

2. CRITERIOS DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE CONEXIÓN A TIERRA

Funciones de un sistema de conexión a tierra

El diseño de un Sistema de Conexión a Tierra (SCT) para seguridad de las personas y protección de equipos tiene tres objetivos primordiales:

- a) Proveer un camino de retorno para las corrientes que puedan circular hacia el terreno bajo condiciones de falla o de operación normal, sin exceder cualquier límite de operación de los equipos que afecten adversamente la continuidad de servicio.
- b) Asegurar que una persona en las inmediaciones de un SCT no esté expuesta a un choque eléctrico peligroso para su vida.
- c) Servir de medio de control de los posibles sobrevoltajes que se pueden presentar en una instalación. Bien sean sobrevoltajes de origen externo(rayos) o de origen interno.

La relación entre los tres objetivos no es directa. Para cumplir a cabalidad con los objetivo **a) y c)** se requiere una impedancia del camino de retorno de la corriente por el terreno lo mas baja posible, idealmente cero. Mientras que el objetivo **b)** requiere del control del perfil de voltajes sobre la superficie del terreno que aparece cuando circula una corriente por el terreno. De acuerdo a la forma de estos perfiles de voltaje una persona puede estar expuesta a una diferencia de potencial peligrosa para su vida.

Existe una relación entre la impedancia del camino de retorno de una corriente por el terreno y el perfil de voltajes. Esta relación depende fundamentalmente de las características de conducción eléctrica del terreno(resistividad o conductividad) y de la geometría del Sistema de Conexión a Tierra. Es práctica común para SCT que operan a 60 Hz definir mas que una impedancia de retorno una resistencia de retorno o **resistencia a tierra** como se conoce generalmente.

No se puede afirmar que un SCT con baja resistencia es de por sí seguro para las personas. Pueden encontrarse los dos casos: SCT que presentan un bajo valor de resistencia a tierra pero inseguros para las personas, y SCT con un valor de resistencia a tierra elevado pero seguros para las personas. Sin embargo lo mas común es encontrar que los SCT seguros para las personas también tienen un bajo valor de resistencia a tierra.

Efecto de la corriente eléctrica en el cuerpo humano

El efecto de la corriente eléctrica en el cuerpo humano depende de múltiples factores dentro de los cuales se pueden resaltar los siguientes:

- Camino de circulación de la corriente y distribución de la misma dentro del cuerpo humano.
- Intensidad de la corriente.
- Tiempo de circulación de la corriente en el cuerpo.
- Tipo de onda de la corriente: impulso(rayos), corriente alterna, corriente continua.
- Frecuencia de la corriente alterna senoidal.
- Nivel de voltaje aplicado para la circulación de corriente.
- Humedad de la piel y superficie de contacto con los caminos de circulación de la corriente externos al cuerpo humano.

- Condiciones orgánicas de la persona bajo el efecto de una corriente eléctrica.

Debido a la naturaleza aleatoria de las variables que limitan la corriente por el cuerpo humano en una situación de riesgo, se hace difícil establecer un valor máximo de voltaje permitido. Por esta razón los criterios de riesgo para las personas están definidos por valores de corriente.

En la tabla 2.1[3] se resumen los efectos producidos de acuerdo a la intensidad de corriente y la forma de onda. Sin embargo no existen criterios únicos para establecer los límites para cada efecto, también se debe entender que los valores suministrados son tendencias estadísticas centrales de valores aleatorios que por supuesto adolecen de algún grado de dispersión.

Tabla 2.1
Efectos de la Corriente Eléctrica Sobre las Personas[3]

Efecto sobre la persona	Corriente en mA					
	Corriente Continua		Corriente Alterna Onda Senosoidal			
	Hombres	Mujeres	60 Hz		10 kHz	
Hombres			Mujeres	Hombres	Mujeres	
Sin sensación en la mano	1,0	0,6	0,4	0,3	7,0	5,0
Hormigueo ligero. Nivel de percepción	5,2	3,5	1,1	0,7	12,0	8,0
Choque no doloroso. No se pierde el control muscular	9,0	6,0	1,8	1,2	17,0	11,0
Choque doloroso. Dolor sin perder el control muscular	62,0	41,0	9,0	6,0	55,0	37,0
Choque doloroso. Nivel de imposibilidad de soltar un objeto energizado (let-go current)	76,0	51,0	16,0	10,5	75,0	50,0
Dolor. Choque severo. Contracción muscular. Dificultad para respirar	90,0	60,0	23,0	15,0	94,0	63,0
Possible fibrilación ventricular debida a choques de corto tiempo						
Duración del choque 0,03s	1300,0	1300,0	1000,0	1000,0	1100,0	1100,0
Duración del choque 3,0 s	500,0	500,0	100,0	100,0	500,0	500,0

