

AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos son la parte más importante de cualquier informe, pues en ella se rememoran los momentos que se han vivido y es entonces cuando realmente aprendemos lo que necesitábamos aprender, el alma se cubre de sabiduría con las experiencias y se llena el corazón de gratitud, no solo para aquellos que nos han tendido la mano, sino también con aquellos que nos han dado la espalda; es de ellos de los que debemos aprender más para no cometer sus mismos errores...

Dios, eres el primero en mi lista porque sólo Tú sabes lo que me ha costado llegar hasta aquí y por eso te agradezco infinitamente todo lo bueno y todo lo malo que he vivido, me has hecho crecer como persona...

Te agradezco a Ti, madre hermosa, todos los sacrificios que has hecho por mí, me diste la vida y luego me la cuidaste... ¡Dios te bendiga siempre y bendíceme tú a mí!

Agradezco a mis hermanos, Keeter y Elena, porque le han dado a mi vida el sentido que necesitaba y por haberme asistido cuando los he necesitado, nunca me han fallado. Los amo mucho...

Te agradezco a ti Enrique, porque eres la luz de mis días, eres el niño más hermoso del mundo, Dios te bendiga.

Quiero agradecer a mi gran amigo Antonio Acosta, que ha sido mi bastón de apoyo y me ha enseñado más de lo que él cree...

A Cinthia Martínez, que ha sido mi amiga incondicional, gracias por los consejos aunque nunca los oiga.

A mis amigos del Tecnológico, mis compañeros en las buenas y en las malas.
Gracias por todo.

A Erwin Borsini, mi tutor, por haber sabido darme el empujón en el momento oportuno y brindarme la confianza que necesitaba para seguir. En serio, muchas gracias.

A Jaimito Salinas, por ser tan generoso con nosotros y enseñarme tantas cosas, sobre todo lecciones de humanidad...

A Carlos Cordero, por su generosidad y su paciencia, pero sobre todo por la confianza, me hizo sentirme como en casa.

A Evaristo Da Costa, por su ayuda incondicional y por aliviar con risas los ratos difíciles.

A Jesús Velazco, por ser nuestro compañero y permitirme aprender de él lo que se puede conseguir con constancia y esfuerzo.

A Susane, por darme su amistad casi sin conocerme.

A la profesora Aminta Villega por habernos dado la oportunidad de formar parte de su grupo de clases y aprender cosas para nosotros poco conocidas.

A todo el personal que labora en el edificio: Señora Ceferina, Señor Antonio, Gleb, José López, Señor Douglas y aquellos que en este momento tal vez no recuerde pero que siempre tendré presentes. Gracias por darnos su apoyo.

A todos aquellos que de una u otra manera han estado involucrados en esta actividad, gracias de corazón.

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo y todo el esfuerzo que he puesto en él a mi familia: mi madre, mis hermanos y mi sobrino, porque son ellos los que me impulsan a seguir y los que han depositado toda su confianza en mi. Son mi ejemplo y mi adoración. A ellos nunca podré defraudarlos porque me quieren como soy...

Los amo con todo mi corazón y que Dios los bendiga siempre...

INDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	3
I.1. – Planteamiento del problema	3
I.2. – Justificación	5
I.3. – Objetivos	6
I.4. – Alcances	7
I.5. – Limitaciones	7
CAPITULO II. Marco Teórico	8
II.1. – Riesgo eléctrico	8
II.2. – Iluminación	13
A. – Flujo luminoso	15
B. – Iluminancia	15
C. – Intensidad Luminosa	16
D. – Luminancia	18
E. – Reflexión	22
F. – Deslumbramiento	22
G. – Contraste	23
H. – Sombras	23
I. – Lámparas y luminarias en interiores.	23
J. – Niveles de iluminación recomendados.	25

K. – Curvas fotométricas.	27
L. – Método del punto por punto.. . . .	32
II.3. – Interruptores termomagnéticos	37
II.4. – Medida de parámetros eléctricos aplicados	
a puestas a tierra puntuales	47
CAPITULO III. Metodología	83
III.1. – Fases de la investigación	83
A. – Rediseño del sistema de protecciones eléctricas	
de la sección de Potencia del Laboratorio de Conversión	
de Energía Eléctrica	83
B. – Rediseño del Sistema de Iluminación del Laboratorio	
de Conversión de Energía Eléctrica.	84
C. – Rediseño de la conexión de puesta a tierra	
del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica.	84
III.2. – Tipo de investigación	84
III.3. – Área de investigación	85
CAPITULO IV. Análisis de la situación actual.	86
CAPITULO V. Rediseño de las Instalaciones Eléctricas	
del área de Sistemas de Potencia del	
Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica	
de la Universidad Simón Bolívar.	89
V.1. – Rediseño del Sistema de Protecciones Eléctricas	

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1.1	9
Tabla 2.1.2	10
Tabla 2.2.1	13
Tabla 2.2.2	14
Tabla 2.2.3	15
Tabla 2.2.4	16
Tabla 2.2.5	17
Tabla 2.2.6	19
Tabla 2.2.7	24
Tabla 2.2.8	25-26
Tabla 2.4.1	59
Tabla 2.4.2	60
Tabla 2.4.3	63
Tabla 2.4.4	72
Tabla 2.4.5	74
Tabla 2.4.6	79
Tabla 5.1.1	92
Tabla 5.1.2	94
Tabla 5.1.3	96

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1	10
Figura 2.2	11
Figura 2.3	12
Figura 2.4	17
Figura 2.5	18
Figura 2.6	19
Figura 2.7	21
Figura 2.8	28
Figura 2.9	29
Figura 2.10	29
Figura 2.11	30
Figura 2.12	31
Figura 2.13	32
Figura 2.14	33
Figura 2.15	33
Figura 2.16	34
Figura 2.17	35
Figura 2.18	36
Figura 2.19	38

INDICE DE ANEXOS

	Pág.
A.1. – Triángulo Cromático CIE . . . . .	. 161
A.2. – Fotografías representativas de las etapas de investigación . . . . .	. 163
A.3. – Curvas representativas de ensayos a ITM's. . . . .	. 168
A.4. – Curvas de respuesta tiempo-corriente de ITM's ensayados. Fase de análisis. Características del fabricante. Fuente: www.cutler-hamer.com. . . . .	. 179
A.5. – Curvas de respuesta tiempo-corriente de ITM's ensayados. Fase de rediseño. Características del fabricante. Fuente: www.cutler-hamer.com. . . . .	. 187
A.6. – Curvas Isolux obtenidas en ensayos . . . . .	. 195
A.7. – Catálogo de luminarias. . . . .	. 221
A.8. – Resultados cálculos de iluminancia arrojados por Litestar 3.22 . . . . .	. 229
A.9. – Resultados cálculos de cortocircuito arrojados por ASP . . . . .	. 238
A.10. – Características de los electrodos químicos Chem-Rod Fuente: www.ligthingeliminators.com . . . . .	. 257
A.11. – Planos. . . . .	. 259
Plano P1: Diagrama Unifilar del sistema de potencia actual	

Plano P2: Diagrama Unifilar del sistema de potencia actual

Plano I1: Plano eléctrico de iluminación actual

Plano I2: Plano eléctrico de iluminación rediseño

Plano I3: Plano eléctrico de iluminación rediseño planta techo

Plano I4: Plano físico de luminarias rediseño

Plano I5: Plano físico de luminarias rediseño techo

Plano T1: Diagrama de impedancias del sistema de potencia

Plano T2: Plano de malla de tierra con barras tipo Copperwell

Plano T3: Plano de malla de tierra con electrodos químicos

INTRODUCCIÓN

La calidad del suministro de la energía se está convirtiendo en un aspecto constante de preocupación, tanto para los suministradores de energía como para los usuarios. El equipo que hace uso de la energía eléctrica para su funcionamiento se está volviendo cada vez más susceptible a las desviaciones de los parámetros de suministro. Adicionalmente, los equipos se encuentran cada vez más integrados en procesos interdependientes dentro de las instalaciones industriales y comerciales, por lo que cualquier problema que se presente con alguno de los equipos puede repercutir en paros forzosos de producción en toda una organización, con las consiguiente pérdidas de producto terminado.

La calidad de la energía involucra una serie de parámetros que permiten, en conjunto, obtener un servicio eléctrico confiable y con niveles de distorsión tolerables, lo que origina un mayor rendimiento de los equipos que funcionan dentro del sistema de potencia.

Entre los parámetros citados se encuentra la continuidad del servicio que, descartando las fallas externas, depende única y exclusivamente del sistema de protecciones eléctricas. Es sumamente importante que el sistema se encuentre correctamente dimensionado con respecto a la carga manejada, permitiendo entonces la aplicación de los cuatro criterios de una buena coordinación de protecciones: selectividad, rapidez, confiabilidad y seguridad. El cumplimiento de estos criterios conlleva a la obtención de un sistema seguro tanto para los usuarios como para las instalaciones, además de garantizar el suministro de energía.

Otra consideración a tener en cuenta es el ahorro de energía, que permite al usuario gozar de un servicio eléctrico excelente a un menor costo. En estos términos se involucra el consumo de potencia de los equipos que se encuentran dentro del sistema eléctrico que, dependiendo del tipo de tecnología que empleen, pueden resultar más o menos eficientes en función de la disminución del consumo de potencia. Es por tal motivo que la tecnología de avanzada busca obtener el mismo rendimiento en los

equipos pero implicando en ello una disminución del consumo de energía. A tales efectos, en la actualidad, se hace inminente la renovación de tecnología con la finalidad de obtener un mayor rendimiento con un menor consumo de potencia.

La seguridad de los usuarios es otro factor determinante en la calidad de la energía, por lo que el servicio debe garantizar su bienestar y proporcionarle un sistema libre de riesgo eléctrico.

Basados en los principios de la calidad de la energía, se realizó la evaluación técnica de las instalaciones eléctricas del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica de la Universidad Simón Bolívar, con el objeto de plantear un rediseño que optimice el servicio eléctrico del edificio y a su vez garantice el mayor rendimiento posible de las instalaciones evaluadas.

Fueron objeto de análisis en este proyecto de investigación el sistema de protecciones eléctricas de la sección de Sistemas de Potencia, el sistema de iluminación y el sistema de puesta a tierra del edificio, utilizando como base para la realización del rediseño las evaluaciones previas realizadas al sistema y los datos adquiridos de la última auditoria eléctrica realizada en el edificio.

Los criterios empleados para el rediseño se basaron en la búsqueda de la optimización del servicio eléctrico, tomando en cuenta para ello el concepto de calidad de energía, a fines de proporcionar propuestas cuya implementación permita mejorar el servicio prestado por el laboratorio.

CAPITULO I

I.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Recientemente, se ha observado en el Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica (LCEE) un incremento en el número de inconvenientes relacionados, en la mayoría de los casos, con variaciones rápidas de tensión, corrientes armónicas, sobretensiones e interrupciones del servicio eléctrico.

Estos disturbios afectan el funcionamiento de cargas diversas presentes en el LCEE, entre ellos equipos sensibles de electrónica convencional y sofisticada tales como controladores de procesos PLC, controladores de velocidad, computadoras, inyectores de corriente electrónicos, entre otras. Se hace necesario, entonces, hablar de Calidad de la Energía, implicando en ello una amplia gama de factores que intervienen en todos los procesos concernientes a la generación, transmisión, distribución y consumo de energía eléctrica.

Son objeto de análisis en este proyecto tres de los elementos importantes que afectan la calidad energética:

a) El sistema de protecciones eléctricas de las instalaciones de la sección de Sistemas de Potencia, que afecta la continuidad del servicio en casos de falla y puede originar daños a las instalaciones y sus usuarios.

b) El sistema de iluminación, elemento que afecta la calidad del trabajo en el edificio de Conversión de Energía Eléctrica.

c) La conexión de puesta a tierra, elemento de protección de usuarios y de instalaciones eléctricas, además de ser un agente atenuador de otros fenómenos que afectan la calidad del servicio eléctrico como son las distorsiones armónicas en la red eléctrica.

El sistema de protecciones eléctricas, con adecuados criterios de selectividad y rapidez en la coordinación de protecciones, permite el despeje de posibles fallas sin interrumpir por ello el suministro de energía de todo el sistema. Para establecer como

necesidad la evaluación del sistema de protecciones eléctricas de la sección de Sistemas de Potencia del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica se consideró que una de las áreas que comprende el sistema eléctrico global es un laboratorio de ensayos de protecciones eléctricas, con equipos de altos niveles de consumo de potencia y además se consideró la presencia de dos salas de computación y una computadora en cada oficina con comunicaciones de red y servicio de Internet, que requieren de un sistema eléctrico confiable y sin distorsiones.

Aunado a las características de uso de la sección de Sistemas de Potencia se consideró que la carga ha sido incrementada por modificaciones realizadas a la estructura en los últimos años, sin que se haya verificado la efectividad del sistema de protecciones.

En cuanto al sistema de iluminación, la tecnología que se presenta data desde la construcción de la edificación y no se cuenta con registros de estudios realizados en los últimos años, siendo esto un factor importante para evaluar la eficiencia del sistema según la normativa actual (C.E.N.). Otra consideración tomada fue el consumo de potencia por lámpara (suministrada por el fabricante), que determinó la necesaria implementación de tecnología más avanzada que disminuya el consumo de energía en valores considerables según criterios técnicos, a fines de optimizar la calidad del servicio.

Una de las dificultades que presenta el sistema de iluminación actual es el reflejo en los monitores de las computadoras, factor que se tomó en consideración al momento de seleccionar el tipo de luminaria empleada en el rediseño.

Es necesario destacar que el sistema eléctrico presentado fue diseñado hace más de veinte años y las modificaciones efectuadas han sido basadas en la reserva de los tableros, limitándole su capacidad original. Además debe considerarse la evolución de la normativa eléctrica en cuanto a edificaciones industriales y laboratorios se refiere, pues el sistema presenta discordancias con la normativa vigente (Código Eléctrico Nacional año 2000).

En las condiciones actuales, el sistema eléctrico referido presenta signos de

envejecimiento y fallas en algunos ramales del sistema, situación que es necesario solventar en función de la calidad de la energía

En vista de la problemática expuesta anteriormente y de las dificultades a futuro que puede acarrear el sistema eléctrico de no ser debidamente supervisado, se planteó la necesidad de ejecutar una evaluación técnica del sistema de protecciones y del sistema de iluminación del área descrita, implicando en ello un estudio completo de la carga eléctrica que se maneja, del tipo de protecciones que se emplean, su efectividad y su dimensionamiento, además de requerir ensayos de protecciones y de áreas iluminadas (ensayos luminotécnicos) para comprobar el estado real del sistema. Además, se realizaron ensayos al terreno y mediciones de puesta a tierra con el objeto de diseñar un arreglo de puesta a tierra que cumpla con los requerimientos del laboratorio. Basados en los resultados obtenidos se realizaron propuestas para mejorar el sistema eléctrico, a fin que la implementación quede a bien de la disponibilidad de recursos por parte de la Universidad Simón Bolívar cuando así lo determine, sin implicar por ello la participación de los evaluadores en la implementación de las propuestas.

I.2.- JUSTIFICACIÓN.

Hace algunas décadas la calidad de la energía no era preocupante pues no tenía efectos significativos en los equipos conectados a la red de distribución. En general era suficiente con especificar el voltaje y la frecuencia de operación de los equipos; sin embargo para las empresas eléctricas y consumidores, la calidad de la energía eléctrica es un tema de reciente y creciente interés. Lo anterior parte del hecho que se ha observado un gran crecimiento en torno al uso de cargas electrónicas, que son sensibles a los disturbios en el servicio eléctrico. De la misma manera en las últimas décadas la evolución tecnológica ha sido inminente y se enfoca cada vez más a generar beneficios y comodidades, aunque ello requiera readaptar una y otra vez los sistemas que se definen dentro de cualquier ámbito. Los sistemas eléctricos no se han visto exentos del auge evolutivo pues, si bien su estructura no sufre modificaciones sustanciales, se

presentan necesidades de protección más eficientes que incrementen la confiabilidad del servicio, además se requiere de un sistema limpio que permita la implementación de la nueva tecnología electrónica y comunicaciones. No conforme con esto, se requiere de un sistema de iluminación que satisfaga las necesidades de los usuarios y a su vez introduzca la menor cantidad de distorsiones dentro de la línea eléctrica.

Los sistemas diseñados hace más de dos décadas no consideran parámetros que han surgido a partir de la tecnología electrónica y que afectan la calidad del servicio eléctrico, como es la presencia del tercer armónico en la red de alimentación eléctrica. Es entonces cuando surge la necesidad del rediseño, permitiendo establecer las condiciones reales del sistema y a su vez actualizarlo con respecto a la norma legal vigente.

Con el objeto de plantear propuestas dirigidas a cubrir tales necesidades se hizo factible la ejecución de este proyecto.

I.3.- OBJETIVOS.

Objetivo General: Rediseñar las instalaciones eléctricas del área de Sistemas de Potencia del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica de la Universidad Simón Bolívar.

Objetivos específicos:

- Calcular las variables del circuito: corriente, tensión, potencia, niveles de cortocircuito, etc.
- Obtener información teórica acerca de la carga del laboratorio y los componentes actuales del sistema de puesta a tierra, iluminación y protecciones eléctricas.
- Realizar ensayos a la conexión de puesta a tierra.
- Realizar ensayos al sistema de iluminación de edificio.
- Realizar ensayos a los diferentes componentes del sistema de

protecciones eléctricas de la Sección de Potencia del LCEE.

