

# Implementación de redes de Petri para el diseño de mallas a tierra de subestaciones eléctricas

## Petri Nets Implementation for Designing Electrical Substations Grounding

SANTIAGO SÁNCHEZ ACEVEDO

Ingeniero Electricista y candidato a Magíster en Ingeniería Eléctrica en la línea de instrumentación y control de la Universidad Tecnológica de Pereira, integrante del grupo de investigación en Instrumentación y Control.

ssa@ohm.utp.edu.co

CARLOS A. RESTREPO

Ingeniero Electricista y candidato a Magíster en Ingeniería Eléctrica en la línea de instrumentación y control de la Universidad Tecnológica de Pereira, integrante del grupo de investigación en Robótica y Percepción Sensorial GIROPS.

cr@utp.edu.co

YOV STEVEN RESTREPO GRISALES

Ingeniero Electricista de la Universidad Tecnológica de Pereira y candidato a Magíster en Ingeniería Eléctrica en la línea de planeamiento eléctrico de la misma universidad. Ingeniero de subestación 500 KV Interconexión Eléctrica S.A.

yrestrep@isa.com.co

Clasificación del artículo: Investigación

Fecha de recepción: 18 de septiembre de 2006

Fecha de aceptación: 30 de abril de 2007

**Palabras clave:** redes de Petri, mallas de puesta a tierra, diseño óptimo.

**Key words:** Petri nets, grounding system, optimal design.

### RESUMEN

La malla de puesta a tierra en una subestación debe proporcionar seguridad contra descargas eléctricas al personal que labore en ella. Para ello en todo punto de la subestación se debe garantizar un camino de descarga de baja impedancia. En la actualidad se hacen mallas de tierra para subestaciones, de acuerdo con normativas internacionales de seguridad, pero los algoritmos usados en estos diseños rara

vez consideran una metodología de optimización que involucre una combinación adecuada de seguridad y de costos. En este artículo se presenta una solución al problema de diseño óptimo de malla de tierra usando redes de Petri, las cuales modelan los estados concurrentes, para así lograr un desempeño adecuado del algoritmo de diseño. El objetivo fundamental es encontrar un diseño que combine adecuadamente parámetros de seguridad y costos de construcción.

## Abstract

The grounding system must assure personal security against electrical discharges. In order to achieve this, the designer has to guarantee a path of low impedance in all the points of the substation. Nowadays, designs of grounding take into account international norms and standards, but the used

algorithms rarely consider a methodology that offers a right combination of security and cost. This paper proposes a solution to the problem of optimal design of grounding using Petri nets; these model the concurrent states of the systems, getting a right performance of the design algorithm. The principal objective is to find a design that combines security parameters and construction costs.

\*\*\*

## 1. Introducción

Cuando se planea construir una subestación de energía eléctrica o cualquier tipo de instalación eléctrica con un determinado nivel de seguridad es necesario considerar el diseño de una malla de puesta a tierra (MPT) que proteja a las personas que interactúan con la instalación y con los equipos que se pretende instalar en ella. La MPT se diseña para cumplir dos funciones de seguridad: por una parte, evitar que durante la circulación de las corrientes de tierra puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de la subestación, con el peligro consecuente para el personal, y por otra, proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes de tierra producidas por cortocircuitos o por la operación de equipos descargadores de sobretensión. De esta manera, se evita exceder los límites de operación de los equipos o afectar la continuidad del servicio.

El diseño de MPT debe satisfacer las especificaciones que le permitan cumplir con su objetivo. Las consideraciones más importantes se encuentran recopiladas en el estándar IEEE 80 de 2000 [1]. En el caso colombiano, el Reglamento Técnico para Instalaciones Eléctricas RETIE [2] (en revisión reciente a la Norma 2050) establece que toda instalación eléctrica cubierta por este reglamento debe disponer de una MPT, de tal forma que cuando se presente una falla en cualquier punto accesible a las personas que puedan transitar o permanecer allí no esté sometido a tensiones de paso o de contacto que superen los umbrales de soportabilidad<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Artículo 15 del capítulo de puestas a tierra.