Otra referencia reconocida a nivel mundial, especialmente en el continente americano es el estándar IEEE-80-1986[2]. Esta norma da los siguientes valores para cada efecto de la corriente eléctrica sobre las personas:

- ❑ **1 mA:** Nivel de percepción, ligera sensación de hormigueo.
- ❑ **1 - 6 mA:** Desagradable. No se pierde el control muscular(let-go current).
- ❑ **9 - 25 mA:** Dolor. Dificultad o imposibilidad de soltar un objeto energizado agarrado con la mano.
- ❑ **25 - 60 mA:** Aparecen contracciones musculares que pueden dificultar la respiración. Excepto en casos de paro respiratorio, los efectos desaparecen cuando la corriente se interrumpe. Cuando existe paro respiratorio con técnicas de resucitación se puede salvar a la persona.
- ❑ **60 - 100 mA:** Puede ocurrir fibrilación ventricular, paro cardíaco, paro respiratorio. Los daños causados son severos y puede morir la persona.

Como se puede observar aunque existen algunas coincidencias entre las dos fuentes consultadas no existe un criterio uniforme para delimitar los efectos de la corriente eléctrica. Un aspecto importante en los niveles de corriente y sus efectos colaterales sobre el cuerpo humano es el tiempo de exposición a la corriente. Desde el punto de vista práctico se ha asumido como criterio de diseño el mínimo valor de corriente que puede producir fibrilación ventricular con una probabilidad dada de ocurrencia. Ya que esta es la condición mortal par una persona.

Máxima Corriente (50 – 60 Hz) Permitida en Seres Humanos

Investigaciones llevadas a cabo por Dalziel y otros[2], demostraron que el valor de corriente que no causa fibrilación ventricular en un ser humano esta relacionada con la cantidad de energía absorbida por el cuerpo humano. En el rango de tiempo de exposición a la corriente eléctrica de 0,003 s a 3,0 s Dalziel estableció la siguiente relación para el 99,5 % de las personas:

$$S_c = I_c^2 \cdot t \quad (2.1)$$

donde:

I_c : valor r-m-s de la corriente a través del cuerpo, A.

t: tiempo de exposición del cuerpo a la corriente, s.

S_c : Constante empírica relacionada el choque eléctrico tolerado por un cierto porcentaje de una población dada

De 2.1 se puede despejar el valor de la corriente si por algún medio se determina S_c . Dalziel encontró de acuerdo a sus estudios que la corriente de fibrilación es una función del peso de la persona. Para una persona de 50 kg encontró que el valor de $k=(S_c)^{1/2}$ es de $k_{50}=0,116$ y para una persona de 70 kg $k_{70}=0,157$. De esta forma mediante 5.1 y los valores de k mencionados se puede tener la máxima corriente de no fibrilación para el 99,5% de las personas. Debe tenerse en consideración que estos resultados fueron obtenidos para el intervalo de exposición a la corriente de 0,003 a 0,3 s; para tiempos menores o mayores no se puede utilizar 2.1

Tabla 2.2
Comparación entre los valores de corriente de no fibrilación obtenidos por IEE-80-1986 y la norma IEC 479

Tiempo de Exposición s	Camino de la Corriente	Nivel de Corriente Máximo para no Producir Fibrilación en mA		
		IEC 479	IEEE-80-1986	
			50 kg	70 kg
0,008	Pie – Pie	>5000		
	Mano – Mano	1250		
	Mano izquierda – Ambos Pies	500		
	Mano izquierda – Tronco	333		
0,06	Pie – Pie	>4500	473,6	640,95
	Mano – Mano	1125		
	Mano izquierda – Ambos Pies	450		
	Mano izquierda – Tronco	300		
1,0	Pie – Pie	>500	116	157
	Mano – Mano	125		
	Mano izquierda – Ambos Pies	50		
	Mano izquierda – Tronco	33		
5,4	Pie – Pie	>330		
	Mano – Mano	83		
	Mano izquierda – Ambos Pies	33		
	Mano izquierda – Tronco	22		