- Presentar propuestas para la actualización del sistema de protecciones eléctricas.
- Proyectar un nuevo diseño para el sistema de iluminación.
- Evaluar las condiciones actuales de la conexión de puesta a tierra.
- Proponer, a partir de los resultados obtenidos, el diseño de un arreglo de puesta a tierra que cumpla con los requerimientos estipulados en la normativa legal vigente.

I.4.- ALCANCES.

El rediseño proyectado se orientó hacia la calidad de la energía a fines de actualizar teóricamente el sistema de protecciones eléctricas y el sistema de iluminación del área descrita, basándose en la normativa legal vigente y utilizando criterios técnicos con el fin de que al ser implementada se obtenga un sistema eléctrico confiable y a la vez eficiente.

No se contempló la implementación ni la prueba del diseño propuesto, pues se deja al criterio y a la disponibilidad de recursos por parte de la Universidad Simón Bolívar la ejecución del planteamiento realizado.

I.5.- LIMITACIONES.

El rediseño del sistema de protecciones sólo se desarrolló en las instalaciones del área de Sistemas de Potencia del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica y no en el área total de la estructura, pues las necesidades prioritarias se presentaron en el área evaluada.

Para la realización de los ensayos y las mediciones necesarias se contó sólo con la tecnología ofrecida por la Universidad y aquella que pudo conseguirse por parte de los proyectistas.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

II.1.- RIESGO ELÉCTRICO

Definiciones

- 1) Umbral de Percepción: Es el valor mínimo de la corriente que causa alguna sensación para la persona atravesada por ella.
- 2) Umbral de desprendimiento: Es el valor máximo de corriente a la cual alguna persona agarrada a electrodos puede desprenderse de ellos.
- 3) Umbral de Fibrilación Ventricular: El valor mínimo de la corriente el cual causa fibrilación ventricular.
- 4) Período Vulnerable: El período vulnerable abarca una parte comparativamente reducida del ciclo cardíaco (10 al 20%), durante el cual las fibras del corazón están en estado no homogéneo de excitabilidad y la fibrilación ventricular ocurre si ellas son excitadas por una corriente eléctrica de suficiente valor.

Efectos de la corriente

- A) Umbral de Percepción: Este depende de varios parámetros tales como: área del cuerpo en contacto, condiciones del contacto (seco - mojado - temperatura) y también de las características fisiológicas de las personas, en general se toma 0,5 mA independientemente del tiempo.
- B) Umbral de desprendimiento: Al igual que en el anterior dependen de los mismos parámetros. Un valor de 10mA se considera normal.

C) Umbral de fibrilación ventricular: Este valor depende de parámetros fisiológicos (anatomía del cuerpo, estado del corazón, duración camino, clases de corrientes, etc). Con corriente de 50 y 60 Hz hay una considerable disminución del umbral de fibrilación y su aparición, si la corriente fluye más allá de un ciclo cardíaco (400 msec.) Para shock eléctrico menores a 0,1 seg. la fibrilación puede ocurrir recién con corrientes mayores a 500 mA. **Y para 3 seg. a solo 40 mA.** La fibrilación ventricular es la causa principal de muerte por shock eléctrico, pero esta también se produce por asfixia o paros cardíacos. Otros efectos: Contracciones musculares, dificultades en la respiración, aumento en la presión y paros cardíacos transitorios pueden ocurrir sin llegar a la fibrilación ventricular. La corriente eléctrica tiene efectos sobre el cuerpo humano, posteriores al momento de su descarga. Así, se comprueban efectos luego de 6 meses en hombros y riñones por descargas recibidas a través de la mano.

Con corrientes de varios amper (3 a 5) hay energía como para originar incendios.

Efectos de la corriente eléctrica pasando a través del cuerpo humano.

Los valores de la impedancia total del cuerpo dados en la tabla 2.1 son válidos para seres vivos siendo el camino de corriente mano a mano o mano a pie para una área de contacto de 50 cm² a 100 cm² y con piel seca. Con voltaje hasta 50V, los valores medidos con piel mojada con agua normal son de 10 a 25 % más bajos que con piel seca, con soluciones conductivas del agua, la impedancia baja considerablemente la mitad de los valores en seco. Con voltajes más altos hasta 150V, la impedancia del cuerpo depende sólo ligeramente de la humedad y del área de contacto.

Impedancia Interna del Cuerpo Humano			
VOLTAJE DE CONTACTO	VALOR DE Z_t QUE NO SUPERA EL % DE POBLACIÓN		
	5%	50%	95%
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4375
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
125	1125	1625	2875
220	1000	1350	2125

Tabla 2.1.1. - Impedancia Interna del Cuerpo Humano en función de la corriente.

Fuente: www.seguridad.com

Los números indican el porcentaje de la impedancia del cuerpo humano para el camino indicado en relación al camino mano a mano (100%).

Efectos de la corriente según la intensidad y el tiempo de aplicación	
Zonas	Efectos Fisiológicos.
Zona I	Normalmente sin reacción.
Zona II	Usualmente sin efectos fisiológicos.
Zona III	Usualmente no se esperan daños orgánicos. Aparecen contracciones musculares y dificultad en la respiración, disturbios reversibles de impulsos en el corazón. Paros cardiacos transitorios sin fibrilación ventricular se incrementan con la corriente y el tiempo.
Zona IV	En adición a los efectos de la Zona III, la probabilidad de fibrilación ventricular se incrementa hasta un 5% sobre (curva C2), y hasta un 50% (curva C3), y arriba de un 50% por encima de la curva c3. Los efectos de paros cardiacos, respiratorios y quemaduras pueden ocurrir con el incremento de la corriente y el tiempo .

Tabla 2.1.2. Fuente: www.seguridad.com

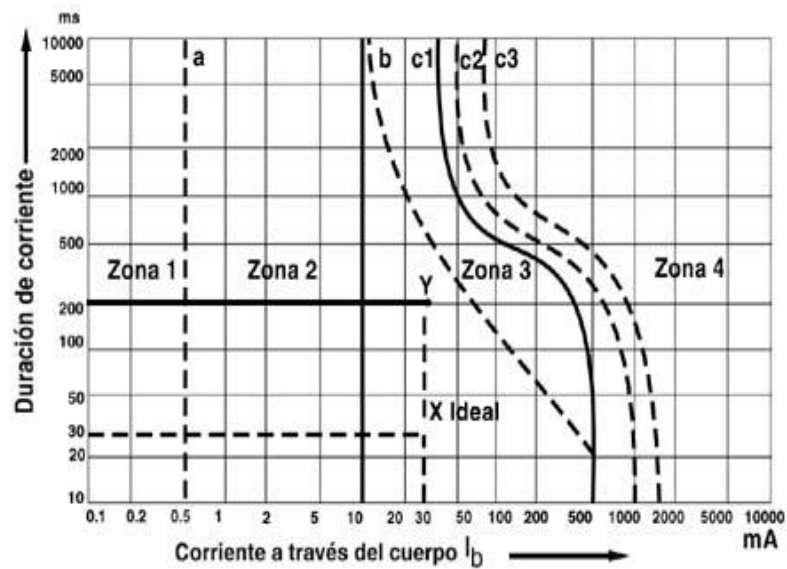


Figura 2.1.- Curva de Tiempo / Corriente de efectos de la corriente sobre las personas (15 a 100 Hz.).Fuente:www.seguridad.com

II.2.- ILUMINACIÓN.

Luminotecnia es la ciencia que estudia las distintas formas de producción de luz, así como su control y aplicación. Es necesario, entonces, comenzar el estudio examinando las variaciones electromagnéticas simples, que pueden clasificarse bien por su forma de generarse, por sus manifestaciones o efectos, o simplemente por su longitud de onda.

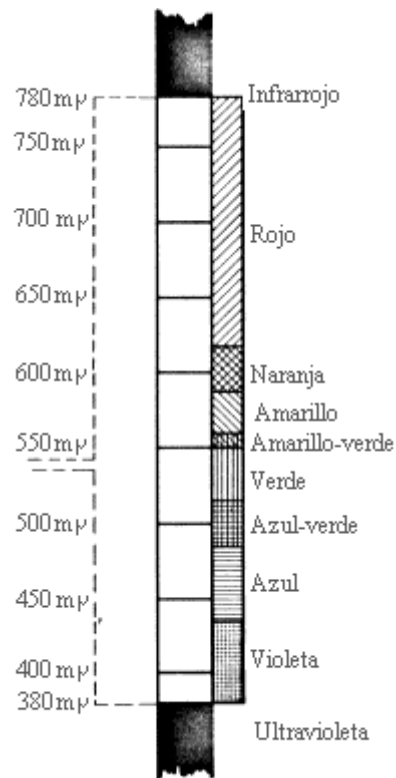


Figura 2.2.

Fuente: www.elprisma.com

Las radiaciones visibles se caracterizan por ser capaces de estimular el sentido de la vista y estar comprendidas dentro de una franja de longitud de onda muy estrecha, percibida aproximadamente entre 380 y 780 mμ. (1 milimicra = 10^{-9} m.). Esta franja de radiaciones visibles, está limitada de un lado por las radiaciones ultravioleta y de otro, por las radiaciones infrarrojas, que naturalmente no son perceptibles por el ojo humano.

Una de las características más importantes de las radiaciones visibles es el color. Estas radiaciones, además de suministrar una impresión luminosa, proporcionan una sensación del color de los objetos que nos rodean. Dentro del espectro visible, pueden clasificarse una serie de franjas, cada una de las cuales se caracteriza por producir una impresión distinta, característica peculiar de cada color. Puesto que el receptor de estas sensaciones de color es el ojo humano, resultaba interesante conocer su sensibilidad para cada una de estas radiaciones. Para ello se dispuso de fuentes de luz capaces de generar cantidades iguales de energía de todas las longitudes de onda visibles, y se realizó el ensayo comparativo de la sensación luminosa producida a un

gran número de personas. El ensayo dió como resultado que no todas las longitudes de onda producían la misma impresión luminosa y que la radiación que más impresión causaba era la correspondiente a una longitud de onda de 550 m μ , propia del color amarillo-verde. Esta impresión iba decreciendo a derecha e izquierda del valor máximo característico, siendo los colores rojo y violeta los que daban una menor impresión.

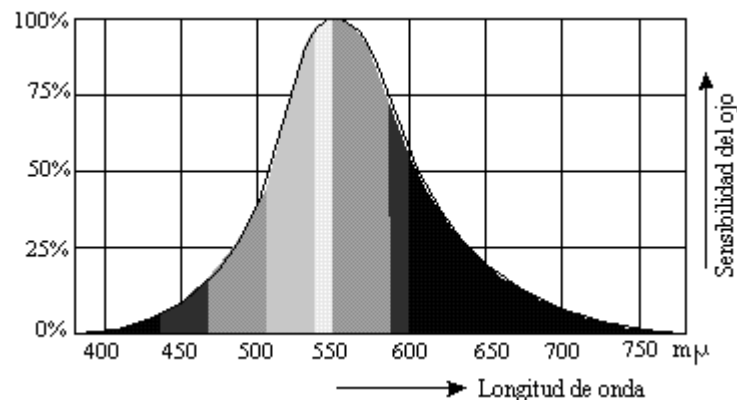


Figura 2.3.

Fuente: www.elprisma.com

De estos resultados se obtuvo la "Curva Internacional de Sensibilidad del ojo humano", tal y como se representa en la figura 2.3.

Otro dato digno de tener presente en luminotecnia es el conocido con el nombre de Temperatura del Color. Considerado el cuerpo negro como radiante teóricamente perfecto, este va cambiando de color a medida que vamos aumentando su temperatura, adquiriendo al principio el tono de un rojo sin brillo, para luego alcanzar el rojo claro, el naranja, el amarillo, el blanco, el blanco azulado, y finalmente el azul. De esta idea nace la Temperatura del Color, y se utiliza para indicar el color de una fuente de luz por comparación de esta con el color del cuerpo negro a una determinada temperatura. Así, por ejemplo, el color de la llama de una vela es similar al de un cuerpo negro calentado a 1.800 °K, por lo que se dice que la temperatura de color de la llama de una vela es de 1.800 °K.

La temperatura de color solamente puede ser aplicada a aquellas fuentes de luz que tengan una semejanza con el color del cuerpo negro, como por ejemplo la luz del día, la luz de las lámparas incandescentes, la luz de las lámparas fluorescentes, etc. El

color de las lámparas de vapor de sodio, no coincide con el color del cuerpo negro a ninguna temperatura, por lo que ni pueden ser comparadas con él, ni se les puede asignar ninguna temperatura de color.

A continuación se muestran algunas temperaturas de color, con el fin de facilitar la comprensión del texto:

Lámparas fluorescentes	Lámparas incandescentes
Blanco cálido 3.000 °K	Luz de velas 1.800 °K
Luz solar directa 5.000 °K	Normales 2.600 °K
Luz día 6.500 °K	Halógenas 3.100 °K
Cielo azul 20.000 °K	Cielo nublado 7.000 °K

Tabla 2.2.1. Fuente: Manual de alumbrado

Existe una cierta relación entre la temperatura de color y el nivel de iluminación, de tal forma que a mayor temperatura de color la iluminación ha de ser también mayor para conseguir una sensación agradable.

Los colores del espectro visible, así como todos los que resultan de la mezcla de distintos colores, se pueden representar matemáticamente por medio de un diagrama de colores o triángulo cromático, aprobado por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE por sus siglas en inglés), el cual se emplea al tratar del color de las fuentes de luz y otros materiales tales como filtros luminosos, pinturas, etc.

En este diagrama todos los colores están ordenados respecto a los valores de tres coordenadas cromáticas x , y , z , para cada uno de ellos. Dos coordenadas cualesquiera son suficientes para determinar el punto representativo o lugar geométrico de un color o mezcla de colores.

Se presenta el diagrama cromático del CIE en el anexo A-1. Debido a que no se puede lograr una fiel impresión de los colores que coincida exactamente con los

respectivos cálculos matemáticos, la combinación de colores que aparece en este triángulo debe considerarse aproximada a la realidad.

Partiendo de la base que para poder hablar de iluminación es preciso contar con la existencia de una fuente productora de luz y de un objeto a iluminar, algunas de las magnitudes que deben conocerse y definirse son las siguientes:

MAGNITUD	UNIDAD	SÍMBOLO
Flujo luminoso	Lumen	Φ
Nivel de iluminación Illuminancia	Lumen / m ² = Lux	E
Intensidad luminosa	Candela	I
Luminancia	Candela / m ²	L

Tabla 2.2.2. Fuente: Manual de alumbrado

El flujo luminoso y la intensidad luminosa son magnitudes características de las fuentes de luz, indicando la primera la cantidad de luz emitida por dicha fuente en 1 segundo en todas direcciones, mientras que la segunda indica la cantidad de luz emitida en 1 segundo y en una determinada dirección.

Seguidamente se definen más detalladamente cada una de estas magnitudes.

A) Flujo luminoso

Es la magnitud que mide la potencia o caudal de energía de la radiación luminosa y se puede definir de la siguiente manera:

Flujo luminoso es la cantidad total de luz radiada o emitida por una fuente durante un segundo.

$$\phi = \frac{Q}{t}$$

donde:

Φ = Flujo luminoso en Lúmenes.

Q = Cantidad de luz emitida en Lúmenes x seg.

t = Tiempo en segundos.

El Lumen como unidad de potencia corresponde a 1/680 W emitidos a la longitud de onda de 550 mμ.

Ejemplos de flujos luminosos:

Lámpara de incandescencia de 60 W.	730 Lm.
Lámpara fluorescente de 65 W. "blanca"	5.100 Lm.
Lámpara halógena de 1000 W.	22.000 Lm.
Lámpara de vapor de mercurio 125 W.	5.600 Lm.
Lámpara de sodio de 1000 W.	120.000 Lm.

Tabla 2.2.3. Manual de alumbrado

B) Iluminancia

En nivel de iluminación o iluminancia se define como el flujo luminoso incidente por unidad de superficie.

$$E = \frac{\phi}{S} \quad \text{Lumen/m}^2 = \text{Lux}$$

A su vez, el Lux se puede definir como la iluminación de una superficie de 1 m² cuando sobre ella incide, uniformemente repartido, un flujo luminoso de 1 Lumen.

La medición de la iluminancia se realiza por medio de un aparato especial denominado **Luxómetro**, que consiste en una célula fotoeléctrica que, al incidir la luz sobre su superficie, genera una débil corriente eléctrica que aumenta en función de la

luz incidente. Dicha corriente se mide con un miliamperímetro calibrado directamente en lux.

Ejemplos de niveles de iluminación:

Mediodía en verano	100.000 Lux.
Mediodía en invierno	20.000 Lux.
Oficina bien iluminada	400 a 800 Lux.
Calle bien iluminada	20 Lux.
Luna llena con cielo claro	0,25 a 0,50 Lux.

Tabla 2.2.4. Fuente: Manual de alumbrado

C) Intensidad luminosa

La intensidad luminosa de una fuente de luz en una dirección dada, es la relación que existe entre el flujo luminoso contenido en un ángulo sólido cualquiera, cuyo eje coincida con la dirección considerada, y el valor de dicho ángulo sólido expresado en estereoradianes.

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \text{ Candelas}$$

donde:

I = Intensidad luminosa en candelas.

Φ = Flujo luminoso en lúmenes.

ω = Ángulo sólido en estereoradianes.

La candela se define también como 1/60 de la intensidad luminosa por cm^2 del "cuerpo negro" a la temperatura de solidificación del platino (2.042 °K).