Asimismo, se debe tener presente que el criterio fundamental para garantizar la seguridad de los seres humanos es la máxima corriente que ellos pueden soportar, debida a la tensión de paso o de contacto y no el valor de la resistencia de puesta a tierra tomado aisladamente.

En el presente artículo se desarrolla una herramienta computacional que permite encontrar las mejores condiciones de diseño para una MPT, en cuanto a cantidad de conductor por utilizar, configuración del tendido de los conductores, calibre del conductor, de tal forma que se alcancen las condiciones más favorables de seguridad, de acuerdo con los estándares nacionales e internacionales.

## 2. Diseño de la MPT

Para realizar un diseño seguro de una malla de puesta a tierra se seguirá la metodología planteada en [1].

- 1) Mediante mediciones, determinar el área por proteger, es decir, las dimensiones y resistividad del terreno.
- 2) Seleccionar el conductor por utilizar en la malla. Para esto se debe hallar la corriente de fallo de secuencia cero, como se muestra a continuación [1-5]:

$$I_0 = \frac{E}{3 \cdot R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j(x_1 + x_2 + x_0)} \quad (1)$$

En (1):  $E$  es la tensión fase neutro y  $R_f$  la impedancia de falla.  $R_f$ ,  $R_2$  y  $R_0$  son las impedancias equivalentes

de la secuencia positiva, negativa y cero respectivamente.  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_0$  son las reactancias equivalentes de las respectivas secuencias.

Posteriormente, determinar el área del conductor en kcmil, como sigue:

$$A = I \cdot \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \cdot h \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (2)$$

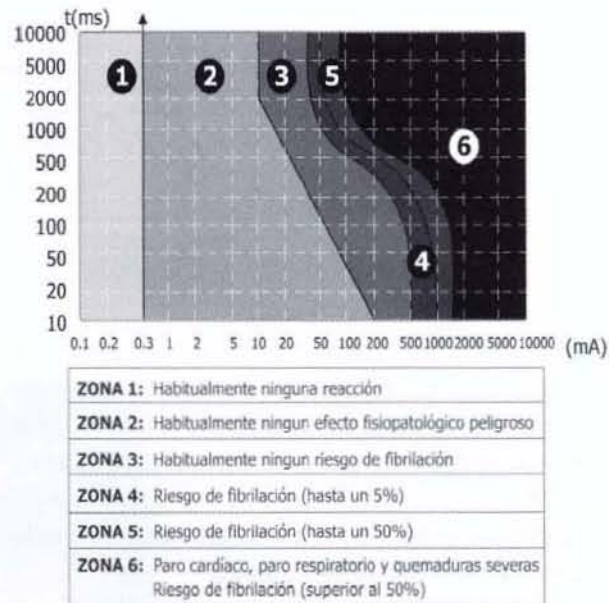
En (2):  $I$ : es la corriente de fallo rms en KA;  $TCAP$ : es un factor de capacidad térmica en J/cm<sup>3</sup>/°C;  $t_c$ : es el tiempo que circula la corriente;  $T_r$ : es la temperatura de referencia para los materiales en °C;  $T_a$ : es la temperatura ambiente en °C;  $\alpha_r$ : es un coeficiente térmico de la resistividad, y  $\rho_r$ : es la resistividad del conductor, ambos a una temperatura  $T_r$ ;  $\alpha_a$ : es un coeficiente térmico de la resistividad a  $T_a$  y  $K_0$  es  $1/\alpha_a$ . Cada uno de estos términos se puede encontrar en tablas de constantes de materiales. Con el área del conductor y usando tablas se determinan el calibre más próximo y el diámetro del conductor.

3) Calcular las tensiones de paso y contacto a las que podrá estar expuesta una persona en una MPT durante una falla. Para realizar el diseño de la malla se debe conocer la corriente tolerable por el cuerpo humano sin que se produzcan daños irreparables; para ello se calcula la corriente en amperios y con ella se determinan los potenciales tolerables por el cuerpo humano, dados por:

$$I_{CH} = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

En (3):  $t_s$ : es la duración de la corriente o tiempo de despeje de la falla por parte de los relés de protección (seg.), y  $k$ : es una constante experimental con una probabilidad de 99,5% de conducir una corriente por el cuerpo humano sin ocasionar fibrilación. Según la literatura especializada  $k$  es 0,116 para una persona de 50 kg, y 0,157 para una de 70 kg.

