del cálculo fraccionario [3] sobre el espacio Lizorkin considerando las funciones test rápidamente decrecientes, es decir el espacio de las funciones suaves (infinitamente diferenciables). En el desarrollo de esta investigación se realiza la demostración de la identidad de Parseval y la conservación de la energía de una señal dada, para una definición de la transformada fraccionaria de Fourier (FRFT) desde el punto de vista del cálculo de operadores. En este trabajo comprobamos que la propiedad de Parseval se mantiene bajo la nueva definición de la transformada fraccionaria de Fourier.

Palabras Claves: Identidad de Parseval, espacio Lizorkin, transformada fraccionaria de Fourier (FRFT).

I. Introducción

En esta investigación tratamos el tema de la transformada fraccionaria de Fourier y una de las más importantes propiedades que se presenta en muchas transformadas integrales a saber la identidad de Parseval. Primero se introducen algunas definiciones preliminares entre las cuales están: operador lineal, distribución delta, espacio de Frechet, transformada integral, transformada clásica de Fourier, transformada fraccionaria de Fourier desde el punto de vista de cálculo de operadores entre otras puesto que ellas son fundamentales en el desarrollo del trabajo.

Seguidamente se trata la transformada fraccionaria de Fourier unidimensional desde el punto de vista de la teoría de operadores y se demuestra que se mantiene la identidad de Parseval.

Además se comprueba la propiedad de conservación de la energía de una señal, que es un caso particular de la identidad de Parseval.

Por otra parte se construye un ejemplo donde se muestra la utilidad de esta identidad.

Finalmente se define otra transformada fraccionaria de Fourier sobre espacio de Lizorkin y se demuestra que se cumple la identidad de Parseval

con la definición de esta nueva transformada integral fraccionaria.

II. Preliminares

En esta sección se expresarán algunas definiciones fundamentales las cuales se estarán utilizando en todo el desarrollo del trabajo, entre las más importantes están: Operador lineal, distribución delta, Transformada fraccionaria de Fourier, espacio de Lizorkin entre otras.

Definición (Operador lineal). Sean E y E_1 dos espacios topológicos lineales, se llama operador lineal E sobre E_1 a toda aplicación T tal que: $y=T(x)$, con $x \in E$, $y \in E_1$. Además se verifica la siguiente condición:

$$T(\alpha x_1 + \beta x_2) = \alpha T(x_1) + \beta T(x_2).$$

Definición (Distribución delta). La *distribución delta* es una distribución singular está definida de la siguiente manera:

$$\delta(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = 0 \\ 0 & \text{si } x \neq 0 \end{cases}$$

Definición. Un espacio de Frechet L es un espacio vectorial topológico real, completo en el

sentido de los espacios uniformes y es localmente convexo y metrizable por una distancia invariante por traslaciones; formado por funciones f infinitamente diferenciables tal que:

$$\sup_{x \in \mathbb{R}} |x^m x^n f^n(x)| < \infty, \text{ para todo } m, n \geq 0$$

Definición (Transformada integral)

Sea f una función del espacio de Frechet L . Una transformada integral es un operador lineal sobre la función f y se define como sigue:

$$F(f(x)) = \int_{-\infty}^{+\infty} K(\xi, x) f(x) dx = F(\xi), \text{ donde } K(\xi, x) \text{ se conoce como el núcleo de la transformada integral.}$$

Definición (Transformada de Fourier)

Sea f una función del espacio de Frechet L . La transformada de Fourier (FT) sobre la función f se define como sigue

$$F(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i \xi x} f(x) dx$$

Teorema 1

Sean φ y ψ funciones pertenecientes al espacio de Frechet L . Además F y G son las transformadas de Fourier de φ y ψ respectivamente entonces

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) \bar{\psi}(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} (Ff)(\xi) (\overline{Fg})(\xi) d\xi$$

Además si $f = g$, obtenemos la propiedad de conservación de la energía, es decir:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx = \int_{-\infty}^{+\infty} |(F)(\xi)|^2 d\xi$$

Demostración.