Con el fin de aclarar el concepto de ángulo sólido, imagínese una esfera de radio unidad y en su superficie se delimita un casquete esférico de 1 m^2 de superficie. Uniendo el centro de la esfera con todos los puntos de la circunferencia que limitan dicho casquete, se formará un cono con la base esférica; el valor del ángulo sólido

determinado por el vértice de este cono, es igual a un estereoradián, o lo que es lo mismo, un ángulo sólido de valor unidad.

En general, se define el estereoradián como el valor de un ángulo sólido que determina sobre la superficie de una esfera un casquete cuya área es igual al cuadrado del radio de la esfera considerada.

$$\omega = \frac{S}{r^2}$$

Según se puede apreciar en la figura, la definición de ángulo sólido nos da idea de la relación existente entre flujo luminoso, nivel de iluminación e intensidad luminosa.

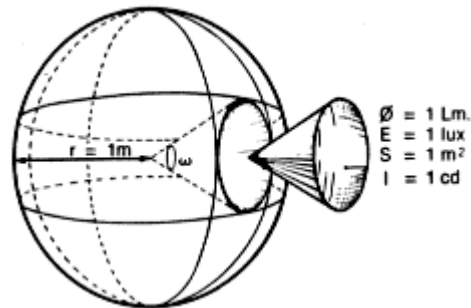


Figura 2.4. Fuente:www.elprisma.com

Ejemplos de intensidad luminosa:

Lámpara para faro de bicicleta sin reflector	1 cd.
Lámpara PAR-64 muy concentrada	200.000 cd.
Faro marítimo (Centro del haz)	2.000.000 cd.

Tabla 2.2.5. Fuente: Manual de alumbrado

D) Luminancia

Luminancia es la intensidad luminosa por unidad de superficie perpendicular a la dirección de la luz.

$$L = \frac{I}{S}$$

La luminancia L suele expresarse indistintamente en candelas/cm² o en candelas/m².

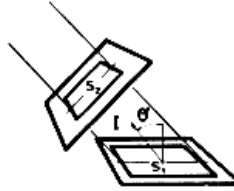


Figura 2.5. Fuente: Manual de alumbrado

Cuando la superficie considerada S_1 no es perpendicular a la dirección de la luz, habrá que considerar la superficie real S_2 , que resulta de proyectar S_1 sobre dicha perpendicular.

$$S_2 = S_1 \cos \theta$$

Por lo tanto:

$$L = \frac{I}{S_2} = \frac{I}{S_1 \cos \theta}$$

La luminancia es lo que produce en el órgano visual la sensación de claridad, pues la luz no se hace visible hasta que es reflejada por los cuerpos. La mayor o menor claridad con que vemos los objetos igualmente iluminados, depende de su iluminancia.

La percepción de la luz es realmente la percepción de diferencias de luminancia. Se puede decir, por lo tanto, que el ojo ve diferencias de luminancia y no de iluminación.

Ejemplos de luminancia:

Filamento de lámpara incandescente	10.000.000 cd./m ²
Arco voltaico	160.000.000 cd./m ²
Luna llena	2.500 cd./m ²

Tabla 2.2.6. Fuente: Manual de alumbrado

Con ayuda de la figura y algunas de las fórmulas anteriormente expuestas, se llega a interesantes conclusiones, que más adelante serán útiles para los cálculos.

Siendo:

$$\phi = E S \quad ; \quad \omega = \frac{S}{r^2}$$

tendremos que

$$I = \frac{\phi}{\omega} = \frac{E S}{\omega} = E r^2$$

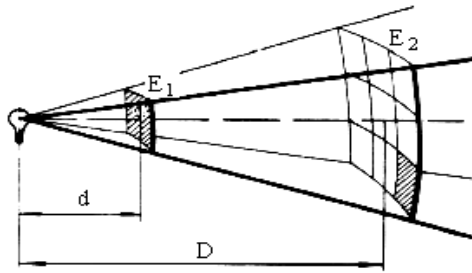


Figura 2.6.

Fuente: Manual de alumbrado

Si se toma en cuenta que los flujos luminosos y las intensidades luminosas son iguales en ambas superficies, tendremos que:

$$I = E_1 d^2 \quad ; \quad I = E_2 D^2$$

de donde:

$$E_1 d^2 = E_2 D^2 \quad ; \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{D^2}{d^2}$$

Este es el principio de la Ley de la inversa del cuadrado de la distancia, que dice que para un mismo manantial luminoso, las iluminancias en diferentes superficies situadas perpendicularmente a la dirección de la radiación son directamente proporcionales a la intensidad luminosa del foco, e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia que las separa del mismo. Se cumple cuando se trata de una

fuelle puntual de superficies perpendiculares a la direcció del flujo luminoso y cuando la distancia es grande en relación al tamaño del foco.

Según estas fórmulas, se observa como una fuente de luz con una intensidad luminosa de 200 candelas en la direcció del eje de la figura 2.6 determina sobre un punto situado a 1 metro de distancia, un nivel de iluminación de:

$$E = \frac{I}{d^2} = \frac{200}{1^2} = 200 \text{ lux}$$

Si ahora se supone que el punto está situado a 3 metros, el nivel de iluminación se verá reducido en una novena parte.

$$E = \frac{200}{3^2} = \frac{200}{9} = 22,2 \text{ lux}$$

Cuando la superficie iluminada no es perpendicular a la direcció del rayo luminoso, la iluminancia o nivel de iluminación, viene modificado por el coseno del ángulo de incidencia, que es el ángulo formado por la direcció del rayo incidente y la normal a la superficie en el punto considerado.

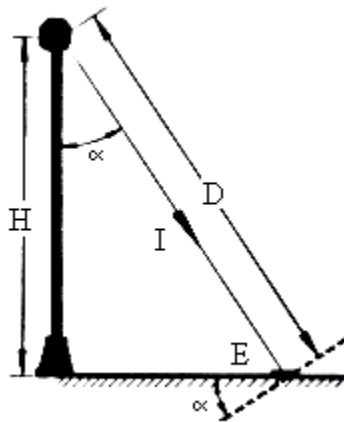


Figura 2.7. Fuente: Manual de alumbrado

Así se tiene que:

$$E = \frac{I \cos \alpha}{D^2}$$

Suponiendo que el punto de luz se encuentra a una altura H, sobre la horizontal

$$\cos \alpha = \frac{H}{D} \quad ; \quad D = \frac{H}{\cos \alpha}$$

y por tanto,

$$E = \frac{I \cos^3 \alpha}{H^2}$$

Por ejemplo, si se asume una fuente de luz a una altura de 8 metros, con una intensidad luminosa de 200 candelas, en un punto que forma 20° con la vertical, el nivel de iluminación en dicho punto será:

$$E = \frac{200 \cos^3 20}{8^2} = 2,59 \text{ lux}$$

A este planteamiento se le conoce como **Ley del coseno**, donde se dice que la iluminancia en un punto cualquiera de una superficie es proporcional al coseno del ángulo de incidencia de los rayos luminosos en el punto iluminado.

E) Reflexión

Se le llama reflexión al choque de los haces luminosos con superficies de diferentes texturas, generando haces reflejados en diferentes direcciones, dependiendo de las características del material de choque.

Se presentan diferentes tipos de reflexión:

- Dirigida o especular: producida por superficies completamente lisas y brillantes, como los espejos de vidrio azogado y los metales pulimentados.
- Difusa: producida por superficies rugosas y mates, como la tela blanca y el yeso.
- Semidirigida: producida por superficies rugosas y brillantes.
- Semidifusa: producida por superficies blancas y esmaltadas.

La mayor parte de los materiales presentan una combinación de todas ellas, siendo la reflexión difusa la que evita el deslumbramiento.

F) Deslumbramiento

Es un fenómeno de la visión que produce molestia o disminución en la capacidad para distinguir objetos, o ambas cosas a la vez, debido a una inadecuada distribución o escalonamiento de luminancias, o como consecuencia de contrastes excesivos en el espacio o en el tiempo. Este fenómeno actúa sobre la retina del ojo en la cual produce una enérgica reacción fotoquímica, insensibilizándola durante un cierto tiempo, transcurrido el cual vuelve a recuperarse.

Los principales factores que intervienen en el deslumbramiento son:

- La iluminancia de la fuente de luz o de las superficies iluminadas.
- Las dimensiones de la fuente de luz en función del ángulo subtendido por el ojo a partir de los 45° con respecto a la vertical.
- La situación de la fuente de luz.
- El contraste entre la luminancia de la fuente de luz y la de sus alrededores.
- El tiempo de exposición.

G) Contraste

La diferencia de luminancia entre el objeto que se observa y su espacio inmediato es lo que se conoce como contraste. Los trabajos que requieran gran agudeza visual precisan de un mayor contraste.

La combinación acertada de los grados de reflexión de las superficies de un recinto permite obtener una disminución armónica de la luminancia, produciéndose con ello un contraste fácil de distinguir. La relación de luminancias en un campo visual no debe ser menor de 1:3 ni mayor de 3:1.

H) Sombras

Las sombras en sí son el resultado de una diferencia de luminancia respecto a zonas más iluminadas. Se distinguen dos clases de sombras: fuertes y suaves. Sombras fuertes son las que resultan de iluminar un objeto con luz dirigida intensa desde un punto determinado más o menos alejado, y se caracterizan por su profunda oscuridad y dureza con alto efecto de relieve. Las sombras suaves son las que resultan de iluminar un objeto con una luz difusa y se caracterizan por su suavidad y menor efecto de relieve.

I) Lámparas y luminarias en interiores

Las lámparas empleadas en iluminación de interiores abarcan casi todos los tipos existentes en el mercado (incandescentes, halógenas, fluorescentes, etc.). Las lámparas escogidas, por lo tanto, serán aquellas cuyas características (fotométricas, cromáticas, consumo energético, economía de instalación y mantenimiento, etc.) mejor se adapte a las necesidades y características de cada instalación (nivel de iluminación, dimensiones del local, ámbito de uso, potencia de la instalación...)

Tabla 2.2.7. – Tipo de lámpara por área de trabajo.

Fuente: www.prisma-ingenieria.com

Ámbito de uso	Tipos de lámparas más utilizados
Doméstico	Incandescente Fluorescente Halógenas de baja potencia Fluorescentes compactas
Oficinas	Alumbrado general: fluorescentes

	Alumbrado localizado: incandescentes y halógenas de baja tensión
Comercial (Depende de las dimensiones y características del comercio)	Incandescentes Halógenas Fluorescentes Grandes superficies con techos altos: mercurio a alta presión y halogenuros metálicos
Industrial	Todos los tipos Luminarias situadas a baja altura (<6 m): fluorescentes Luminarias situadas a gran altura (>6 m): lámparas de descarga a alta presión montadas en proyectores Alumbrado localizado: incandescentes
Deportivo	Luminarias situadas a baja altura: fluorescentes Luminarias situadas a gran altura: lámparas de vapor de mercurio a alta presión, halogenuros metálicos y vapor de sodio a alta presión

La elección de las luminarias está condicionada por la lámpara utilizada y el entorno de trabajo de esta. Hay muchos tipos de luminarias y sería difícil hacer una clasificación exhaustiva. La forma y tipo de las luminarias oscilará entre las más funcionales donde lo más importante es dirigir el haz de luz de forma eficiente como pasa en el alumbrado industrial a las más formales, donde lo que fundamental es la función decorativa como ocurre en el alumbrado doméstico.

Las luminarias para lámparas incandescentes tienen su ámbito de aplicación básico en la iluminación doméstica. Por lo tanto, predomina la estética sobre la eficiencia luminosa. Sólo en aplicaciones comerciales o en luminarias para iluminación suplementaria se buscará un compromiso entre ambas funciones. Son aparatos que necesitan apantallamiento pues el filamento de estas lámparas tiene una luminancia muy elevada y pueden producir deslumbramientos.

En segundo lugar están las luminarias para lámparas fluorescentes. Se utilizan mucho en oficinas, comercios, centros educativos, almacenes, industrias con techos bajos, etc. por su economía y eficiencia luminosa. Así pues, se tiene una gran variedad de modelos que van de los más simples a los más sofisticados con sistemas de

orientación de la luz y apantallamiento (modelos con rejillas cuadradas o transversales y modelos con difusores).

Por último se encuentran las luminarias para lámparas de descarga a alta presión. Estas se utilizan principalmente para colgar a gran altura (industrias y grandes naves con techos altos) o en iluminación de pabellones deportivos, aunque también hay modelos para pequeñas alturas. En el primer caso se utilizan las luminarias intensivas y los proyectores y en el segundo las extensivas

J) Niveles de iluminación recomendados

Los niveles de iluminación recomendados para un local dependen de las actividades que se vayan a realizar en él. En general se distinguen entre tareas con requerimientos luminosos mínimos, normales o exigentes.

En el primer caso estarían las zonas de paso (pasillos, vestíbulos, etc.) o los locales poco utilizados (almacenes, cuartos de maquinaria...) con iluminancias entre 50 y 200 lux. En el segundo caso se encuentran las zonas de trabajo y otros locales de uso frecuente con iluminancias entre 200 y 1000 lux. Por último están los lugares donde son necesarios niveles de iluminación muy elevados (más de 1000 lux) porque se realizan tareas visuales con un grado elevado de detalle que se puede conseguir con iluminación local.

Tareas y clases de local	Iluminancia media en servicio (lux)		
	Mínimo	Recomendado	Óptimo
Zonas generales de edificios			
Zonas de circulación, pasillos	50	100	150
Escaleras, escaleras móviles, roperos, lavabos, almacenes y archivos	100	150	200
Centros docentes			
Aulas, laboratorios	300	400	500
Bibliotecas, salas de estudio	300	500	750

Oficinas			
Oficinas normales, mecanografiado, salas de proceso de datos, salas de conferencias	450	500	750
Grandes oficinas, salas de delineación, CAD/CAM/CAE	500	750	1000
Comercios			
Comercio tradicional	300	500	750
Grandes superficies, supermercados, salones de muestras	500	750	1000
Industria (en general)			
Trabajos con requerimientos visuales limitados	200	300	500
Trabajos con requerimientos visuales normales	500	750	1000
Trabajos con requerimientos visuales especiales	1000	1500	2000
Viviendas			
Dormitorios	100	150	200
Cuartos de aseo	100	150	200
Cuartos de estar	200	300	500
Cocinas	100	150	200
Cuartos de trabajo o estudio	300	500	750

Tabla 2.2.8. - Iluminancias recomendadas según la actividad y el tipo de local.

Fuente: www.prisma-ingeniería.com

Cuando se habla en fotometría de magnitudes y unidades de media se definen una serie de términos y leyes que describen el comportamiento de la luz y sirven como herramientas de cálculo. Pero no hemos de olvidar que las hipótesis utilizadas para definirlos son muy restrictivas (fuente puntual, distribución del flujo esférica y homogénea, etc.). Aunque esto no invalida los resultados y conclusiones obtenidas, nos obliga a buscar nuevas herramientas de trabajo, que describan mejor la realidad, como

son las tablas, gráficos o programas informáticos. De todos los inconvenientes planteados, el más grave se encuentra en la forma de la distribución del flujo luminoso que depende de las características de las lámparas y luminarias empleadas.

A menudo no se le da mucha importancia a este tema, como pasa en la iluminación de interiores, pero será fundamental si se busca optimizar la instalación o en temas como la iluminación de calles, decorativa, de industrias o de instalaciones deportivas.

A continuación veremos los gráficos más habituales en luminotecnia:

- Diagrama polar o curva de distribución luminosa.
- Diagramas isocandela.
- Alumbrado por proyección.
- Alumbrado público. Proyección azimutal de Lambert.

K) Curvas fotométricas

Curvas isolux.

Diagrama polar o curvas de distribución luminosa

En estos gráficos la intensidad luminosa se representa mediante un sistema de tres coordenadas (I, C, γ). La primera de ellas I representa el valor numérico de la intensidad luminosa en candelas e indica la longitud del vector mientras las otras señalan la dirección. El ángulo C nos dice en qué plano vertical estamos y γ mide la inclinación respecto al eje vertical de la luminaria. En este último, 0° señala la vertical hacia abajo, 90° la horizontal y 180° la vertical hacia arriba. Los valores de C utilizados

en las gráficas no se suelen indicar salvo para el alumbrado público. En este caso, los ángulos entre 0° y 180° quedan en el lado de la calzada y los comprendidos entre 180° y 360° en la acera; 90° y 270° son perpendiculares al bordillo y caen respectivamente en la calzada y en la acera.

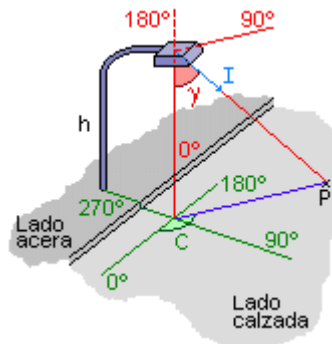


Figura 2.8

Fuente: www.elprisma.com

Con un sistema de tres coordenadas es fácil pensar que más que una representación plana tendríamos una tridimensional. De hecho, esto es así y si representamos en el espacio todos los vectores de la intensidad luminosa en sus respectivas direcciones y uniéramos después sus extremos, obtendríamos un cuerpo llamado sólido fotométrico. Pero como trabajar en tres dimensiones es muy incómodo, se corta el sólido con planos verticales para diferentes valores de C (suelen ser uno, dos, tres o más dependiendo de las simetrías de la figura) y se reduce a la representación plana de las curvas más características.