La norma IEEE-80-1986 no establece el camino de circulación de la corriente. La norma IEC 479 establece la máxima corriente que no puede causar fibrilación dependiendo del tiempo y del camino de circulación a través del cuerpo humano[1], pero no toma en cuenta el peso de la persona. En la tabla 2.2 se resumen los valores de la norma IEC 479 y los valores obtenidos a partir de 2.1.

Es obvio que existen ciertas discrepancias entre ambas normas. Esto evidencia la necesidad de investigación adicional en esta área con la finalidad de obtener información adicional que permitan fijar lineamientos coherentes.

Situaciones de Riesgo en las Inmediaciones de un Sistema de Conexión a Tierra(SCT)

En la Fig. 2.1 se muestran diferentes situaciones de riesgo para personas ubicadas en las inmediaciones del Sistema de Conexión a Tierra de una instalación determinada. Al momento de ocurrir una falla que inyecte una corriente en el SCT que retorne por medio del terreno hacia la fuente, el SCT eleva su potencial respecto a una referencia muy lejana a un valor EPT o GPR(Ground Potential Rise).

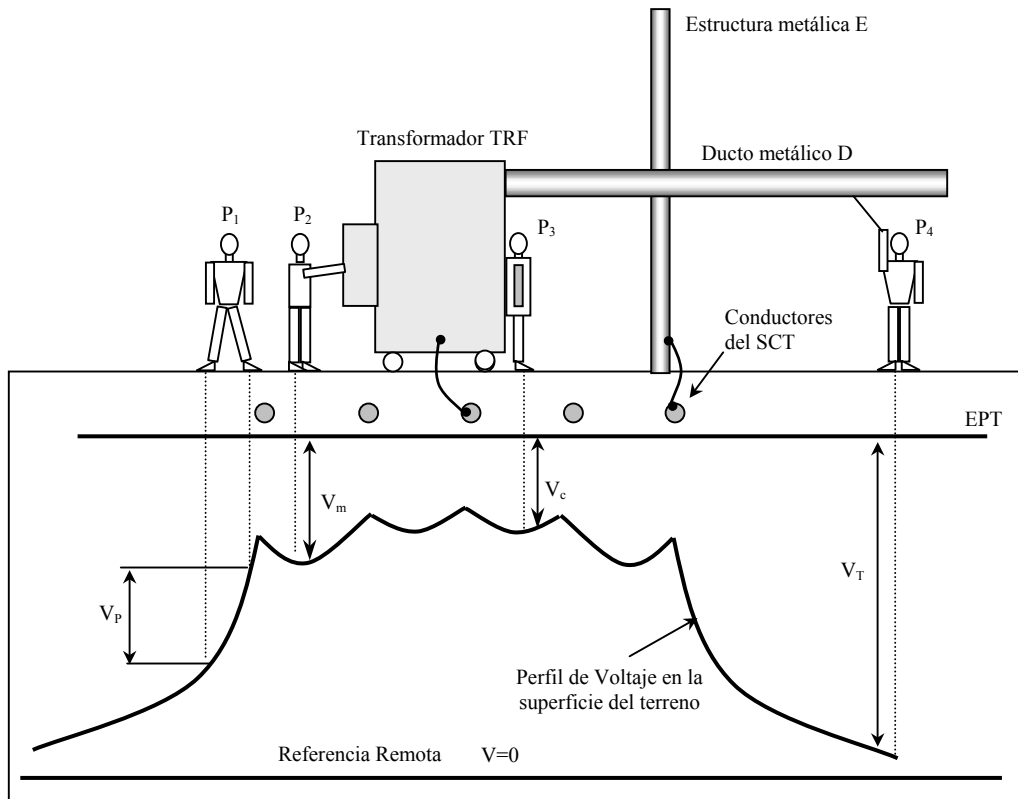


Fig. 2.1 Situaciones de riesgo en las inmediaciones de un SCT

Sobre la superficie del terreno aparece un perfil de voltajes que depende de la forma en que la corriente se distribuye en el terreno para retornar hacia la fuente. La distribución de corriente en el terreno depende de la resistividad del terreno y su heterogeneidad, y de la geometría del SCT. Bajo la premisa que todos los elementos metálicos de la instalación están conectados al SCT, éstos elevarán su potencial al valor EPT; tal es el caso del transformador TRF, la estructura E y el ducto metálico D. El perfil de voltajes en la superficie del terreno sobre el SCT varía desde un valor máximo para aquellos puntos encima de los conductores del SCT hasta un valor mínimo en algún punto intermedio entre la geometría del SCT. En las adyacencias al SCT, el

voltaje sobre la superficie va disminuyendo asintóticamente hacia el valor cero que se asume para un punto muy lejano del SCT.

Las personas P_1 a P_4 indican diferentes situaciones de riesgo y las diferencias de potencial a que pueden estar sometidas en el momento de la falla. P_1 soporta una diferencia de potencial V_p aplicada entre los pies de la persona, a esta diferencia de potencial se le ha denominado ***Voltaje de Paso***. P_2 está expuesta a una diferencia de potencial V_m que corresponde como se indica a la diferencia de potencial entre el EPT y el punto de mínimo potencial entre los dos conductores del SCT; esta diferencia de potencial se le ha