La demostración es sencilla y se puede revisar en [5]

Se sabe que la definición de la transformada fraccionaria de Fourier viene caracterizada a través del siguiente teorema:

Teorema 2

Sea $f \in L^2(\mathbb{R})$ y f una función acotada, $\alpha = a\pi / 2$, entonces transformada fraccionaria de Fourier F^a de orden ' a ' es un operador lineal que hace corresponder a f la siguiente expresión:

$$F^a(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_a(\xi, x) f(x) dx, \quad (1)$$

donde ' a ' es la potencia de la transformada y núcleo está definido como:

$$K_a(\xi, x) = C_a e^{\{-i\pi(2x\xi/\sin\alpha) - (x^2 + \xi^2) \cot\alpha\}}, \text{ donde}$$

$$C_a = \sqrt{1 - \cot\alpha} \text{ para } a \notin 2\mathbb{Z}.$$

Además para $a \in 4\mathbb{Z}$ se tiene que: $K_a(\xi, x) = \delta(\xi - x)$, entonces $F^a(\xi) = f(x)$ y si $a \in 2+4\mathbb{Z}$ se obtiene que:

$$K_a(\xi, x) = \delta(\xi + x), \text{ es decir } F^a(\xi) = f(-x).$$

Además la fórmula de inversión de la transformada fraccionaria de Fourier viene dada como:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F^a(f)(x'') \overline{K_a(x, x'')} dx''$$

III. Identidad de Parseval (FRFT según teoría de operadores)

La identidad de Parseval se preserva en la teoría de la transformada fraccionaria de Fourier definida anteriormente utilizando cálculo de operadores. La cual sigue en el siguiente teorema.

Teorema 3

Sean f y g funciones perteneciente al espacio de Frechet L . Además F^a y G^a las transformadas fraccionarias de Fourier de f y g respectivamente entonces

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \bar{g}(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} (F^a f)(\xi) (\overline{F^a g})(\xi) d\xi$$

Además si $f=g$, obtenemos la propiedad de conservación de la energía, es decir:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx = \int_{-\infty}^{+\infty} |(F^a)(\xi)|^2 dx$$

Demostración:

Sabemos de la fórmula de inversión de la transformada fraccionaria de Fourier que:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F^a(f)(x'') \overline{K_a(x, x'')} dx'' \quad (2)$$

Multiplicamos por $\overline{g(x)}$ a ambos lados de la ecuación

(2) y luego integramos con respecto a x esto es:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \overline{g(x)} dx \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F^a(f)(x'') \overline{K_a(x, x'')} dx'' \overline{g(x)} dx \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} F^a(f)(x'') \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{g(x)} \overline{K_a(x, x'')} dx dx'' \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} F^a(f)(x'') \overline{F^a(g)(x'')} dx'' \end{aligned}$$

Por lo tanto

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \overline{g(x)} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} F^a(f)(x'') \overline{F^a(g)(x'')} dx'' \quad (3)$$

Es decir es cierta la identidad de Parseval para la definición de la transformada fraccionaria dada en la ecuación (1)

Por otra parte si hacemos $f=g$ en la ecuación (3), se obtiene que:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \overline{f(x)} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} F^a(f)(x'') \overline{F^a(f)(x'')} dx''$$

Entonces

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx = \int_{-\infty}^{+\infty} |(F^a)(\xi)|^2 dx$$

Luego se cumple la propiedad de la conservación de la energía.

Nota 1: $(\overline{G^a})$: Significa conjugada de la transformada de Fourier de la función g y \overline{g} conjugada de la función g .

Seguidamente expresaremos un ejemplo donde se ilustra la identidad de Parseval utilizando la transformada fraccionaria definida en la ecuación (1).

Ejemplo 1. Sean $f(x) = e^{\pi x^2}$ y $g(x) = e^{-2\pi x^2}$, sean F^a y G^a las transformadas fraccionarias de Fourier de f y g respectivamente.