En la curva de distribución luminosa, los radios representan el ángulo γ y las circunferencias concéntricas el valor de la intensidad en candelas. De todos los planos verticales posibles identificados por el ángulo C , solo se suelen representar los planos verticales correspondientes a los planos de simetría y los transversales a estos ($C = 0^\circ$ y

$C = 90^\circ$) y aquel en que la lámpara tiene su máximo de intensidad. Para evitar tener que hacer un gráfico para cada lámpara cuando solo varía la potencia de esta, los gráficos se normalizan para una lámpara de referencia de 1000 lm. Para conocer los valores reales de las intensidades bastará con multiplicar el flujo luminoso real de la lámpara por la lectura en el gráfico y dividirlo por 1000 lm.

$$I_{\text{real}} = \Phi_{\text{lámpara}} \cdot \frac{I_{\text{gráfico}}}{1000}$$

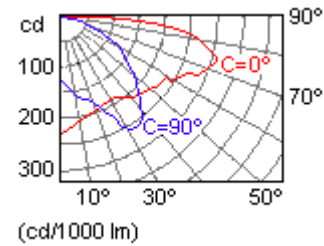


Figura 2.9. Fuente: Manual de alumbrado

Matriz de intensidades luminosas

También es posible encontrar estos datos en unas tablas llamadas matriz de intensidades luminosas donde para cada pareja de valores de C y γ obtenemos un valor de I normalizado para una lámpara de flujo de 1000 lm.

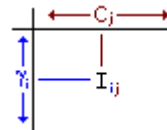


Figura 2.10. Fuente: Manual de alumbrado

Diagramas isocandela

A pesar de que las curvas de distribución luminosa son herramientas muy útiles y prácticas, presentan el gran inconveniente de que sólo nos dan información de lo que ocurre en unos pocos planos meridionales (para algunos valores de C) y no sabemos a ciencia cierta qué pasa en el resto. Para evitar estos inconvenientes y conjugar una representación plana con información sobre la intensidad en cualquier dirección se definen las curvas isocandela.

En los diagramas isocandelas se representan en un plano, mediante curvas de nivel, los puntos de igual valor de la intensidad luminosa. Cada punto indica una dirección del espacio definida por dos coordenadas angulares. Según cómo se escojan estos ángulos, distinguiremos dos casos:

- Proyectores para alumbrado por proyección.
- Luminarias para alumbrado público. Proyección azimutal de Lambert.

En los proyectores se utiliza un sistema de coordenadas rectangulares con ángulos en lugar de las típicas x e y . Para situar una dirección se utiliza un sistema de meridianos y paralelos similar al que se usa con la Tierra. El paralelo 0° se hace coincidir con el plano horizontal que contiene la dirección del haz de luz y el meridiano 0° con el plano perpendicular a este. Cualquier dirección, queda pues, definida por sus dos coordenadas angulares. Conocidas estas, se sitúan los puntos sobre el gráfico y se unen aquellos con igual valor de intensidad luminosa formando las líneas isocandelas.

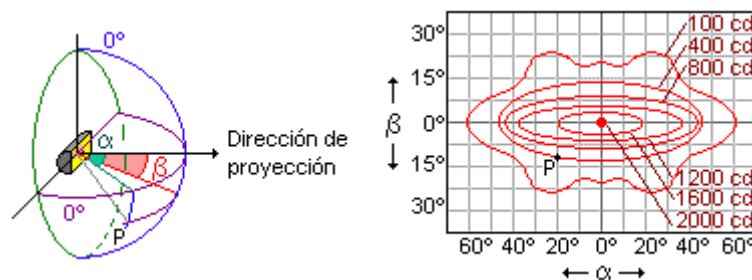


Figura 2.11. Fuente: www.troll.es

En las luminarias para alumbrado público, para definir una dirección, se utilizan los ángulos C y γ usados en los diagramas polares. Se supone la luminaria situada dentro de una esfera y sobre ella se dibujan las líneas isocandelas. Los puntos de las curvas se obtienen por intersección de los vectores de intensidad luminosa con la superficie de esta. Para la representación plana de la superficie se recurre a la proyección azimutal de Lambert.

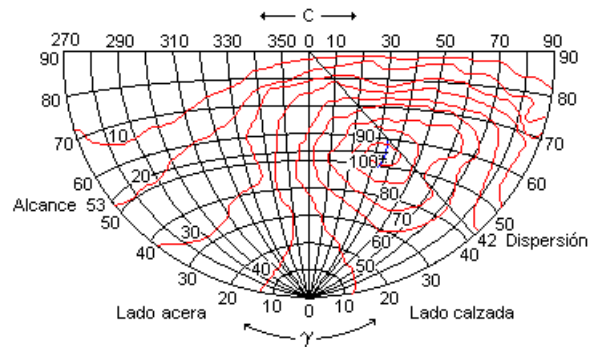


Figura 2.12.

Fuente: Manual de alumbrado

En estos gráficos, los meridianos representan el ángulo C , los paralelos γ y las intensidades, líneas rojas, se reflejan en tanto por ciento de la intensidad máxima. Como en este tipo de proyecciones las superficies son proporcionales a las originales, el flujo luminoso se calcula como el producto del área en el diagrama (en estereorradianes) por la intensidad luminosa en esta área.

Además de intensidades y flujos, este diagrama informa sobre el alcance y la dispersión de la luminaria. El alcance da una idea de la distancia longitudinal máxima que alcanza el haz de luz en la calzada mientras que la dispersión se refiere a la distancia transversal.

Curvas isolux

Las curvas vistas en los apartados anteriores (diagramas polares e isocandelas) se obtienen a partir de características de la fuente luminosa, flujo o intensidad luminosa, y dan información sobre la forma y magnitud de la emisión luminosa de esta. En contraste, las curvas isolux hacen referencia a las iluminancias, flujo luminoso recibido por una superficie, datos que se obtienen experimentalmente o por cálculo a partir de la matriz de intensidades usando la fórmula:

$$E_H = \frac{I(C, \gamma)}{H^2} \cdot \cos^3 \gamma$$

Estos gráficos son muy útiles porque dan información sobre la cantidad de luz recibida en cada punto de la superficie de trabajo y son utilizadas especialmente en el alumbrado público.

Lo más habitual es expresar las curvas isolux en valores absolutos definidas para una lámpara de 1000 lm y una altura de montaje de 1 m.

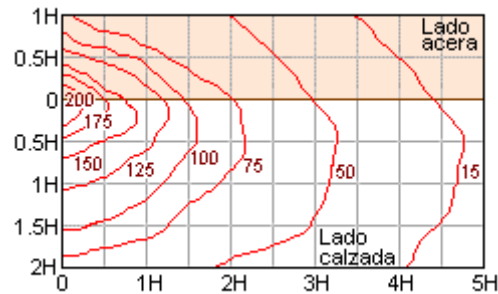


Figura 2.13. Fuente: www.elprisma.com

Los valores reales se obtienen a partir de las curvas usando la expresión:

$$E_{H_{\text{real}}} = E_{\text{curva}} \cdot \frac{\Phi_{L_{\text{real}}}}{1000} \cdot \frac{1^2}{H^2}$$

También puede expresarse en valores relativos a la iluminancia máxima (100%) para cada altura de montaje. Los valores reales de la iluminancia se calculan entonces como:

$$E_{\text{real}} = E_{\text{curva}} \cdot E_{\text{máx}}$$

con

$$E_{\text{máx}} = a \cdot \frac{\Phi_{L_{\text{real}}}}{H^2}$$

siendo a un parámetro suministrado con las gráficas.

L) Método del punto por punto

Si queremos conocer cómo es la distribución de la iluminación en instalaciones de alumbrado general localizado o individual donde la luz no se distribuye uniformemente o cómo es exactamente la distribución en el alumbrado general,

entonces en estos casos se emplea el método del punto por punto que nos permite conocer los valores de la iluminancia en puntos concretos.

Consideraremos que la iluminancia en un punto es la suma de la luz proveniente de dos fuentes: una componente directa, producida por la luz que llega al plano de trabajo directamente de las luminarias, y otra indirecta o reflejada procedente de la reflexión de la luz de las luminarias en el techo, paredes y demás superficies del local.

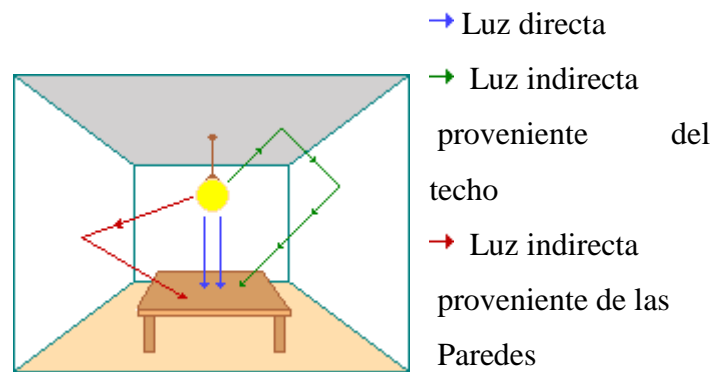


Figura 2.14. Fuente: www.elprisma.com

En el ejemplo anterior podemos ver que sólo unos pocos rayos de luz serán perpendiculares al plano de trabajo mientras que el resto serán oblicuos. Esto quiere decir que de la luz incidente sobre un punto, sólo una parte servirá para iluminar el plano de trabajo y el resto iluminará el plano vertical a la dirección incidente en dicho punto.

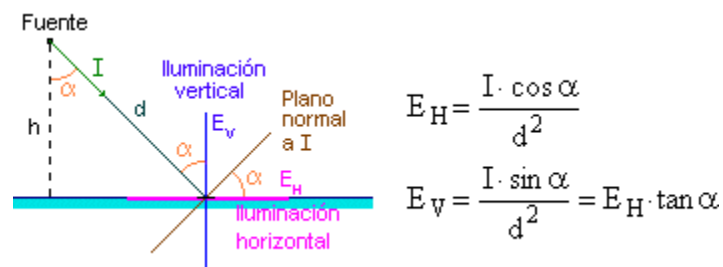


Figura 2.15. Fuente: www.elprisma.com

Componentes de la iluminancia en un punto

En general, para hacernos una idea de la distribución de la iluminancia nos bastará con conocer los valores de la iluminancia sobre el plano de trabajo; es decir, la iluminancia horizontal. Sólo nos interesará conocer la iluminancia vertical en casos en que se necesite tener un buen modelado de la forma de los objetos (deportes de competición, escaparates, estudios de televisión y cine, retransmisiones deportivas...) o iluminar objetos en posición vertical (obras de arte, cuadros, esculturas, pizarras, fachadas...)

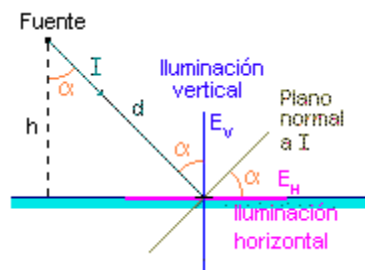
Para utilizar el método del punto por punto necesitamos conocer previamente las características fotométricas de las lámparas y luminarias empleadas, la disposición de las mismas sobre la planta del local y la altura de estas sobre el plano de trabajo. Una vez conocidos todos estos elementos podemos empezar a calcular las iluminancias. Mientras más puntos calculemos más información tendremos sobre la distribución de la luz. Esto es particularmente importante si trazamos los diagramas isolux de la instalación.

Como ya hemos mencionado, la iluminancia horizontal en un punto se calcula como la suma de la componente de la iluminación directa más la de la iluminación indirecta. Por lo tanto:

$$E = E_{\text{directa}} + E_{\text{indirecta}}$$

Componente directa en un punto

Fuentes de luz puntuales. Podemos considerar fuentes de luz puntuales las lámparas incandescentes y de descarga que no sean los tubos fluorescentes. En este caso las componentes de la iluminancia se calculan usando las fórmulas.



$$E_H = \frac{I \cdot \cos^3 \alpha}{h^2}$$

$$E_v = \frac{I \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{h^2}$$

Figura 2.16. Fuente: www.elprisma.com

Donde I es la intensidad luminosa de la lámpara en la dirección del punto que puede obtenerse de los diagramas polares de la luminaria o de la matriz de intensidades y h la altura del plano de trabajo a la lámpara.

En general, si un punto está iluminado por más de una lámpara su iluminancia total es la suma de las iluminancias recibidas:

$$E_H = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot \cos^3 \alpha_i}{h_i^2}$$

$$E_V = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot \sin \alpha_i}{h_i^2}$$

Fuentes de luz lineales de longitud infinita.

Se considera que una fuente de luz lineal es infinita si su longitud es mucho mayor que la altura de montaje; por ejemplo una línea continua de fluorescentes. En este caso se puede demostrar por cálculo diferencial que la iluminancia en un punto para una fuente de luz difusa se puede expresar como:

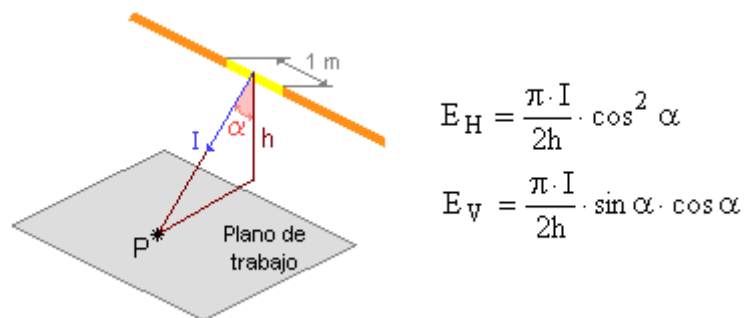


Figura 2.17. Fuente: www.elprisma.com

En los extremos de la hilera de las luminarias el valor de la iluminancia será la mitad.

El valor de I se puede obtener del diagrama de intensidad luminosa de la luminaria referido a un metro de longitud de la fuente de luz. En el caso de un tubo fluorescente desnudo I puede calcularse a partir del flujo luminoso por metro, según la fórmula:

$$I = \frac{\Phi}{9.25}$$

Cálculo de las iluminancias horizontales empleando curvas isolux.

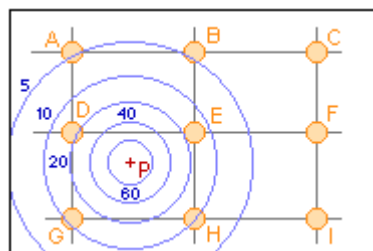
Este método gráfico permite obtener las iluminancias horizontales en cualquier punto del plano de trabajo de forma rápida y directa. Para ello necesitaremos:

* Las curvas isolux de la luminaria suministradas por el fabricante (fotocopiadas sobre papel vegetal o transparencias). Si no disponemos de ellas, podemos trazarlas a partir de la matriz de intensidades o de las curvas polares, aunque esta solución es poco recomendable si el número de puntos que nos interesa calcular es pequeño o no disponemos de un programa informático que lo haga por nosotros.

* La planta del local con la disposición de las luminarias dibujada con la misma escala que la curva isolux.

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

Sobre el plano de la planta situamos el punto o los puntos en los que queremos calcular la iluminancia. A continuación colocamos el diagrama isolux sobre el plano, haciendo que el centro coincida con el punto, y se suman los valores relativos de las iluminancias debidos a cada una de las luminarias que hemos obtenido a partir de la intersección de las curvas isolux con las luminarias.



Luminaria	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total
Iluminancia (lux)	4	4	0	19	19	0	12	10	0	$E_T = 68 \text{ lx}$

Figura 2.18. Fuente: www.elprisma.com

Finalmente, los valores reales de las iluminancias en cada punto se calculan a partir de los relativos obtenidos de las curvas aplicando la fórmula:

$$E_r = E_c \cdot \frac{\Phi_r}{\Phi_c} \cdot \left(\frac{h_c}{h_r} \right)^2 = E_c \cdot \frac{\Phi_r}{h_r^2} \cdot \frac{1}{1000}$$

Componente indirecta o reflejada en un punto

Para calcular la componente indirecta se supone que la distribución luminosa de la luz reflejada es uniforme en todas las superficies del local incluido el plano de trabajo. De esta manera, la componente indirecta de la iluminación de una fuente de luz para un punto cualquiera de las superficies que forman el local se calcula como:

$$E_{\text{indirecta}} = E_{\text{ind}_H} = E_{\text{ind}_V} = \frac{\Phi}{F_T} \cdot \frac{\rho_m}{1 - \rho_m}$$

donde:

$$F_T = \sum_n F_i$$

es la suma del área de todas las superficies del local.

ρ_m es la reflectancia media de las superficies del local calculada como

$$\rho_m = \frac{\sum_n \rho_i \cdot F_i}{\sum_n F_i}$$

siendo ρ_i la reflectancia de la superficie F_i y Φ es el flujo de la lámpara

II.3.- INTERRUPTORES TERMOMAGNÉTICOS

Los interruptores automáticos termomagnéticos son dispositivos diseñados para la protección de conductores y aparatos que deban ser preservados contra sobrecargas eléctricas y cortocircuitos.

Principio de funcionamiento

Se muestra a continuación, los distintos elementos que componen internamente un interruptor termomagnético, y como es su funcionamiento.

- La protección contra sobrecargas se efectúa a través de la lamina bimetálica (A).
- La protección contra cortocircuitos la proporciona el dispositivo magnético (B).
- El disparo térmico se efectúa a través del bimetal, que es ajustado por medio del tornillo (C) de forma que el bimetal, al paso de la corriente, se calienta produciéndose un pandeo, que al llegar a determinados valores actúa sobre el mecanismo de contacto móvil (D), dando lugar a la desconexión del interruptor.
- La desconexión magnética se regula a través del muelle interno de la bobina (B) y tiene lugar por medio del inducido (E), de forma tal que cuando la fuerza de atracción de la bobina (B) es suficientemente grande, el inducido (E) se desplaza venciendo la resistencia del muelle y actúa sobre el mecanismo de contacto móvil produciendo la desconexión del interruptor.
- La apertura del interruptor (F) y la extinción del arco eléctrico (G) se realizan en cortocircuito con un tiempo inferior a 10 milisegundos. Esta alta velocidad de respuesta garantiza la seguridad en las instalaciones a proteger.