La gráfica 1 ilustra el riesgo de una persona al exponerse a corrientes de una magnitud determinada durante un tiempo específico.



Gráfica 1. Efectos de la magnitud de la corriente y su duración en el cuerpo humano [1]

Los voltajes de toque y de paso son las diferencias de potencial máximas que pueden presentarse entre una mano y un pie o entre los dos pies, en cualquier condición dentro de la subestación (en el diagrama 1 y en la figura 1 se ilustran la situación del voltaje de toque y el voltaje de paso, respectivamente).

Para el cálculo de estos potenciales se debe considerar que las resistencias de contacto de la mano y el pie son despreciables, mientras que la del suelo inmediatamente debajo del área de contacto del pie es considerada significativa. Cada pie se considera como un electrodo en forma de plato con una resistencia en Ohmios de  $3\rho$ , siendo  $\rho$  la resistividad superficial del suelo en  $\Omega\text{-m}$ .

La forma más utilizada para medir la resistividad del suelo es el método de las cuatro picas de Wenner [4], que consiste en clavar cuatro varillas enterradas a lo largo de una línea recta, espaciadas uniformemente a una distancia  $a$  y enterradas a una profundidad  $b$ , como se ilustra en el diagrama 1.

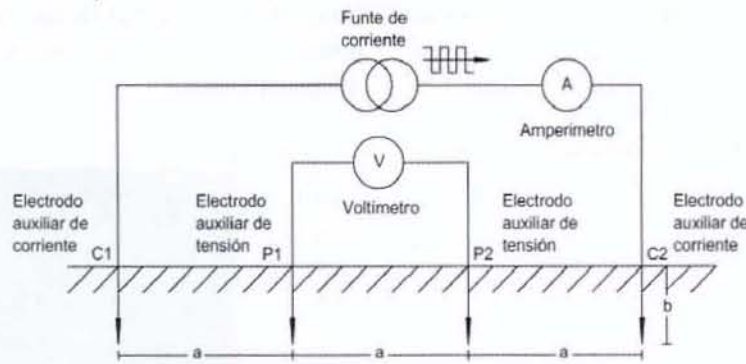


Diagrama 1. Método de Wenner

Las dos varillas externas inyectan una corriente alterna  $I$  en el suelo y las dos varillas internas captan la caída de tensión  $V$ , que ocurren entre ellas debido a la corriente  $I$ . La tensión es dividida por la corriente para dar un valor de la resistencia de los electrodos internos  $R$ . La resistividad del suelo se estima con base en la fórmula:

$$\rho = \frac{4 \pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (4)$$

En [6] se presenta otra metodología para el cálculo de la resistividad del terreno. Para el cuerpo humano se estima un valor de resistencia total de  $2.300 \Omega$  entre manos y  $1.100 \Omega$  entre mano y pie. Así, en ambos casos se usa  $1.000 \Omega$  como un valor razonable y que brinda seguridad [4].

De acuerdo con el circuito equivalente que aparece en la figura 1, la resistencia total a la corriente que circularía por el cuerpo humano en una condición de paso se puede calcular, si se usa (5). Por su parte, (6) es la manera como se calcula la resistencia total en una condición de toque para el circuito equivalente de la figura 2.