Sabemos de [6], página 146, tabla 4.1, inciso 9, haciendo $\chi = -1$ y $\chi = 2$, que las transformadas fraccionarias de f y g son las siguientes:

$$F^a(\xi) = \sqrt{\frac{1-i \cot \alpha}{-1-i \cot \alpha}} e^{\pi \xi^2 \frac{(\csc \alpha)^2}{1+(\cot \alpha)^2}} \quad y$$

$$G^a(\xi) = \sqrt{\frac{1-i \cot \alpha}{2-i \cot \alpha}} e^{i \pi \xi^2 \frac{3 \cot \alpha}{4+(\cot \alpha)^2}} e^{-\pi \xi^2 \frac{2(\csc \alpha)^2}{4+(\cot \alpha)^2}}$$

Entonces

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{+\infty} (F^a f)(\xi) \overline{(F^a g)(\xi)} d\xi = \\ & \int_{-\infty}^{+\infty} A B e^{\pi \xi^2 \frac{(\csc \alpha)^2}{1+(\cot \alpha)^2}} e^{i \pi \xi^2 \frac{3 \cot \alpha}{4+(\cot \alpha)^2}} e^{-\pi \xi^2 \frac{2(\csc \alpha)^2}{4+(\cot \alpha)^2}} d\xi \end{aligned}$$

$$\text{Donde } A = \sqrt{\frac{1-i \cot \alpha}{-1-i \cot \alpha}} \quad y \quad B = \sqrt{\frac{1-i \cot \alpha}{2-i \cot \alpha}}$$

Por otra parte se tiene que:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \overline{g(x)} dx \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\pi x^2} e^{-2\pi x^2} dx \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\pi x^2} dx = 1 \end{aligned}$$

La verificación de esta última aseveración se puede consultar en [6], página 138.

Luego de la identidad de Parseval concluimos que:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A B e^{\pi \xi^2 \frac{(\csc \alpha)^2}{1+(\cot \alpha)^2}} e^{i \pi \xi^2 \frac{3 \cot \alpha}{4+(\cot \alpha)^2}} e^{-\pi \xi^2 \frac{2(\csc \alpha)^2}{4+(\cot \alpha)^2}} d \xi \quad \text{Donde}$$

$$= 1.$$

Es decir hemos calculado un resultado nada evidente utilizando como herramienta fundamental la identidad de Parseval.

IV. Otra FRFT según el cálculo fraccionario.

Ahora introduciremos una nueva definición de la transformada fraccionaria de Fourier de orden α desde el punto de vista del cálculo fraccionario, definida sobre un espacio de Lizorkin $\phi(\mathbb{R})$.

Definición (Funciones test). Sea \mathbb{S} el espacio de las funciones test es decir, el espacio de las funciones infinitamente diferenciables $v(x)$ sobre \mathbb{R} que satisfacen la siguiente relación: $\gamma_{(m,k)}(v) = \sup_{x \in \mathbb{R}} (1 + |x|^m |v^{(k)}(x)|) < \infty$

Con $m, k \in \mathbb{N}_0$, donde $\mathbb{N}_0 = \mathbb{N} \cup \{0\}$.

Definición (Espacio de Lizorkin). Denotemos por $V(\mathbb{R})$ como el conjunto de las funciones $v \in \mathbb{S}$ que satisface que: $\frac{d^n f}{dx^n} \big|_{x=0} = 0$, con $n = 0, 1, 2, \dots$. El espacio de Lizorkin $\Phi(\mathbb{R})$ es la imagen inversa de la transformada de Fourier del espacio $V(\mathbb{R})$ en el espacio \mathbb{S} , $\Phi(\mathbb{R}) = \{\varphi \in \mathbb{S} : \mathcal{F}(\varphi) \in V(\mathbb{R})\}$

Definición (FRFT). Sea $\varphi \in \Phi(\mathbb{R})$ entonces la transformada fraccionaria de Fourier \mathcal{F}_α de orden α , donde $0 < \alpha \leq 1$, se define como sigue:

$$\hat{\varphi}_\alpha(\omega) = (\mathcal{F}_\alpha \varphi)(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) e_\alpha(\omega, t) dt, \quad (4)$$