CORTE INTERNO DE UN INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO

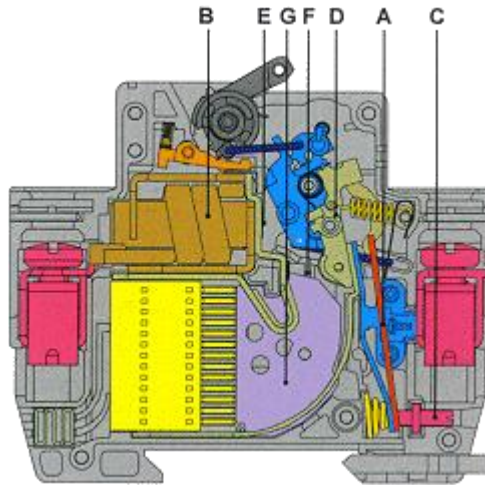


Figura 2.19. Fuente: www.termomagnetico.com

Elección del interruptor en función de la línea

El interruptor automático debe impedir que la intensidad que circula por la línea supere los valores máximos admisibles por los conductores.

Estos valores máximos dependen de:

- La naturaleza de los conductores.
- La sección de los conductores.
- El tipo de aislamiento (goma, PRC, PVC, etc.).
- Las condiciones de colocación (al aire, empotrados, enterrados, etc.)
- El número de conductores con carga en una canalización.
- La temperatura.

Para determinar la corriente máxima admisible de un conductor eléctrico, habría que calcularlo de acuerdo las fórmulas existentes y a los datos suministrados por el fabricante del mismo.

Influencia de la temperatura ambiente

La misma, afecta las características de desconexión de los interruptores termomagnéticos.

La actuación térmica esta calibrada para una temperatura ambiente de $30 + 5$ °C. (según IEC 898). En caso de temperaturas diferentes, la capacidad de carga varía según el gráfico y atenderá a los siguientes criterios:

- Se reduce si la temperatura es mayor
- Se incrementa si la temperatura es menor.
- Este valor habrá de tenerse en cuenta a la hora de elegir la intensidad nominal de un interruptor para condiciones de operación a temperaturas diferentes a $30 + 5$ °C.

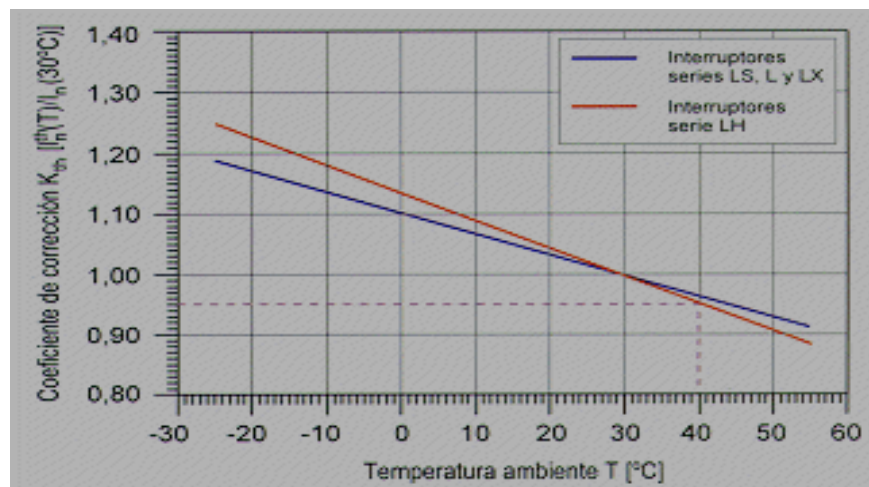


Figura 2.20. Fuente: Manual de baja tensión

Influencia de la frecuencia

Los valores de disparo magnético de los interruptores termomagnéticos son validos para corriente alterna de 50/60 Hz.

Una variación en la frecuencia de la corriente lleva consigo una modificación en los valores de disparo magnético.

Las características de disparo térmico permanecen inalterables ante variaciones de la frecuencia.

Influencia del tipo de montaje

Al instalar varios interruptores automáticos en operación simultánea, adosados y dentro de un gabinete o caja de distribución, se produce un incremento de la temperatura que obliga a una disminución en la intensidad de empleo. En función de la cantidad de aparatos colocada, se habrá de corregir el valor de la intensidad multiplicándolo por un coeficiente KN tal y como se indica en el gráfico adjunto.

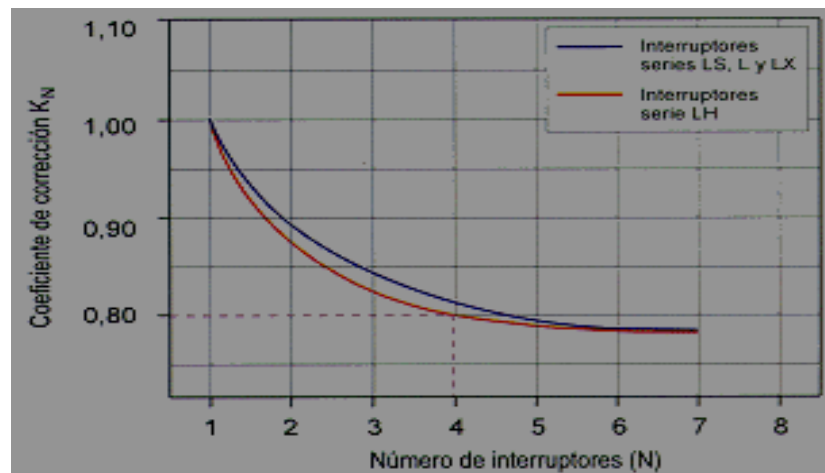


Figura 2.21. Fuente: Manual de baja tensión

Selectividad

Se utiliza esta técnica para mejorar la fiabilidad de un sistema de distribución haciendo intervenir únicamente la protección situada inmediatamente aguas arriba de la falla, sin perturbar así las otras líneas.

Selectividad Total

Existe selectividad total entre dos dispositivos de protección cuando, para toda corriente de falla inferior o igual al poder de corte del dispositivo aguas abajo, interviene solamente éste en la apertura del cortocircuito.

En el caso concreto de dos interruptores automáticos, se consigue selectividad total cuando la energía de paso limitada por el interruptor aguas abajo es siempre inferior a la energía de no desconexión del interruptor aguas arriba.



Figura 2.22. Fuente: www.termomagnetico.com

Selectividad Parcial

La selectividad entre dos dispositivos de protección es parcial cuando, a partir de un cierto valor de la corriente de falla, los dos dispositivos intervienen simultáneamente.

En el caso de dos interruptores automáticos, la selectividad parcial se produce cuando la energía de paso limitada por el interruptor aguas abajo es inferior, solo hasta un cierto valor (corriente límite de selectividad), a la energía de no intervención del interruptor aguas arriba.

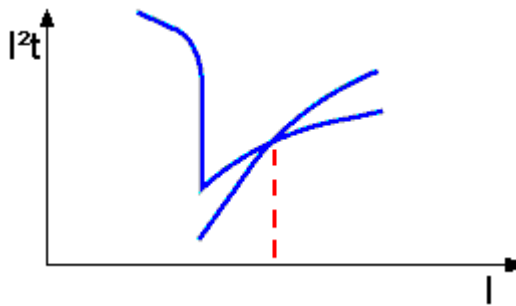


Figura 2.23. : Fuente: www.termomagnetico.com

Otras técnicas para el estudio de selectividades

Teniendo en cuenta que, para una misma tensión, los dos factores que intervienen en la apertura de una corriente de falla son el propio valor de esa corriente y el tiempo de corte, se puede estudiar la selectividad desde ambos puntos de vista.

- Discriminación en Corriente:

Comparando el pico de corriente de limitación del interruptor aguas abajo con el ajuste magnético del interruptor aguas arriba.

- Discriminación en Tiempo:

Comparando el tiempo total de apertura del interruptor aguas abajo con el tiempo de detección del interruptor aguas arriba.

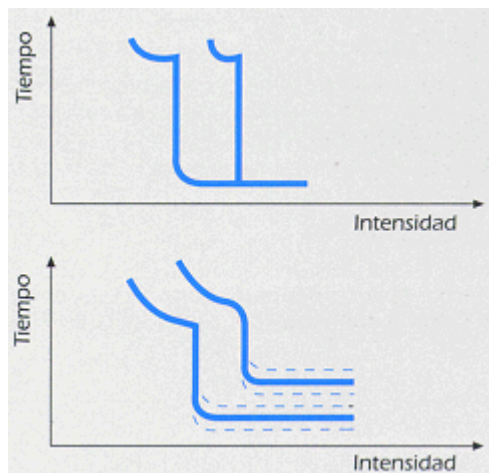


Figura 2.24. Fuente: www.termomagnetico.com

Coordinación en serie (filiación)

La coordinación en serie, también denominada protección en cascada o filiación, es una técnica que permite utilizar, aguas abajo, un dispositivo de protección con un poder de corte inferior a la corriente prevista de cortocircuito en el punto donde se ha instalado, con tal de que aguas arriba se disponga de otro dispositivo que, con el poder de corte requerido, deje pasar una energía soportable por el dispositivo situado aguas abajo.

Mediante esta técnica se logra una instalación mucho más económica, ya que el dimensionamiento de los interruptores aguas abajo puede ser inferior a los requerimientos iniciales.

Protección contra sobrecargas

Las sobrecargas no son perjudiciales, siempre que su duración no permita que

se alcancen temperaturas inadmisibles. Para una correcta utilización de los circuitos, no deben producirse desconexiones indebidas. Esto implica que el dispositivo de protección contra sobrecargas sea de tiempo-dependiente o característica térmica. Normalmente, el dispositivo mide el calentamiento indirectamente mediante el control de la intensidad que recorre el circuito.

Para la aplicación correcta de este sistema, se requiere conocer la imagen térmica (curva tiempo-corriente admisible) del aparato que hay que proteger, lo que sucede pocas veces.

Cuando no se conoce la curva de imagen térmica, la aplicación de relés térmicos que cumplan las normas UNE y CEI establecidas suele ser suficiente.

Protección de cortocircuitos

Las corrientes de cortocircuito, a consecuencia del elevado valor que suelen alcanzar, ocasionan un rápido calentamiento de los conductores por los que circulan. La interrupción de estas corrientes debe realizarse en el menor tiempo posible.

Los daños que pueden producir estas corrientes, son, sucesivamente:

- Envejecimiento.
- Carbonización o inflamación de los aislamientos.
- Fusión de los conductores.
- Disminución de las características mecánicas de las partes conductoras o metálicas adyacentes (resortes, etc.).

El primero de los efectos señalados que se presenta es el envejecimiento de los aislamientos. Para evitarlo, la temperatura momentánea no debe superar determinados valores especificados por los fabricantes.

Las temperaturas máximas admisibles (para una duración no superior a 5 s) son:

- Cables con aislamiento de PVC 160° C
- Cables con aislamiento de caucho natural 200° C
- Cables con aislamiento de butil 220° C

- Cables con aislamiento de PRC o EPR 250° C

Los cortocircuitos son siempre perjudiciales y deben interrumpirse cuanto antes, por este motivo, los dispositivos de protección contra ellos deben ser instantáneos (también llamados de tiempo-independiente) y han de actuar sobre equipos capaces de abrir el circuito en presencia de estas corrientes elevadas. El medio más utilizado para la protección de cortocircuitos es el interruptor de potencia.

La capacidad nominal de ruptura o de desconexión es un múltiplo de la corriente nominal del interruptor. Se define como el valor efectivo de aquella corriente que, a un factor de potencia determinado y con 1,1 veces la tensión nominal, puede ser conectada y desconectada; como valores del factor de potencia del circuito de corriente de ensayo se eligen 0,7 para pequeñas intensidades de corriente, y 0,4 para grandes intensidades. Por razones de seguridad, el factor de potencia se elige menor de lo que corresponde en general al desfase entre corriente de cortocircuito y tensión de servicio en instalaciones de baja tensión. La extinción del arco es tanto más difícil cuanto menor es el factor de potencia y tanto mayor resulte, por consiguiente, la componente inductiva de la corriente de cortocircuito, a consecuencia de la reactancia de transformadores, bobinas y líneas aéreas frente a la resistencia óhmica de cables, barras colectoras y conductores de la instalación.

Curvas de disparo

Una sobrecarga, caracterizada por un incremento paulatino de la I_n , puede deberse a una anomalía permanente que se empieza a manifestar (falla de aislamiento), o transitoria (por ejemplo, corriente de arranque de motores).

Tanto cables como receptores están dimensionados para admitir una carga superior a la normal durante un tiempo determinado sin poner en riesgo sus características.

Cuando la sobrecarga se manifiesta de manera violenta (varias veces la I_n) de manera instantánea estamos frente a un cortocircuito, el cual deberá aislarse

rápidamente para salvaguardar los bienes. Dos protecciones independientes están asociadas en un aparato de protección para garantizar la seguridad de los equipos:

- Protección contra sobrecargas: Su característica de disparo es a tiempo dependiente o inverso, es decir que a mayor valor de corriente es menor el tiempo de actuación.

- Protección contra cortocircuitos: Su característica de disparo es a tiempo independiente, es decir que a partir de cierto valor de corriente de falla la protección actúa, siempre en el mismo tiempo.

Las normas IEC 947.2 y 898 fijan las características de disparo de las protecciones de los interruptores automáticos, de manera de establecer condiciones de funcionamiento estándar.

Margen

(1) zona de disparo por sobrecarga

(2) zona de disparo por cortocircuito

(4) zona de incertidumbre, disparo por actuación de los relés de sobrecarga o cortocircuito

Entre las diferentes clasificaciones de curvas de disparo se encuentran:

- **Curva B:** Circuitos resistidos (para influencia de transitorios de arranque) o con gran longitud de cables hasta el receptor.
- **Curva C:** Cargas mixtas y motores normales en categoría AC3 (protección típica en el ámbito residencial)
- **Curva D:** Circuitos con transitorios fuertes, motores de arranque prolongado, o gran cadencia de maniobras.

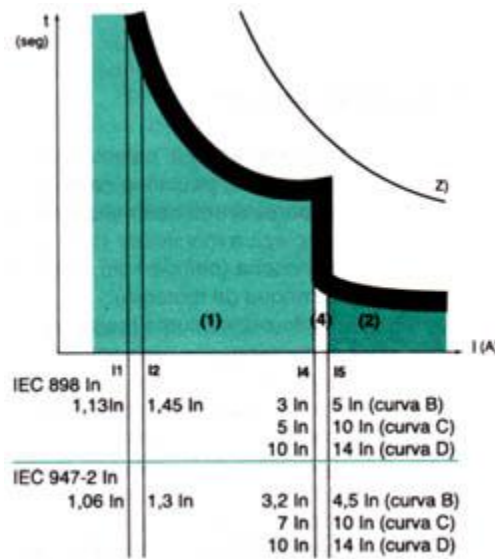


Figura 2.25. www.termomagnetico.com

II.4.- MEDIDA DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS APLICADOS A PUESTAS A TIERRA PUNTUALES

Conceptos:

- Puesta a tierra (PAT) o aterramiento:

Instalación de seguridad eléctrica en la que un conductor eléctrico desnudo simple o armado es enterrado en el suelo con la finalidad de dispersar corrientes eléctricas y captar el potencial de referencia cero.

- Conexión a la puesta a tierra:

Unión sólida con una puesta a tierra, mediante un conductor eléctrico; desde una barra equipotencial, desde el terminal de conexión a tierra o desde un punto accesible de la masa de un aparato eléctrico.

- Barra equipotencial:

Barra colectora conductora, sólidamente conectada a la puesta a tierra, que provee la condición de equipotencialidad a todos los conductores de puesta a tierra que convergen y al conductor neutro, que se le conectan para ser puestos a tierra.

- Terminal de conexión a tierra:

Es un punto propio de la masa o carcasa de un aparato que está designado para ser conectado sólidamente, ya sea a la barra equipotencial o al circuito colector, que a su vez está conectado a la puesta a tierra.

- Masa o carcasa:

Es la caja metálica exterior o el chasis que contiene o soporta a un aparato eléctrico, que presenta un punto, denominado terminal o borne de tierra, desde el cual se realiza la conexión a tierra según corresponda.

- Electrodo de puesta a tierra:

Es un conductor metálico que proporciona el contacto eléctrico íntimo con el suelo. Se instala embutido, ya sea directamente en el suelo natural o en el relleno de una excavación. Puede tener diferentes formas.

- Electrodos de medidas:

Son varillas rígidas de metal en forma de estacas de pequeñas dimensiones, que se clavan en el suelo en los puntos terminales de los circuitos de medida, de corriente y de potencial, asegurando la mínima resistencia eléctrica de contacto durante las medidas.

- Circuitos de medida:

Son las trayectorias de medida eléctrica, que se establecen tendiendo conductores entre los terminales del instrumento de medidas (Telurómetro, Geómetro) y el suelo, a diferentes distancias preestablecidas.

Puesta a tierra puntuales

Electrodos diseñados según el desempeño eléctrico requerido, para ser instalado enterrado en suelo firme, al cual se conectan según el reglamento de instalaciones eléctricas en cada caso:

a.- Si la puesta a tierra es de servicio particular

- La barra equipotencial del tablero de distribución.