$$R_{PASO} = 1000 + 6 * \rho \quad (5)$$

$$R_{CONTACTO} = 1000 + 1.5 * \rho \quad (6)$$

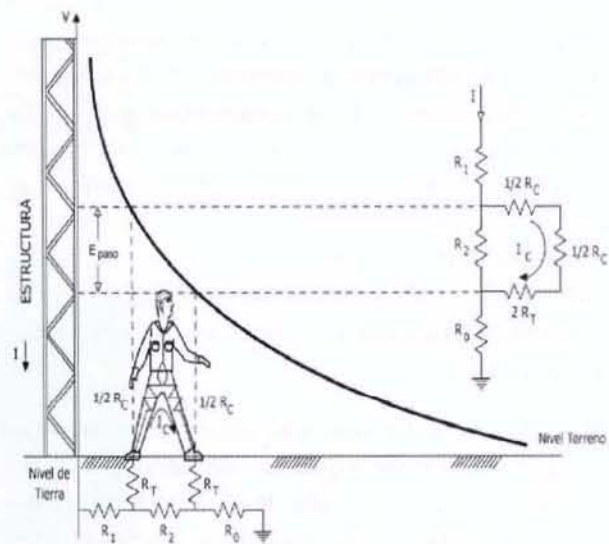


Figura 1. Tensión de paso cerca de una estructura metálica conectada a tierra [1]

Como el voltaje es igual al producto de la corriente por la resistencia, de (3), (5) y (6) se encuentra que:

$$E_{paso} = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \cdot (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \quad (7)$$

$$E_{contacto} = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \cdot (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \quad (8)$$

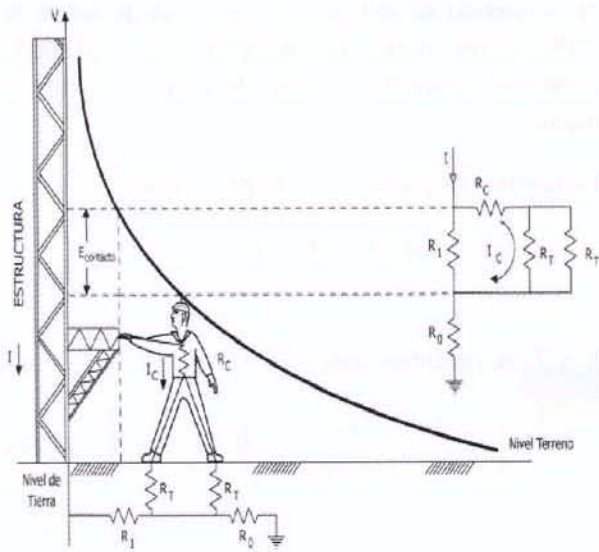


Figura 2. Tensión de toque en una estructura metálica conectada a tierra [1]

En las ecuaciones anteriores,  $t_s$ : es el tiempo de duración de la falla;  $\rho_s$ : es la resistividad de la superficie, y  $C_s$ : es un factor debido a una capa de roca fina partida sobre la superficie de la subestación que se define como:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0.09} \quad (9)$$

$\rho_s$  y  $h_s$  son la resistividad del terreno y la altura de roca picada sobre la superficie, respectivamente.

- 4) Hacer un diseño inicial de la malla de la subestación, esto es, escoger el número de conductores longitudinales y transversales.
- 5) Calcular la resistencia de la malla empleando la ecuación de Sverak:

$$R_g = \rho \cdot \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \cdot \left( 1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (10)$$

En (10),  $L_T$ : es la longitud total de conductor en la malla (malla más varillas enterradas);  $A$ : es el

área de la malla;  $h$ : es la profundidad de enterramiento.

- 6) Hallar la máxima corriente que podrá circular por la malla; ella se obtiene si se corrige la corriente de fallo de secuencia cero así:

$$I_G = D_f \cdot S_f \cdot 3 \cdot I_o \quad (11)$$

$D_f$ : es el factor de decremento que depende de la magnitud de la relación entre inductancia y resistencia y el tiempo de duración de la falla; su valor se encuentra en tablas.  $S_f$ : es un factor de la relación de las corrientes de falla;  $I_o$ : es la corriente de falla que circulará por la malla. Cuando se analizan transformadores se debe considerar la corriente de falla del lado aterrizado, si éste existe.

- 7) Comparar la elevación del potencial de la tierra GPR con la tensión de toque. La primera debe ser menor para obtener un diseño seguro; de lo contrario, se debe continuar con el octavo paso. La tensión de falla está dada por:

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad (12)$$

$GPR$  es la máxima tensión de la MPT que una instalación puede alcanzar, relativa a un punto de tierra distante que se supone está al potencial de tierra remoto.