Donde el núcleo fraccionario $e_\alpha(\omega, t)$ viene dado por:

$$e_\alpha(\omega, t) = \begin{cases} e^{-i|\omega|^\frac{1}{\alpha} t} & \text{si } \omega \leq 0 \\ e^{i|\omega|^\frac{1}{\alpha} t} & \text{si } \omega \geq 0 \end{cases}$$

El núcleo fraccionario se puede expresar en forma más simplificada como:

$$e_\alpha(\omega, t) = e^{i \operatorname{sign}(\omega) |\omega|^\frac{1}{\alpha} t}$$

Por otra parte podemos expresar la relación entre la transformada fraccionaria definida en la ecuación (4) y la transformada convencional de Fourier como sigue:

$$(\mathcal{F}_\alpha \varphi)(\omega) = (F\varphi) \left(\operatorname{sign}(\omega) |\omega|^\frac{1}{\alpha} \right) = (F\varphi)(x) \quad (5)$$

$$x = \begin{cases} -|\omega|^\frac{1}{\alpha} & \text{si } \omega \leq 0 \\ |\omega|^\frac{1}{\alpha} & \text{si } \omega \geq 0 \end{cases}$$

Seguidamente daremos un ejemplo de la transformada fraccionaria de Fourier de una función, según la definición presentada en la ecuación (4)

Ejemplo 2. Calculemos la transformada fraccionaria de Fourier de la función $\operatorname{rect}(x)$ definida como:

$$\operatorname{rect}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } |t| \geq \frac{T}{2} \\ 1 & \text{si } |t| \leq \frac{T}{2} \end{cases}$$

Sabemos de la ecuación (5) que: $(\mathcal{F}_\alpha \varphi)(\omega) = (F\varphi)(x)$ entonces de la definición de la transformada de Fourier según la ecuación (4) se tiene que:

$$\begin{aligned} (\mathcal{F}_\alpha \operatorname{rect})(\omega) &= F(\operatorname{rect}(x)) = \int_{-a}^a e^{-itx} dt = -\frac{e^{-itx}}{i\omega} \bigg|_{-a}^a \\ &= T \operatorname{sinc}\left(\frac{Tx}{2}\right), \text{ donde hemos hecho } a = \frac{T}{2} \text{ por comodidad en la notación.} \end{aligned}$$

$$\text{Por lo tanto } (\mathcal{F}_\alpha \operatorname{rect})(\omega) = T \operatorname{sinc}\left(\frac{Tx}{2}\right)$$

Luego

$$(\mathcal{F}_\alpha \operatorname{rect})(\omega) := \begin{cases} T \operatorname{sinc}\left(\frac{-T|\omega|^\frac{1}{\alpha}}{2}\right) & \text{si } \omega \leq 0 \\ T \operatorname{sinc}\left(\frac{T|\omega|^\frac{1}{\alpha}}{2}\right) & \text{si } \omega \geq 0 \end{cases}$$

Puesto que:

$$x = \begin{cases} -|\omega|^\frac{1}{\alpha} & \text{si } \omega \leq 0 \\ |\omega|^\frac{1}{\alpha} & \text{si } \omega \geq 0 \end{cases}$$

Donde $\operatorname{Sinc}(x) = \operatorname{sen}(x)/x$

Teorema 4 (Identidad de Parseval)

Sean $\varphi, \psi \in \Phi(\mathbb{R})$, $\hat{\varphi}(x)$ y $\hat{\psi}(x)$ sus transformadas clásicas de Fourier. Además $\mathcal{F}_\alpha(\varphi)$ y $\mathcal{F}_\alpha(\psi)$ son sus respectivas transformadas fraccionarias de Fourier de orden α , donde $0 < \alpha \leq 1$ entonces

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) \overline{\psi(t)} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} (\mathcal{F}_\alpha \varphi)(\xi) \overline{(\mathcal{F}_\alpha \psi)(\xi)} d\xi$$

Donde

$$x = \begin{cases} -|\omega|^{\frac{1}{\alpha}} & \text{si } \omega \leq 0 \\ |\omega|^{\frac{1}{\alpha}} & \text{si } \omega \geq 0 \end{cases}$$

Demostración.