- La bajada del pararrayos de protección contra descargas atmosféricas.
- Los armados de acero de las estructuras de concreto del edificio.
- Las tuberías y ductos metálicos (agua y otros) excepto tuberías de combustibles.

b.- Si la puesta a tierra es de servicio público

- El punto neutro de los transformadores y sistemas eléctricos.
- Las bajadas de tierra de los pararrayos y descargadores.
- Las estructuras, carcasas y masas de todas las máquinas y equipos eléctricos.
- Los soportes metálicos de los aislamientos de líneas y sistemas eléctricos.
- Las masas de los instrumentos y aparatos manuales.

Influencia del suelo (tierra)

Cualquiera que sea el régimen del neutro de los sistemas eléctricos, siempre estarán referidos indirecta o directamente a tierra; es decir, que el suelo siempre forma parte de su desempeño.

a) Sistemas con neutro aislado

Las tensiones (V_n) de los alimentadores están directamente referidas al potencial de tierra, a través de sus capacitancias parásitas (X_c), de modo que cuando se produce una falla fase-tierra, a falta de puesta a tierra en el lado de la fuente, la corriente (I_f) retorna por el suelo al circuito, pasando a través de dichas capacitancias y aunque es de baja magnitud siempre será muy peligrosa.

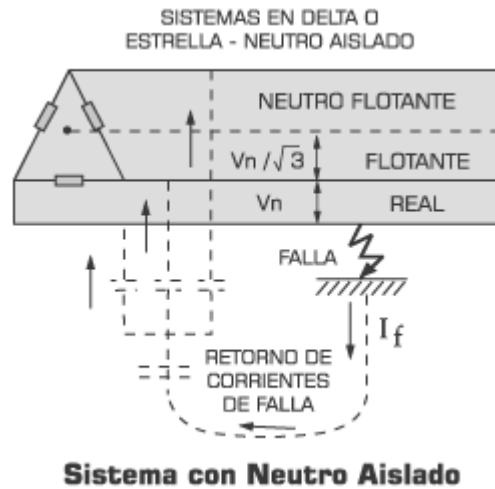


Figura 2.26. Fuente: www.monografias.com

b) Sistemas con neutro puesto a tierra

Las tensiones (V_n) de los alimentadores están directamente referidas al potencial de tierra mediante la conexión sólida del punto neutro (N) con la puesta a tierra. De ese modo cuando se produce una falla fase-tierra, la mayor parte de la corriente (I_f) retorna por el suelo directamente a la fuente, atravesando la puesta a tierra hasta el punto neutro, siendo muy peligrosa.

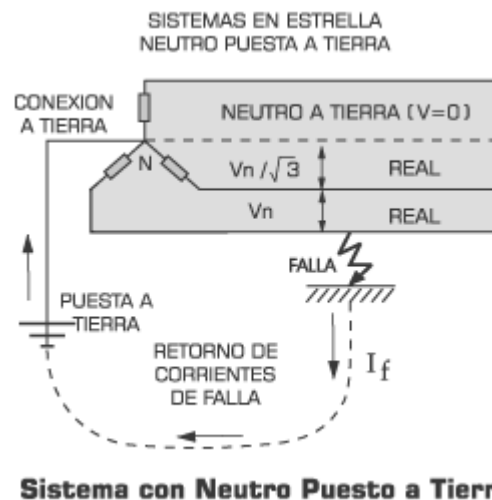


Figura 2.27. Fuente: www.monografias.com

Las puestas a tierra de servicio particular, es decir aquellas que se instalan en el lado de la utilización (doméstica, comercial, industrial), contribuyen a formar el circuito que canaliza las corrientes de falla evitando el peligro para las personas; consecuentemente el Código Eléctrico Nacional - (CEN) y todos los reglamentos similares en el mundo, disponen la obligatoriedad de contar con puesta a tierra en todo tipo de instalación eléctrica que funcione con más de 50 Voltios.

Finalidad de las puestas a tierra

Las puestas a tierra (Rs) en general constituyen una parte fundamental en las instalaciones eléctricas de todo tipo y permiten cumplir con las exigencias técnicas de seguridad humana y de las propias instalaciones así como con la confiabilidad de la operación, mediante el desempeño de las siguientes prestaciones:

- Unión sólida entre un sistema eléctrico y la tierra

Proporcionando el potencial de referencia ($V = 0$) en la barra equipotencial, o según el caso en el punto neutro y en las masas que se le conectan, de modo que durante el funcionamiento normal o durante fallas asegura:

a) La protección de las personas contra la energización accidental de las masas por acumulación de carga estática o por falla (I_f) directa o indirecta.

b) El correcto funcionamiento del propio sistema y sus periféricos de protección, comunicaciones, control, automatismos, flujo y procesamiento de datos, así como de todas las cargas conectadas a él.

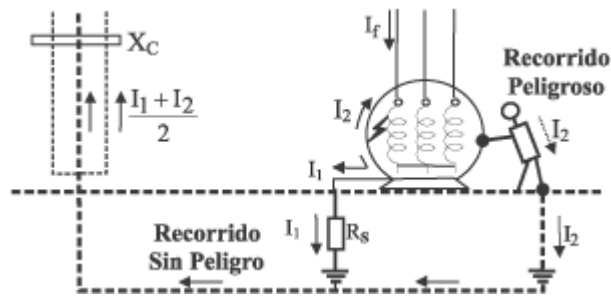


Figura 2.28. - Protección en caso de energización de las masas.

Fuente: www.riesgo.com

- Control de potenciales anormales en el suelo (Gradientes Peligrosos)

Cuando se prevé por diseño, limita los potenciales en el suelo y entre el suelo y partes metálicas de las instalaciones eléctricas y a proximidad de éstas, brindando durante las fallas:

a) Protección a las personas:

Asegurando que las tensiones de toque (V_t) y paso (V_p) de la instalación sean menores o iguales que las similares admisibles por el cuerpo humano.

b) Protección a equipos de baja tensión:

Especialmente los equipos e instrumentos electrónicos, evitando elevadas diferencias de potencial y descargas inversas desde la masa a los circuitos internos.

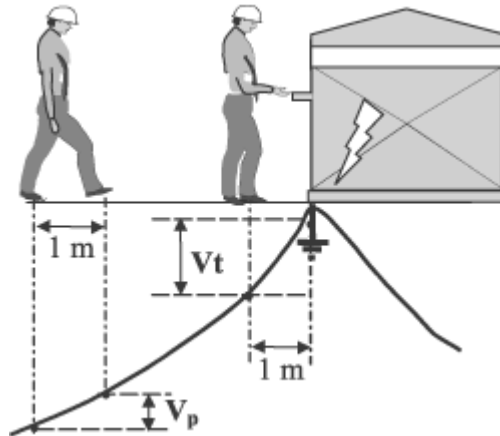


Figura 2.29. - Potenciales peligrosos de toque y de paso en Subestación de media y baja tensión. Fuente: www.riesgo.com

- Evacuar, conducir, derivar a tierra y cerrar el circuito

De corrientes eléctricas ocasionales o permanentes del sistema eléctrico, a través del suelo, asegurando la circulación de éstas con mínima resistencia eléctrica y su dispersión.

a) Elevadas corrientes senoidales (corto circuito) e impulsionales (rayo, maniobra).

b) Corrientes de régimen permanente: por desbalance de carga, procesos continuos.

c) Corrientes inducidas: por formación de anillos, por carga estática, etc.

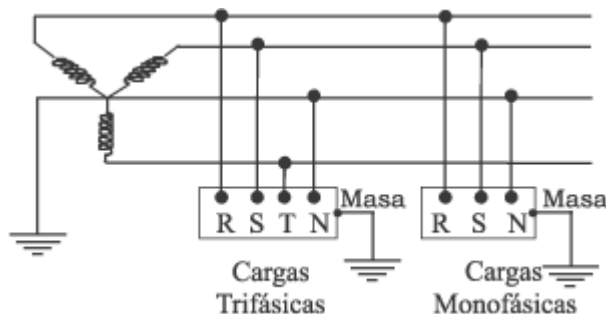


Figura 2.30. - Conexión de cargas en sistemas estrella con neutro a tierra.

Fuente: www.riesgo.com

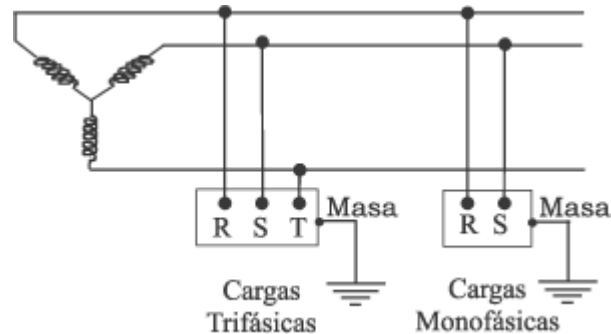


Figura 2.31. - Conexión de cargas en sistema delta o estrella sin neutro a tierra.

Fuente: www.riesgo.com

Funcionamiento de las PAT's de corriente alterna

De acuerdo a su aplicación y características físicas y de instalación, las puestas a tierra (PATs) de corriente alterna normalmente se diseñan para funcionamiento permanente con corrientes de pequeña o limitada magnitud y solamente para funcionamiento breve con elevadas corrientes como las de falla o rayo; en este último caso, su comportamiento en transitorio depende de su geometría.

- a) Cuando son puestas a tierra de seguridad generalmente en alta tensión.
 - Controlan los gradientes peligrosos (Tensiones de toque y paso).
 - Detectan bajas resistencias de dispersión.
 - Los interruptores (o reconectores) definen el tiempo de conducción.
- b) Cuando son puestas a tierra de referencia de potencial, generalmente en baja tensión.
 - No tienen como objetivo el control de los gradientes peligrosos.
 - Pueden tener moderadas o bajas resistencias de dispersión.
 - Los fusibles, interruptores termomagnéticos o diferenciales definen el tiempo de conducción.

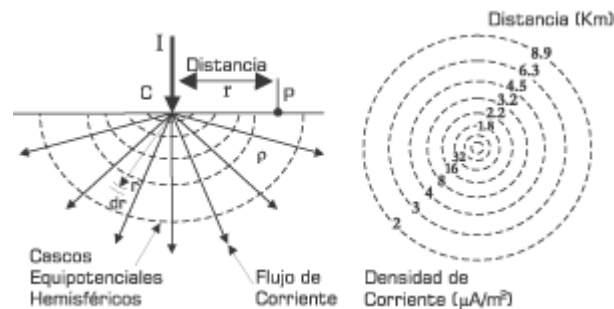


Figura 2.32. - Dispersión de corrientes a frecuencia industrial en el suelo - hemisferios concéntricos. Fuente: www.monografias.com

Modelo de conductor básico-suelo

Se trata de determinar las condiciones eléctricas bajo las cuales ocurre la conducción de corriente electrónica (convencional) en el suelo, para lo cual se establece un modelo matemático a partir de:

- Un segmento volumétrico de suelo de sección (ΔS), longitud (Δr) y resistividad (ρ).
- Una diferencia de potencial (ΔV) en sus extremos, que hace circular una corriente (ΔI).

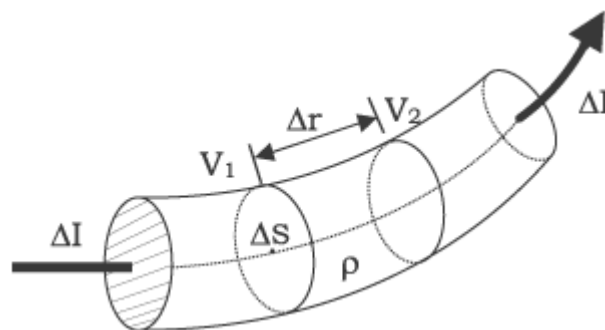


Figura 2.33. - Modelo analítico de suelo conductor de resistividad (Δr) homogénea. Fuente: Puesta a tierra en edificaciones... (ver bibliografía)

La resistencia (R) de un segmento de suelo (Δr) que se toma como conductor, al ser recorrido por una corriente (ΔI) está dada por la siguiente relación en función de su resistividad (ρ).

$$R = \rho \frac{\Delta r}{\Delta s}$$

De otro lado, según la Ley de Ohm la resistencia (R) para el mismo segmento, también estará dada por:

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

Igualando ambas expresiones de (R) e intercambiando términos se tiene:

$$\frac{dV}{dr} = \rho \frac{dI}{ds}$$

Se obtiene por identificación, que la intensidad del Campo Eléctrico (E) en la dirección (r) del suelo se cumple de idéntica forma que en el aire o en el vacío; es decir es conservativo y por lo tanto inversamente proporcional a la superficie de dispersión (ds) de la corriente (dI).

$$-E = \rho J = \frac{\rho I}{2\pi r^2}$$

Consecuentemente, el análisis eléctrico aplicado al comportamiento de los aterramientos seguirá en principio las mismas pautas que para un campo conservativo.

Parámetros derivados de la corriente en el suelo

La dispersión de la corriente en el suelo permite determinar el potencial de electrodo y su resistencia de dispersión absolutos; a partir de las siguientes hipótesis:

- Un suelo considerado homogéneo con una resistividad (ρ).
- Un electrodo que en el punto (C), inyecta una corriente (I) en al suelo.
- La corriente (I) se dispersa formando hemisferios de área, ($S = 2\pi r^2$).

Según lo cual, la densidad (d) de corriente dispersada (I) a una distancia (r) cualquiera desde el punto (C) donde se halla la puesta a tierra puntual será:

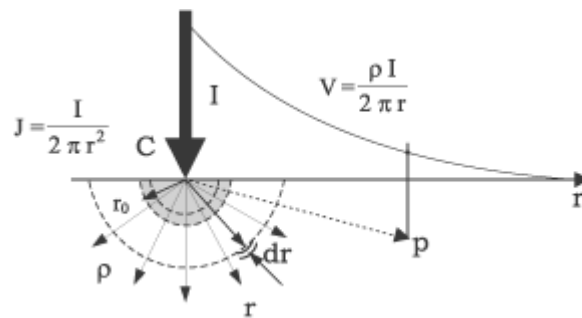


Figura 2.34. - Variación del potencial (V) en el suelo (ρ) respecto de la dispersión de una corriente (I).

Fuente: Puesta a tierra en edificaciones...(ver bibliografía)

Reemplazando (J) en la expresión del Campo (E) ya deducida:

$$\frac{dV}{dr} = -\frac{\rho I}{2\pi r^2}$$

Medida de parámetros eléctricos aplicados a puestas a tierra puntuales

Conceptos

- Suelo:

Sistema natural, resultado de procesos físicos químicos y biológicos, con componentes principalmente minerales y sólidos inertes que le dan estabilidad, y adicionalmente líquidos y gases que definen su comportamiento eléctrico.

- Tierra:

Suelo local de una instalación eléctrica con la que interactúa con un comportamiento conductivo natural insuficiente, y requiere de tratamientos e instalaciones complementarias de puesta a tierra, cuando se prevé una conexión a tierra.

- Suelo homogéneo:

Condición ideal (teórica) de un suelo isotrópico y de profundidad infinita (un solo estrato) que puede ser representado por un solo valor de resistividad, cualquiera que fuere la profundidad del sondeo de las medidas.

- Suelo estratificado:

Condición real de los suelos conformados por estratos de diferente resistividad y espesor, su formación obedece a los fenómenos geológicos naturales. Para puestas a tierra interesan, principalmente, los estratos superficial y subyacente.

- Resistividad del suelo:

Representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estrato del suelo; se le obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo, su magnitud se expresa en (Ohm-m) o (Ohm-cm), es la inversa de la conductividad.

- Resistividad Equivalente:

Es la resistividad obtenida con una medida indirecta, bajo las condiciones que impone un electrodo explorador introducido en el suelo natural, solo es representativo de un valor promedio aproximado a veces poco inconsistente, hasta la profundidad de dicho electrodo.

- Resistividad Aparente:

Es la resistividad obtenida con una medida directa en el suelo natural, bajo el esquema geométrico especificado por el método de (4) electrodos, aplicado con

circuitos independientes de corriente y potencial, solo es representativo de un punto de la característica del suelo estratificado.

- Sondeo geoelectrico:

Medida de la resistividad aparente del suelo estratificado, aplicando el principio de caída de potencial con un método y distancias especificadas para una relación más o menos aproximada con la profundidad de la exploración (método WENNER: $a =$ Profundidad media)

- Resistencia Mutua:

Fenómeno resistivo que aparece entre electrodos de puesta a tierra o puntos próximos en el suelo, mediante el cual, la corriente que se dispersa a través de uno de ellos, modifica el potencial del otro; su unidad es el (Ohm).

- Tierra Remota:

También denominada tierra de referencia, es el lugar o la zona de mínima resistencia, más próxima del suelo subyacente a una instalación eléctrica o a una puesta a tierra, respecto de las cuales se le atribuye por convención el potencial cero.

El modelo básico para su aplicación, considera al suelo inicialmente como un medio homogéneo, que reproduce los fenómenos del Campo Eléctrico conservativo, a partir de cuyo desarrollo bajo condiciones establecidas, se define el principio de caída de potencial para la ejecución de las medidas directas de campo, de resistividades, resistencias de dispersión y potenciales de toque y de paso; entre ellas, la primera se considera imprescindible para los estudios de diseño, diagnóstico y corrección de puestas a tierra, dado que la identificación de dicho parámetro sólo a partir de las características físicas del suelo no es confiable.