- 8) Determinar la tensión de paso real y la tensión de malla. La tensión de malla está definida como:

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_T} \quad (13)$$

Los factores  $K_m$  y  $K_i$  se definen como:

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left[ \text{Ln} \cdot \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2+h)^2}{8 \cdot D \cdot h} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \text{Ln} \left[ \frac{8}{\pi \cdot (2 \cdot n - 1)} \right] \right] \quad (14)$$

## con-ciencias

En (14),  $n$ ,  $D$  y  $d$  son el número de conductores largos, la separación entre ellos y el diámetro de los conductores de la malla, respectivamente;  $K_{ii}$  y  $K_n$  se definen como:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \quad (15)$$

$h_o$  es la profundidad de referencia de la malla e igual a un metro. Si la malla tiene varillas en su perímetro  $K_{ii}$  tiene un valor de uno; de lo contrario:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} \quad (16)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n' \quad (17)$$

El factor geométrico está definido como:

$$n' = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (18)$$

Cada uno de sus factores se define como:

$$n_a = \frac{2 \cdot L_T}{L_p} \quad (19)$$

Si la malla es cuadrada, el resto de factores vale uno; en caso contrario se tiene:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (20)$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0.7 \cdot A} \quad (21)$$

En (21),  $L_p$  es la longitud del perímetro de la malla y  $L_x$  y  $L_y$  son las dimensiones de la malla de puesta a tierra.

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (22)$$

$D_m$  corresponde a la separación máxima entre conductores de la malla.

Si la tensión de malla es menor a la de toque se continúa calculando la tensión de paso real; de lo contrario, la malla se debe de rediseñar, nuevamente.

La tensión de paso real se expresa como:

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (23)$$

$K_s$  y  $L_s$  se calculan como:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{1}{2 \cdot n} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} \cdot (-0.5^{(n-2)}) \right] \quad (24)$$

$$L_s = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R \quad (25)$$

$L_C$  y  $L_R$  son la longitud de los conductores de la malla y de las varillas, respectivamente.

9) Comparar la tensión de paso real (23) con la hallada en (7). Si la primera es menor el diseño es seguro; de lo contrario, se debe rediseñar la malla y volver al paso 4).

En el diagrama 2 se muestra un diagrama de flujo del diseño de una MPT.

### 3. Implementación del estándar IEEE-80 con redes de Petri (RdP)

Las RdP son una herramienta matemática que sirve para modelar comportamientos de diferente naturaleza [7-11]. Una de sus ventajas es que se pueden implementar en cualquier lenguaje (de alto o bajo nivel); así, gracias al desarrollo de herramientas computacionales las RdP se han convertido en una gran herramienta para el modelado y análisis de sistemas.

La RdP se utiliza para representar el comportamiento que debe tener el software que se va a implementar, validar y verificar su funcionamiento con base en el cumplimiento de ciertas propiedades que caracterizan un desempeño adecuado. En la validación se verifica la descripción correcta del sistema, dada la característica evolutiva del estándar

IEEE-80; el uso de este estándar implica el cálculo de varios parámetros que llevan a la obtención de los valores de tensión que garantizan la seguridad de una subestación. Para llegar a valores admisibles de voltaje, acordes con el estándar, se requiere de un flujo de datos que se comporte como eventos concurrentes.

Para emplear una RdP en la modelación de una clase de aplicación (en este caso la descripción del software) [7,10], primero se procede a dotarla de una interpretación. El modelo en RdP con que se describe el archivo ejecutable se explica de la siguiente manera:

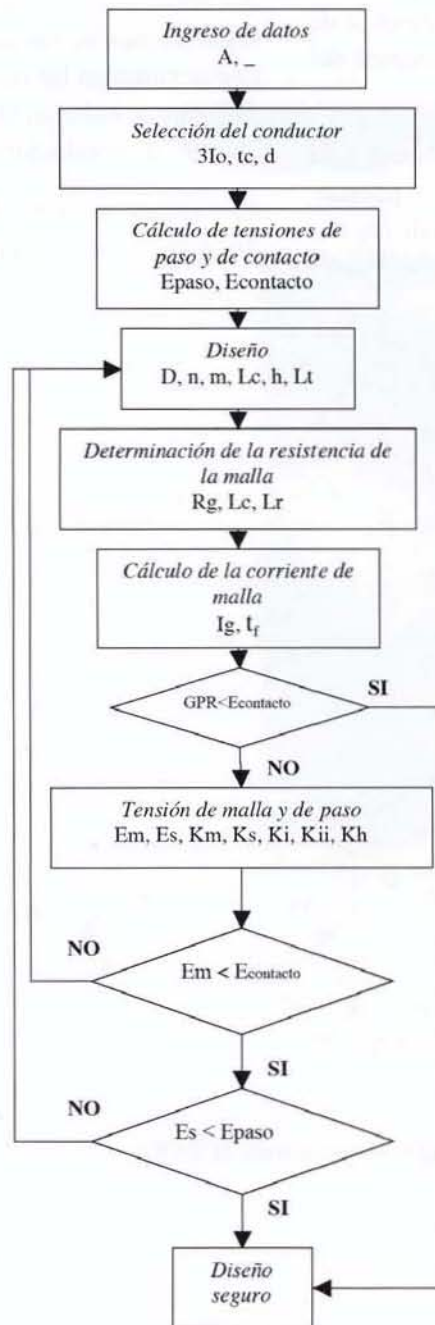


Diagrama 2. Diagrama de flujo del diseño de una malla

### 3.1 Representación del software con una RdP

Para iniciar el software el usuario debe ingresar los datos del patio en que se realizará la MPT, la resistividad del terreno [4, 6], el valor del espesor de roca y la profundidad de la malla, las distancias de separación inicial de los conductores horizontales y de los transversales. Dos datos de importancia son la corriente de falla y el tiempo de despeje de falla; este último es función de los elementos del sistema de protección [3-5].

Las relaciones de entrada y salida de líneas a la subestación pueden ser seleccionadas por el usuario, quien también puede seleccionar el peso de los trabajadores que circularán por el patio y, finalmente,

la temperatura promedio de la ciudad. Los datos iniciales son de alta relevancia, dado que ellos inician el flujo iterativo para la realización de los cálculos y comparaciones de las tensiones de paso y toque establecidos por el estándar IEEE-80. En una etapa inicial el software verifica que se garanticen las tensiones antes mencionadas para las distancias iniciales; si esto no ocurre se procede a reducir las separaciones de los conductores de la malla hasta que se cumplan las restricciones del sistema; a medida que se reducen las separaciones se aumenta el número de conductores.

La RdP que describe el flujo de datos en el software diseñado se aprecia en el diagrama 3.

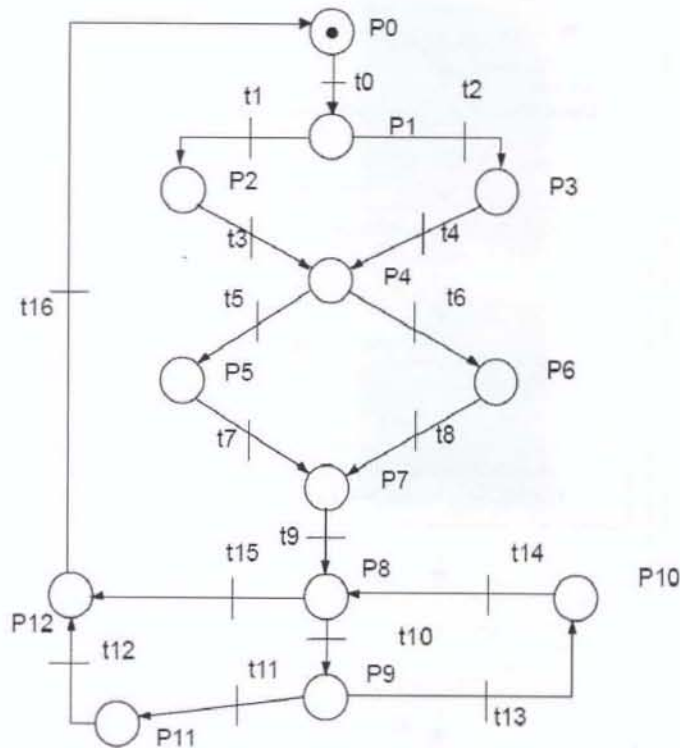


Diagrama 3. Estándar IEEE-80 implementado en una RdP



Los lugares o estados y transiciones o eventos se describen a continuación.