De la definición de la transformada fraccionaria de Fourier dada en la ecuación (4) y considerando el hecho presentado en la ecuación (5) tenemos que:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{+\infty} (\mathcal{F}_{\alpha} \varphi)(\xi) (\overline{\mathcal{F}_{\alpha} \psi})(\xi) d\xi \\ &= \\ & \int_{-\infty}^{+\infty} (\mathcal{F} \varphi) \left(\text{sing}(\omega) |\omega|^{\frac{1}{\alpha}} \right) (\overline{\mathcal{F} \psi}) \left(\text{sing}(\omega) |\omega|^{\frac{1}{\alpha}} \right) d\omega \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} (\mathcal{F} \varphi)(x) (\overline{\mathcal{F} \psi})(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{\varphi}(x) \overline{\hat{\psi}(x)} dx \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) \overline{\psi(t)} dt \end{aligned}$$

Por lo tanto

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{+\infty} (\mathcal{F}_{\alpha} \varphi)(\xi) (\overline{\mathcal{F}_{\alpha} \psi})(\xi) d\xi \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) \overline{\psi(t)} dt \end{aligned}$$

Por otra parte se tiene que si hacemos $\varphi(x) = \psi(x)$ en la identidad de Parseval, se tiene que:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{+\infty} (\mathcal{F}_{\alpha} \varphi)(\xi) (\overline{\mathcal{F}_{\alpha} \varphi})(\xi) d\xi \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{\varphi}(x) \overline{\hat{\varphi}(x)} dx \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) \overline{\varphi(t)} dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \|\varphi(t)\|^2 dt \end{aligned}$$

Por lo tanto

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \|\varphi(t)\|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \|\mathcal{F}^{\alpha}(\xi)\|^2 d\xi$$

Conclusión.

En este artículo tratamos una de las más importantes propiedades que tienen algunas transformadas integrales a saber la identidad de Parseval, primero se demostró que esta propiedad se conserva para el caso particular de la transformada fraccionaria de Fourier definida según la teoría de operadores. Se aplica esta identidad en un caso particular para ver su utilidad para computar cierto

tipo de transformadas integrales que son engorrosas de calcular. Finalmente consideramos una nueva transformada fraccionaria de Fourier que es otra generalización de la transformada clásica de Fourier, pero esta vez basada en la teoría del cálculo fraccionario y se propone y se demuestra la identidad de Parseval, es decir que esta propiedad se mantiene en esta nueva transformada integral. Por otra parte esta investigación deja abierta la posibilidad de extender esta identidad a funciones n-dimensionales u otros espacios de funciones como por ejemplo los espacios de Sobolev, utilizando la misma transformada fraccionaria de Fourier.

Bibliografías

- [1] A. Bultheel y H. Martínez, Computation of the fractional Fourier transform, Appl. Comput. Harm. Anal., 16(3), (2004) 182 - 202.
- [2] A. Bultheel, J. Trujillo y H. Martínez, Transformada de Fourier: Aspectos computacionales y extensiones fraccionaria, Tesis doctoral en matemática, (2010).
- [3] A. Kilbas, Y. Luchko, H. Martínez y J. Trujillo, Fractional Fourier transf. And some of its applications, Fractional Calculus & Applied Analysis., Vol. 11, número 4 (2008)
- [4] A. Lohmann. Image rotation, Wigner rotation, and the fractional Fourier transform, J. Opt. Soc. Amer., 10(10), (1993) 2181- 2186.
- [5] E.M. Stein y R. Shakarchi., Fourier Analysis An Introduction, Princeton University Press, (2002).
- [6] H.M. Ozaktas, Z. Zalevski y M.A. Kutay, The fractional Fourier transforms and its applications, Wiley Chischester, (2001).
- [7] T. Alieva y M. Calvo, Fractionalization of the linear cicly transforms, J. opt. Soc. Amer. A., vol. 17 2330-2338 (2000)