Comportamiento eléctrico del suelo

Los suelos tienen conformación estratificada, con capas superpuestas de características conductivas propias que obedecen a los procesos de meteorización, transporte y acumulación de productos sólidos a través de las edades Geológicas;

cuando son planos son gruesos y laminares, y cuando son accidentados son delgados e irregulares.

Conducción Eléctrica del Suelo

Normalmente no son buenos conductores de la electricidad, sin embargo, la dispersión de la corriente permite una capacidad de conducción aceptable que también es de naturaleza electrolítica y/o electroquímica, y depende principalmente de la porosidad del material que contiene la humedad y las sales solubles, y acompaña en menor o mayor grado a otras características como la granulometría, la compactación y la temperatura que controlan su conductividad, especialmente tratándose de los estratos superficiales donde las corrientes por encima de (10 A) ocasionan su desecamiento por Efecto Joule y el incremento local de la resistividad.

Tipo de Suelo	ρ (Ohm-m)
Limos, Arcillas, Suelo Vegetal y de Cultivo	10 – 100
Tierra Fina, Turbas, Concreto Húmedo (suelo)	100 – 300
Tierra Aluvial, Arenas firmes, suelo seco	300 – 800
Arena Eólica, Lecho de Río, Cascajo	800 - 3000
Rocas Estratificado, Fracturadas, Monolíticas	3000 - 10000
Suelos de Feldespatos, Micas, Cuarzos	5000 - 30000
Concreto Normal Exterior (seco)	10000 - 50000

Tabla 2.4.1. - Resistividades referenciales de suelos naturales genéricos.

Fuente: Standard 80 IEEE.

La evaluación eléctrica de los suelos, se hace en base a medidas de resistividad, cuya unidad (Sistema Internacional) es el (Ohm-m); al respecto la información geológica propone tablas genéricas con rangos referenciales, tanto para suelos (Tabla 2.4.1) como para las aguas que los recargan (Tabla 2.4.2.); de otro lado, disponiendo de

una muestra representativa, también se hacen medidas de Laboratorio, en ambos casos los datos obtenidos no siempre son correctos; adicionalmente, también se suele disponer de datos en (ms/cm) para la conductividad de las aguas y de los suelos; en éste último caso dicho parámetro corresponde a una solución de 20 gramos de muestra disuelta en 100 cc de agua destilada y no al suelo natural.

En definitiva, solo es segura la medida de campo, con todas las previsiones que permitan mínimos errores.

Tipo de Agua	P (Ohm-m)
Meteóricas (lluvia atmósfera limpia)	800 - 1200
Meteóricas (lluvia atmósfera industrial)	30 – 400
Superficiales Puras (filtraciones del suelo)	≈3000
Superficiales Salobres (mar y minerales)	≈0.1
De Anomalías Geotérmicas	0.03 – 0.3
Estancadas	30 – 150
Filtraciones Rocosas	30 – 1000

Tabla 2.4.2. - Resistividades referenciales de aguas naturales genéricas. Fuente: Puesta a tierra en edificaciones...(ver bibliografía)

Medida de la resistividad del suelo

De acuerdo con el principio de caída de potencial, todo esquema de medidas desde la superficie del suelo, implica la inyección de una corriente (I), que penetrando a cierta profundidad, circulará entre dos puntos del suelo de resistividad (r), creando un espectro de superficies equipotenciales en la que es posible establecer una diferencia de potencial (V_s) entre otros puntos diferentes, cuya ubicación es determinante para la medida de la resistividad del suelo estratificado.

Disposición de Medidas - Método WENNER

Se trata de la medida de la resistividad aparente del suelo natural, basado en la aplicación del principio de caída potencial, bajo condiciones geométricas simplificadas que fijan la equidistancia entre los (4) electrodos de medida necesarios, (2) de corriente (C1 y C2) y (2) de potencial (P1 y P2), que deben ser colocados en línea recta a distancias (a); desde los cuales se mide la resistencia media de conducción (R) del segmento de suelo (P1, P2) de longitud (a), que se opone a la circulación de la corriente inyectada (I) entre los extremos (C1, C2), de longitud (3a).

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi} F(r_n) \text{ luego } \rho_a = 2\pi R \frac{1}{F(r_n)}$$

• Esquema de medidas de campo

Los electrodos de medida, colocados en forma equidistante con un intervalo (a) propio para cada medida (Fig. 2.35.), deben ser clavados en el suelo firme a una profundidad máxima ($b=a/20$ m), con la finalidad de no introducir mayores errores; generalmente es suficiente considerar entre 0.15 m a 0.20 m; de otro lado, tomando la expresión básica que incluye el factor de forma con las respectivas distancias (R1, R2) y (r1, r2), entre los electrodos de corriente y los electrodos de potencial; se deduce:

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right] \text{ para } \begin{matrix} r_1 = R_2 = a \\ r_2 = R_1 = 2a \end{matrix}$$

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi} \cdot \frac{1}{a} \text{ luego } \rho_a = 2\pi R a$$

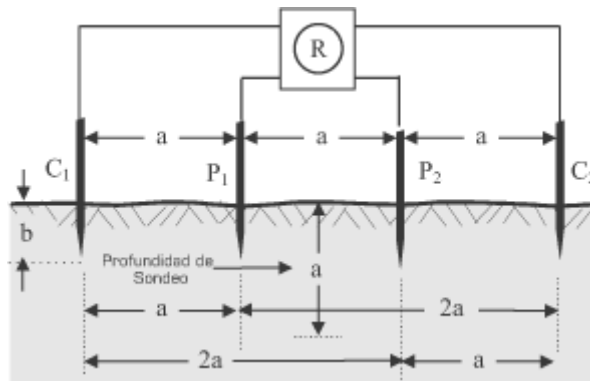


Figura 2.35. - Disposición de los circuitos de medida Método Geoeléctrico de WENNER. Fuente: www.monografias.com

En caso de medir clavando los electrodos de medida con las profundidades indicadas, utilizando distancias ($a < 3\text{m}$), se podrán hacer las correcciones necesarias aplicando la expresión; normalmente los errores resultantes son muy pequeños cuando el estrato superficial no tiene una cobertura delgada distinta.

$$\rho_a = \left[\frac{2\pi b}{2\text{Ln} \left[\frac{2+E}{1+F} \right] + 2F - E - \frac{a}{b}} \right] R, \text{ donde}$$

$$E = \sqrt{4 + (a/b)^2} \text{ y } F = \sqrt{1 + (a/b)^2}$$

- Medidas y resultados de las medidas

Las medidas de la resistividad aparente (ρ_a) para diferentes distancias (a) deberán hacerse en suelo natural, sin cobertura de hierba fresca, humedad reciente ni instalaciones subterráneas próximas; se utilizará un instrumento portátil de 4 bornes que sintetiza la magnitud de (R) a partir de la corriente (I) y la diferencia de potencial (V_s); ambos circuitos de medida se mantendrán en línea recta para todos los sondeos Geoeléctricos previstos. Los resultados son representativos para una profundidad media (a), idéntica a la distancia de medidas Wenner que se aplica.

El número de puntos de medida (serie de puntos) a ser realizados sobre una directriz (Tabla 2.4.3), para una profundidad promedio de (8 m) será mínimo (4) que corresponden a la serie simple, y dependiendo de la resolución que se desee lograr para la curva, se podrán agregar otros puntos intermedios y extremos series (Fina 1, Fina 2); el procesamiento se hace como mínimo para suelo de dos estratos con los siguientes parámetros.

- La resistividad superficial (ρ_1)
- La resistividad subyacente (ρ_2)
- El espesor del estrato ρ_1 (h_1)

Series	Distancia (a) de Medida WENNER						
Simple	-	1.0	2.0	-	4.0	8.0	-
Fina 1	0.75	1.5	3.0	4.0	6.0	8.0	12.0
Fina 2	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	12.0

Tabla 2.4.3. - Series de distancias de Medida WENNER para una profundidad media de 8 m. Fuente: Puesta a tierra en edificaciones...(ver bibliografía)

- Ventajas y limitaciones del método.

El Método WENNER esta normalizado (ASTM:G-57), y tiene la ventaja de ser sencillo y más preciso para fines de uso eléctrico que otros métodos basados en el mismo principio, dado que no exigen instrumentos de alta sensibilidad, son ideales para despliegues cortos (pequeña profundidad) tales como los que se necesitan para puestas a tierra y las variaciones laterales en este caso no le afectan; se aplican a todo tipo de suelos.

Cuando la distancia de medidas es corta ($a < 1m$), puede conllevar desviaciones dependientes de la delgada cobertura superior del suelo que a veces suele ser diferente

que el estrato superficial (ρ_1); por ello, cuando se hace una serie de medidas simple de (4 puntos), no deberá incluirse distancias ($a < 1,0$ m), y cuando la serie los incluye (Series Fina 1 y Fina 2), aquellos que resulten absurdos deberán ser desestimados.

Ejecución de medidas de resistividad

Según se infiere de las ventajas y limitaciones de los métodos descritos, la única forma de obtener los resultados más precisos y confiables de resistividad del suelo, sería midiendo con el Método de Caída de Potencial (Fig. 2.36.), es decir mediante dos circuitos independientes, uno de Corriente (I) y otro de potencial (Vs), utilizando 4 electrodos; en este caso todavía conviene remarcar lo siguiente:

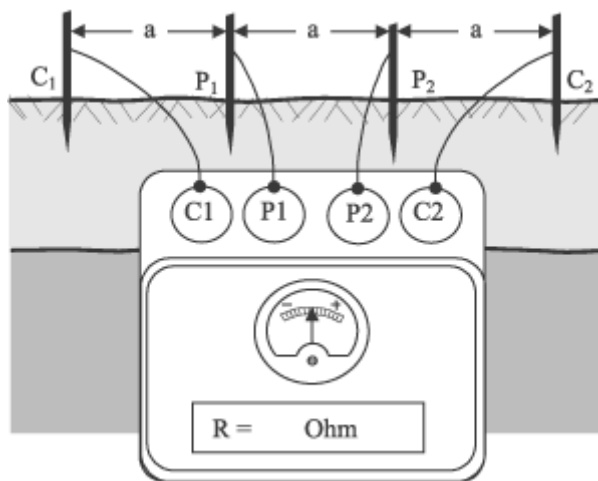


Figura 2.36. - Medidas Wenner de la resistividad aparente del suelo con un telurómetro. Fuente: www.monografias.com

- Para el diseño de puestas a tierra de corriente alterna, el Método de Wenner (Fig 2.35) es el que permite obtener una mejor consistencia de los valores medidos y un procesamiento más sencillo de los mismos.
- Será necesario llevar a cabo por lo menos una serie de medidas (Simple o Fina), con varios puntos sobre una trayectoria rectilínea que pasa por el área en el que se hace la exploración.

- Cada distancia de medidas (a) nos conduce a un valor aparente de la resistividad (ρ_a) obtenida, que no es representativa ni define al suelo ni a ninguno de sus estratos.
- Se requiere cumplir con el procesamiento por comparación con una característica patrón de la serie de medidas exploratorias de campo, es representada por una curva de puntos (ρ_a, a) que se grafica en escala Log-Log.
- El resultado del procesamiento, ya sea analítico (numérico) o gráfico (plantillas) permite obtener el perfil estratificado del suelo en por lo menos un modelo de dos estratos, con resistividades, (ρ_1) superficial, (ρ_2) subyacente, (h_1) espesor de ρ_1 .

Criterios Básicos

La cobertura de instalación de las puestas a tierra que se consideran puntuales no es muy extensa, como mínimo podría ser el área ocupada por un pozo (1,0 m²) o una zanja (3,0 m²), o medianamente por una combinación simple de ambos, en un armado que encierre una extensión menor que 100 m²; en este caso también conviene remarcar lo siguiente:

- Las instalaciones de puestas a tierra no están destinadas al control de potenciales anormales ni transferidos (tensiones de toque y paso), tampoco constituye una exigencia del diseño, su minimización.
- Las resistencias de dispersión objetivo, generalmente no tienen exigencias severas, las estipulaciones reglamentarias, tales como el (CEN), fijan máximos de 25 Ohm hacia menores valores, en función de las instalaciones.

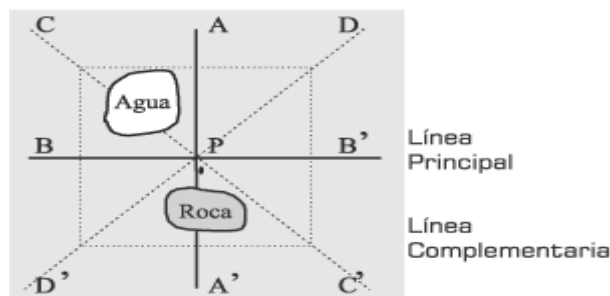


Figura 2.37.- Líneas de medida de resistividad aparente (AA', BB') principal, (CC', DD') complementarios

- Normalmente se conoce el área disponible en el que deberá ubicarse la puesta a tierra; si es de forma cuadrada se podrá prever «un eje» de medidas (Fig. 2.37), y si es longitudinal hasta dos ejes; la validez de los resultados supera los 15 m de radio alrededor de ellos.

Procedimiento de medición

- Por cada eje se hacen pasar dos líneas de medida ortogonales (AA', BB'); según la importancia de la puesta a tierra se adopta la respectiva serie de distancias de medida aplicable.
- Se ejecutan las series de medidas en ambas líneas y los puntos se grafican en papel Log-Log. Las curvas obtenidas deberán ser casi coincidentes o muy próximas.
- En caso de diferencias parciales o en tramos, se ejecutarán y graficarán nuevas medidas. Las líneas respectivas (CC', DD'), estarán a 45° de las dos primeras junto a las cuales se grafican.
- Las curvas más próximas serán consideradas representativas (Fig 2.38.) y se promediarán punto por punto de medida, según la distancia (a) de la Serie Wenner.
- Los puntos promedio de la curva así obtenida son los que se destinan al procesamiento para la determinación de las resistividades de diseño.

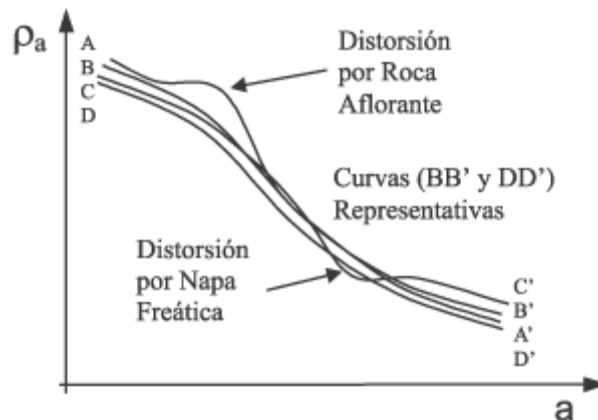


Figura 2.38. - Curvas de puntos correspondientes a cuatro líneas de Medida Wenner. Fuente: www.monografias.com

Condiciones para las medidas de resistividad del suelo

Cuando el área está próxima a instalaciones eléctricas subterráneas o aéreas, especialmente de alta tensión, se optará por un alejamiento de 50 m; complementariamente se aplicarán las siguientes condiciones:

Para la seguridad del operador que mide cerca de instalaciones eléctricas energizadas

- Los operadores de medidas deben utilizar guantes y zapatos aislantes.
- No medir bajo lluvia, neblina densa o $H_r > 80\%$ cerca de líneas eléctricas o subestaciones.
- No medir cuando hay tormentas y rayos aguas arriba o aguas abajo de las líneas eléctricas.

Para asegurar la precisión de las medidas

- Evitar la superposición de los circuitos de medida (I) y (Vs).
- Asegurar buen contacto entre los electrodos clavados y el suelo.
- Evitar paralelismo con líneas eléctricas aéreas y subterráneas.
- Evitar proximidad con objetos conductores de superficie y subterráneos.
- Evitar la influencia directa de los circuitos de alta tensión.

- Medir en horas de ausencia o mínimas corrientes erráticas o geomagnéticas.

La puesta a tierra, como se menciona anteriormente, es el proceso de realizar una conexión entre un circuito eléctrico y la tierra. Este proceso comprende la inserción de alguna forma de electrodos en el suelo local. A través de esta conexión pasan los eventos eléctricos hacia y desde el sistema, o a los sistemas relacionados. El carácter del mismo determinará cuan bueno es y si es una conexión a tierra confiable durante todo el año. También hay que tener en cuenta la respuesta transiente, impedancia o inductancia efectiva de esta interfase. Estos factores determinarán la efectividad para funciones tales como protección de equipos y seguridad del personal bajo condiciones de falla a tierra.

El conocimiento de las condiciones del suelo a tratar es el primer paso del diseño del proceso. Esto incluye el contenido de humedad, temperatura y resistividad para las distintas condiciones que se pueden presentar en el año. La aplicación de estándares con poca referencia a las características del sitio o al impacto de los cambios de estaciones, pocas veces resultará para un interfase de tierra efectiva. Para el caso del terreno que circunda al edificio, este se conforma por una capa de relleno de aproximadamente 4.591m, de acuerdo a mediciones realizadas, presentando una resistividad promedio en el primer estrato de $249.2\Omega\text{-m}$, muy alta para una zona donde el nivel freático es elevado en épocas de lluvia.

Una de las formas para poder llegar a una baja resistencia de puesta a tierra cuando los electrodos convencionales no pueden, es a través del uso de componentes químicos para el acondicionamiento del terreno. Lamentablemente, si este proceso se hace en forma manual, tiende a durar muy poco tiempo. Para evitar este percance se utiliza un tipo de electrodos que contienen internamente el producto químico para acondicionar el área requerida. Este tipo de electrodos se diseñan con la finalidad de que tengan un proceso de acondicionamiento automático, pero el buen funcionamiento de estos electrodos requiere una cantidad mínima de humedad, pues esta facilita la drenación de las sales y la disociación de las sales en iones positivos y negativos.