P0: inicio del programa, periodo de espera para entrada de datos  
 P1: espera  
 P2: evaluación de Es y Et para el peso 1 para el personal  
 P3: evaluación de Es y Et para el peso 2 para el personal  
 P4: selección del material del conductor  
 P5: factor térmico para el cobre  
 P6: factor térmico para el aluminio  
 P7: cálculo del área del conductor, distancia horizontal y vertical  
 P8: cálculo de la longitud total de la malla, la resistencia de puesta a tierra, corriente por la malla y elevación potencial de tierra  
 P9: cálculo de la tensión de retícula  
 P10: reducción de distancia  
 P11: cálculo de la tensión de paso  
 P12: presentación de los resultados  
 t0: el botón ejecutar=1 (se inicia el ciclo de cálculos)  
 t1: se seleccionó el peso1  
 t2: si fue seleccionado el peso 2  
 t3, t4, t7, t8, t9, t14, t16: transición inmediata (=1)  
 t5: el material seleccionado es cobre  
 t6: el material seleccionado es aluminio  
 t10: si  $GPR < Et$   
 t11: si  $Etc < Et$   
 t12: si  $Epc < Ep$   
 t13: si  $Etc > Et$   
 t15: si  $GPR \geq Et$

*GPR* es la elevación de potencial de tierra.

La matriz de incidencias compuesta para el ciclo iterativo y el desempeño del software se presenta en (26). La matriz describe la topografía del sistema

de forma matemática; ésta es función de los estados y los eventos que provocan las transiciones entre estados.

$$C = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

El vector del marcado inicial representa la primera instrucción que debe ejecutar el programa, así:

$$M_0^i = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) \tag{27}$$

La RdP diseñada para la implementación del software tiene las características presentadas en la tabla 1. Además es ordinaria (las funciones de incidencia toman valores de cero ó uno), binaria y viva, por lo que la red no va a quedar bloqueada y convergerá a un diseño específico.

Máquina de estados	Verdad
Grafo marcado	Falso
Red simple elección	Verdad
Red simple	Verdad

Tabla 1. Clasificación RdP

De la tabla 1 se concluye que la red presenta eventos de elección simple, dadas las características del estándar IEEE-80<sup>2</sup>.

#### 4. Ejemplo de diseño de una MPT

Para comprobar el desempeño de la aplicación computacional se realizó una prueba al diseño de una red de puesta a tierra, para la cual se desea diseñar una MPT. En la tabla 2 se observan los datos necesarios para realizar el diseño de la MPT para una subestación de 115 kV, cuya relación de entrada- salida para las líneas es 2/8. Estas características son fundamentales para la inicialización del ciclo de diseño; su obtención se explica en el apartado 2.

<sup>2</sup> En una red simple un evento comparte máximo un estado de entrada con otros eventos.

Ancho del patio	80 m
Largo del patio	70 m
Corriente de falla en alta	25.000 A
Resistividad del terreno	400 Ω
Resistividad de la gravilla	25.00 Ω
Espesor gravilla	0,102 m
Profundidad de la malla	0,5 m
No. de varillas	20
Tiempo de despeje	0,5 s
Temperatura ambiente	35°C
Distancia horizontal inicial	45 m
Distancia vertical inicial	20 m
Valor de la reducción a las distancias de separación horizontal y vertical	5 m

Tabla 2. Datos del sistema de prueba

La distancia inicial entre conductores horizontal y vertical es asumida por un diseño de arranque que es evaluado por la red para verificar el cumplimiento de las tensiones de paso y contacto. Si los criterios no se cumplen, el número de conductores varía hasta encontrar un diseño seguro. Los resultados para el ejemplo obtenidos con la RdP se muestran en la tabla 3.