denominado ***Voltaje de malla***. P_3 está expuesta a una diferencia de potencial V_c que se ha denominado en forma general ***Voltaje de contacto***. P_4 es la persona que está en la peor condición debido a que se encuentran en una zona donde el perfil de voltaje sobre el terreno tiene un valor pequeño en comparación al EPT; la diferencia de potencial a la que está expuesta es V_T que se ha denominado ***Voltaje Transferido***. En estas situaciones solamente se contemplan dos caminos para la circulación de corriente a través del cuerpo: entre los pies y entre las manos y los pies.

Los voltajes de malla y los voltajes transferidos se pueden considerar como casos especiales de voltajes de contacto. Cada una de estas diferencias de potencial se pueden definir de la siguiente manera[2]:

- ❑ ***Voltaje de contacto(touch voltage)***: Es la diferencia de potencial entre la elevación del potencial de tierra EPT y el potencial en la superficie del terreno en el punto donde la persona está parada, al mismo tiempo que tiene sus manos en contacto con una estructura eléctricamente conductora conectada eléctricamente al SCT.
- ❑ ***Voltaje de malla(mesh voltage)***: Es el máximo voltaje de contacto encontrado dentro de una cuadrícula del SCT mallado. Entendiéndose por cuadrícula el cuadrilátero limitado por conductores del SCT que se cruzan y están conectados eléctricamente de manera intencional en cada cruce.
- ❑ ***Voltaje Transferido(transferred voltage)***: Es un voltaje transferido dentro o fuera de la instalación. Ocurre cuando una persona ubicada en un punto lejano al SCT toca un conductor eléctrico (estructura, ductería, cable de guarda, etc.), conectado al SCT que ha elevado su potencial de tierra por causa de una corriente inyectada al SCT y que retorna por el terreno hacia la fuente.

Criterios de Diseño

Para cumplir con sus funciones existen dos criterios básicos para el diseño de un SCT:

- ❑ Máximos valores de diferencia de voltaje o potencial permitidos en la superficie del terreno para evitar daños irreversibles o la muerte a personas que se encuentren en una situación de riesgo especificada.
- ❑ Un valor máximo especificado de resistencia a tierra. Que no necesariamente garantiza la seguridad de las personas.

Referencias

- [1] BRIDGES, J.E, VAIMBERG, M., WILLS, M.C.: “Impact of Recent Developments in Biological Electric Shock Safety Criteria”, IEEE Trans. Vol. PWRD-2, No. 1, January 1987.
- [2] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding ANSI/IEEE std. 80-1986, New York, IEEE/Wiley, 1986.
- [3] WINBURN, D.C.: “Practical Electrical Safety”, Marcel Dekker, 1988.