Distancia entre conductores horizontales	11,12 m
Distancia entre conductores	26,67 m
No. de conductores verticales	7
No. de conductores horizontales	4
Longitud total conductor	888 m
Resistencia de la malla	2,80 Ω
Corriente por la malla	2000 A
Conductor	2/0AWG
No. de iteraciones	2

Tabla 3. Resultados del diseño

Los resultados obtenidos por la red son semejantes a los presentados en [5]; en este caso se utilizaron

algoritmos genéticos para llegar a un valor óptimo que permitiera reducir el número de conductores de la MPT, para también reducir los costos de su construcción. Los resultados son muy cercanos, si se considera que en aquel trabajo se tiene un patio de subestación de medidas 63x84 m, semejante al propuesto como ejemplo en este artículo. No se

puede hablar de error entre resultados, debido a la característica combinatoria del estándar, según la cual pueden existir gran número de respuestas factibles con respecto a la cantidad de conductores que se van a utilizar en la construcción de una MPT; la comparación se presenta en la tabla 4.

Tipo	Datos relevantes para el algoritmo genético y resultados	Datos relevantes para el software y resultados
Patio	63x84 m	70x80 m
Tensión	115 kV	115 kV
No. de conductores verticales	6	7
No. de conductores horizontales	5	4

Tabla 4. Comparación de resultados de diseño

## 5. Conclusiones

- La mayoría de herramientas software disponibles en el mercado sólo presentan como respuesta el cumplimiento de las tensiones de paso y toque mediante la disposición de los conductores que asuma el diseñador. El software aquí presentado genera las separaciones y el número de conductores necesario que garantizan los niveles de seguridad requeridos para el diseño de una MPT.
- Se ha presentado un sistema que soporta al ingeniero en el diseño de MPT para subestaciones;

mediante su uso se facilita el criterio para la selección de las separaciones de los conductores transversales y longitudinales; además, se obtiene una respuesta económica para la selección de la longitud total del conductor por utilizar.

- Las RdP son una herramienta matemática fuerte para el diseño de software representado en forma gráfica que use un sistema cíclico. Su fortaleza radica en su facilidad para la verificación funcional y porque puede ser llevado a cualquier lenguaje de programación, en este caso C++, de manera estructurada.

## Referencias bibliográficas

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>[1] IEEE-80. (Jan 2000). <i>Guide for Safety in AC Substation Grounding</i>.</p> <p>[2] Ministerio de Minas y Energía. <i>Reglamento técnico para instalaciones eléctricas "RETIE"</i>. Disponible en url: <a href="http://www.minminas.gov.co">http://www.minminas.gov.co</a></p> <p>[3] Martín, R. J. (1992). <i>Diseño de subestaciones eléctricas</i>. Ed. Mc.Graw Hill, México.</p> <p>[4] Ramírez, C. F. (2003). <i>Subestaciones de alta y extra alta tensión</i>. 2ª. ed. Impresiones Gráficas Ltda., Colombia.</p> | <p>[5] Restrepo, C., Granada, M. (2005). "Algoritmos genéticos aplicados al diseño óptimo de mallas de puesta a tierra de subestaciones". <i>Energía y Computación</i>, Vol. XII (1), ed. 23, Colombia.</p> <p>[6] Salam, M. A., Al-Alawi, S. M., Maqrashi, A. A. (2006). "An Artificial Neural Networks Approach to Model and Predict the Relationship between the Grounding Resistance and Length of Buried Electrode in the Soil". <i>Journal of Electrostatics</i>, Vol. 64, pp. 338-342.</p> <p>[7] Girault, C. and Valk, R. (2003). <i>Petri Nets for Systems Engineering</i>. Alemania: Springer Verlag.</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

- [8] Silva, M. (1985). *Las redes de Petri: en la automática y la informática*. Madrid: Alfa Centauro.
- [9] Desrochers, A. Al-Jaar, R. (1995). *Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems Modeling, Control and Performance Analysis*. The Institute of Electrical and Electronics Engineering, United States.
- [10] Zhou, Meng Chu. (1995). *Petri Nets in Flexible and Agile Automation*. Kluber Academic Publisher. United States.
- [11] Girault, C., Valk, R. (2003). *Petri Nets for Systems Engineering. A Guide to Modeling, Verification and Applications*. Springer-Verlag Berling Heidelberg, Germany.