Las barras químicas Chem-Rod son un ejemplo de este tipo de electrodos, pues éstas conforman un cilindro tratado de un material, llamado GAF, que es altamente osmótico, conductivo y presenta muy pocas variaciones en el tamaño del grano ante variaciones de humedad y temperatura. El hecho de que se utilice este tipo de material mantiene a la barra química dentro de un medio cargado de humedad. La cantidad de volumen que se utilice de este material hace variar la efectividad del electrodo para la resistencia de puesta a tierra.

El factor de costos de este tipo de sistemas, queda determinado ante la variación del número de electrodos y la variación del volumen del cilindro de tratamiento relleno con el material osmótico empleado.

Electrodo de tierra es el elemento del sistema de puesta a tierra que conecta al conductor de acople con la interfase facilitando el paso de la corriente a tierra; por lo tanto un electrodo es todo elemento conductor en permanente contacto eléctrico con el suelo. Este puede ser en forma de varilla, cable, tubo, placa, cinta, tuberías, semiconductores de carbón, fundaciones de concreto conductivo, etc. Los electrodos que se utilizan comúnmente son: varilla metálica, placas, conductores enterrados horizontalmente, barras químicas y fundaciones de concreto conductivo.

La Interfase a Tierra es la zona de influencia alrededor del electrodo, donde hay variación de la resistencia por unidad de área a medida que se aleja del mismo, se denomina interfase.

La resistencia a tierra de un electrodo o varilla está constituida por:

- Resistencia del electrodo (metal).
- Resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo.

La primera de las dos resistencias, normalmente, resulta ser muy pequeña con respecto a la segunda y puede ser despreciada para fines prácticos. La variación de la resistencia (OR) de una varilla de tierra a lo largo de una dirección radial en incrementos iguales (OX), disminuye exponencialmente con cada incremento de X; es decir, OR/OX es una exponencial decadente como se muestra en la figura:

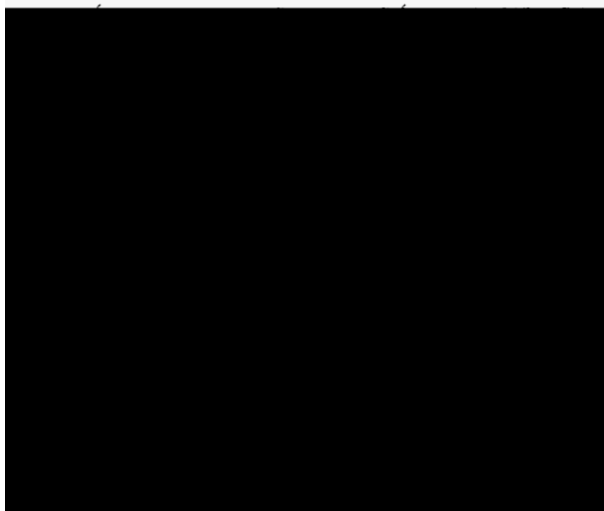
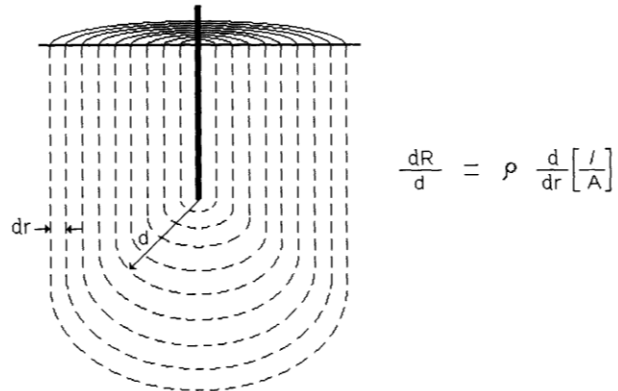


Figura 2.39. Fuente: Uso de electrodos químicos...(ver bibliografía)

Las capas de suelo que circundan la varilla, figura 2.39, aumentan de diámetro y consecuentemente cada una ofrece menos resistencia que la capa previa. Al extender estas mediciones a lo largo de la radial, el cambio en resistencia se vuelve menos perceptible y a aproximadamente 1.1 veces la longitud del electrodo en tierra, el cambio de resistencia OR se torna imperceptible. Para ese entonces alrededor del 95% \pm 2% de la conexión a tierra a sido completada. El resto de la tierra misma completa el porcentaje sobrante de la interfase.

CAPAS DE RESISTENCIA (VARILLA VERTICAL)



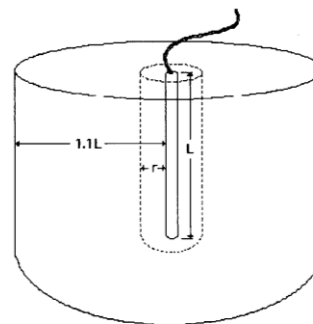
CAPAS DE RESISTENCIA (VARILLA VERTICAL)

Figura 2.40

Fuente: www.ligthingeliminators.com

El suelo dentro del hemisferio formado por esos radios es referido como Hemisferio de Interfase (IH), como se muestra en la figura 2.41, el cual representa el volumen requerido para completar la conexión eléctrica a tierra.

HEMISFERIO DE INTERFASE



HEMISFERIO DE INTERFASE

Figura 2.41. Fuente: www.ligthingeliminators.com

Definiendo el término de efectividad (E), como el porcentaje de conexión a tierra completada por el electrodo para un radial determinado. Así, la efectividad tendrá

el valor de 100% cuando las variaciones de resistencia del electrodo para un incremento en la radial se tornen imperceptibles. Lo cual indica que para esa radial la resistencia de puesta a tierra del electrodo ha sido completada.

Por ejemplo, si utilizamos el electrodo de tierra como electrodo de medición y con un electrodo auxiliar nos vamos alejando tomando diversas medidas a lo largo de la radial, se podrá apreciar que en primer instante (cuando el electrodo auxiliar está muy cerca) la resistencia de puesta a tierra es muy baja y que a medida que uno se aleja la resistencia va en aumento. La fórmula para la resistencia de un electrodo simple enterrado, es:

$$R = \frac{\rho}{4L} \left(\ln \frac{4L}{r} \right)$$

Pero considerando que la resistencia va a depender del lugar de la radial, la fórmula estará mejor representada por:

$$R = \frac{\rho}{4L} \left(\ln \frac{4L}{r} \right) + \frac{\rho}{4L} \left(\ln \frac{4L}{r} \right)$$

donde:

ρ = resistividad del suelo < Ω ·m>.

L = longitud de la barra <m>.

r = radio de la barra <m>.

E = efectividad de la resistencia a tierra.

El diámetro de un IH es aproximadamente 2.2 veces la longitud (L) del electrodo a tierra. Cuando se requiere más de un electrodo, se debe tratar que sus IH no se solapen puesto que esto reduciría la efectividad de los electrodos, esto es causado

por la resistencia mutua entre los electrodos.

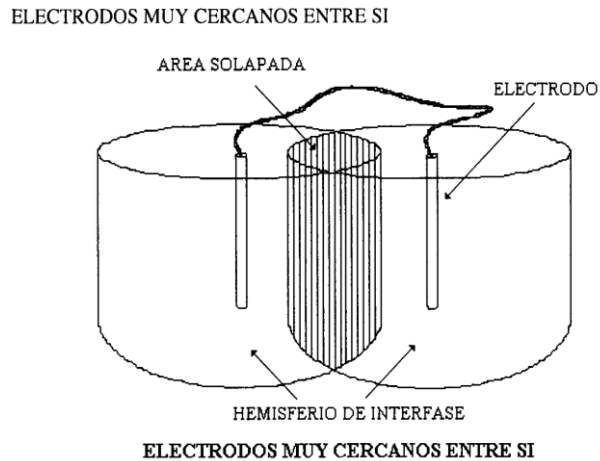


Figura 2.42. Fuente: www.ligthingeliminators.com

La tabla 2.4.4, muestra la variación de resistencia de un electrodo de 3m de largo ($L = 10\text{ft}$) por 5/8' de diámetro contra el radio r de alejamiento del electrodo.

Tabla 2.4.4.- Variación de la resistencia de un electrodo. Fuente: Uso de electrodos químicos del tipo... (ver bibliografía)

$r \text{ <ft>}$	$\Delta R \% \text{ o } E(r) \%$
0,1	25
0,2	38
0,3	46
0,5	52
1	68
5	86
10	94
15	97
20	99
25	100

El suelo dentro del Hemisferio de Interfase ejerce una gran influencia en la resistencia de puesta a tierra del electrodo. Despreciando la resistencia que ofrece el

metal del electrodo, la interfase a tierra o puesta a tierra estará constituida por dos componentes:

- La resistencia del suelo dentro del Hemisferio de Interfase (R_{in}).
- La resistencia promedio del suelo en el resto de la tierra (R_{out}).

Debido a la relación exponencial que existe entre la resistencia del electrodo y la distancia del mismo, el suelo en el área inmediatamente circundante del hemisferio de interfase tendrá mayor influencia que el resto de la tierra circundante.

La resistencia de un electrodo a tierra, a 1.1 veces la longitud del electrodo, va a ser la suma de las contribuciones de R_{in} y R_{out} . Las cuales son aproximadamente, un 95% para R_{in} y un 5% para R_{out} .

Esto es debido a que la efectividad para esta radial es aproximadamente un 95%, el cual le corresponde la resistividad ρ_{in} que es la que se encuentra dentro del hemisferio de interfase. El resto de la resistencia es completada por ρ_{out} que es la que se encuentra fuera del hemisferio de interfase.

$$R_1 = 0.95 R_{in} + 0.05 R_{out}$$

El valor real de la resistencia de un electrodo a tierra enterrado verticalmente puede estimarse con la siguiente fórmula:

$$R_1 = \frac{\rho_{in}}{4L} \left(1 + \frac{\rho_{out}}{\rho_{in}} \right)$$

La expresión se reduce a:

$$R_1 = \frac{\rho_{in}}{4L} \ln\left(\frac{4L}{r}\right) (0.95 \rho_{in} + 0.05 \rho_{out})$$

Donde:

ρ_{in} = resistividad del suelo dentro del Hemisferio de Interfase.

ρ_{out} = resistividad promedio del suelo en el área general

(aproximadamente las primeras 100 yardas).

Si $p_{in} = p_{out}$, para un espaciamiento de 1.1 veces la longitud del electrodo, entonces nos quedaría la fórmula general antes descrita.

Diseño de mallas con múltiples electrodos:

La barra conductora o varilla es un mecanismo simple y económico para llevar conexiones a tierra, pero normalmente la resistencia de una varilla simple no es en general suficientemente baja y por lo tanto es necesario utilizar cierto número de ellas colocadas en paralelo, ya sea en forma de anillo o de malla, a fin de proveer trayectorias paralelas de corrientes a tierra. Hay que tomar en cuenta que para las varillas colocadas en paralelo, no se cumplen directamente las fórmulas usuales de resistencias en paralelo.

La resistencia total lograda por varias varillas va a depender del espaciamiento entre ellas.

$$R_1 = \frac{\rho}{L} \left(\frac{96 L}{n} \right)$$

El factor de la constante combinante K de la tabla 2.16 para múltiples electrodos, está basado en un criterio de espaciamiento para cuando se ha logrado un $95\% \pm 2\%$ de la plena conexión a tierra del electrodo.

Tabla 2.4.5. Fuente: Standard 80-IEEE

FACTORES MULTIPLICADORES K, PARA MÚLTIPLES ELECTRODOS



Una vez que se ha estimado la resistencia de una varilla (R1), la resistencia total llegada con N varillas, sin que haya solapamiento de áreas, se puede calcular a partir de la siguiente relación:

$$R_N = R_1 * K$$

donde:

N = número de varillas.

R_N = resistencia total con N varillas, en ohm <a. >.

R₁ = resistencia de una varilla en ohm <£2. >.

Aumento de Suelo:

Una forma de obtener una menor resistencia es acondicionando un cilindro alrededor del electrodo con un material de mayor conductividad que el suelo circundante. El material debe ser osmóticamente conductor, debe de conservar sus características por un buen período de tiempo y su granularidad no debe presentar variaciones apreciables, esto permite que el contacto entre el electrodo y el material se mantenga. La figura 2.32 muestra la idea del cilindro crítico.

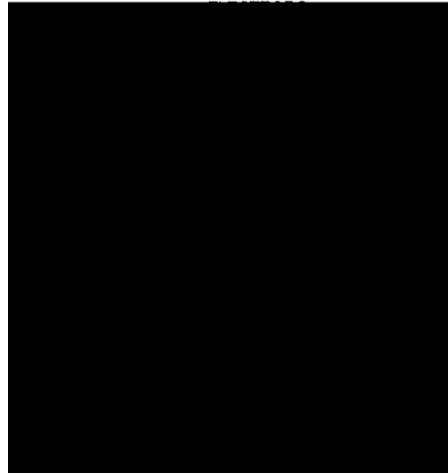


Figura 2.43

Fuente: www.ligthingeliminators.com

La resistencia de una varilla (R_1) dentro del hemisferio de interfase, es ahora el producto de tres resistencias: $R.a$, $R.b$ y $R.c$. La tercera resistencia ($R.c$) normalmente se puede despreciar, esta solo resulta significativa cuando $R.a$ y $R.b$ son muy bajas. Un ejemplo de ello es un pantano de sal rodeado por suelo seco arenoso, la resistencia a tierra estaría predominantemente contribuida por $R.c$.

La resistencia de las dos componentes $R.a$ y $R.b$ es una función de los radios $r.a$ y $r.b$, o el tamaño del cilindro crítico acondicionado.



donde:

$p.a$ = resistividad del material acondicionador, $\langle i2.-m \rangle$.

$p.b$ = resistividad del suelo, en el H.L, $\langle a.-m \rangle$.

E = Efectividad del interfase.

La efectividad da la información de la variación de la resistencia de un electrodo a la largo de su radial, como se ha explicado anteriormente y para el cilindro

crítico la efectividad corresponderá al nuevo diámetro del electrodo, debido al acondicionamiento. Para el Hemisferio de Interfase corresponderá prácticamente el resto porcentual de la efectividad.

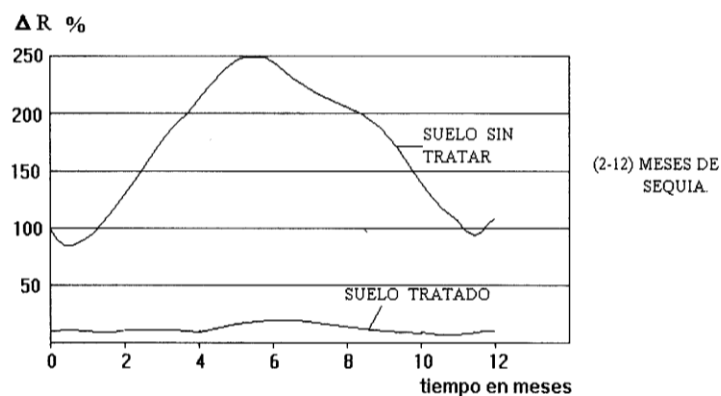
Tratamiento Químico de la Interfase

El tratamiento químico de la interfase es recomendable cuando se presentan las siguientes situaciones:

- a) Resistencia del sistema muy elevada.
- b) Cambios considerables en la resistencia por variaciones de la temperatura y la humedad.
- c) Cuando se quiere utilizar menor cantidad de electrodos.
- d) Instalaciones donde es muy difícil y por lo tanto costoso poder colocar electrodos de longitud considerable.

El tratamiento químico disminuye la resistividad de la interfase, permitiendo una buena conducción en un área relativamente grande.

La figura 2.44, muestra la disminución de la resistencia con este tipo de tratamiento y la mejoría que se consigue a los meses de haber acondicionado la interfase.



VARIACION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN FUNCION DE LAS ESTACIONES EN UN SUELO CON Y SIN TRATAMIENTO QUIMICO

Figura 2.44. Fuente: www.ligthingeliminators.com

Existen diversas formas de realizar el acondicionamiento, una de ellas es utilizando diversas sales químicas como lo son el sulfato de cobre, sulfato de sodio, sulfato de magnesio, carbonato de sodio, cloruro de sodio, etc.; sin embargo este tipo de mejora pierde efecto al cabo de varios meses debido a que las lluvias y la porosidad del suelo hacen que estos compuestos se disuelvan y migren totalmente.

Otros materiales utilizados en la reducción de la resistividad de la interfase son los derivados del carbono, los cuales, cuando son llevados a diámetros de una granulometría muy pequeña proporcionan elementos estabilizadores de muy baja resistividad. Las arcillas osmóticas, por su propiedad de retener el agua durante largos períodos de tiempo, también son utilizados en el tratamiento de suelos, sin embargo hay que tener cuidado con la contracción y expansión de estas arcillas en los períodos de lluvia y de sequía.

Acondicionamiento Mineral Automatizado:

Entre los dispositivos de acondicionamiento automático de suelos, se encuentran, barras que tienen un diseño especial que permiten drenar al suelo circundante su carga química, un ejemplo de ello son la tipo XIT (XIT Rod), de esta empresa fabricante. La barra XIT es un tubo de cobre de 2 pulgadas de diámetro relleno con sal de piedra y perforado con respiraderos en la parte superior y con agujeros de filtración en la parte de abajo, como se muestra en la figura 2.45.

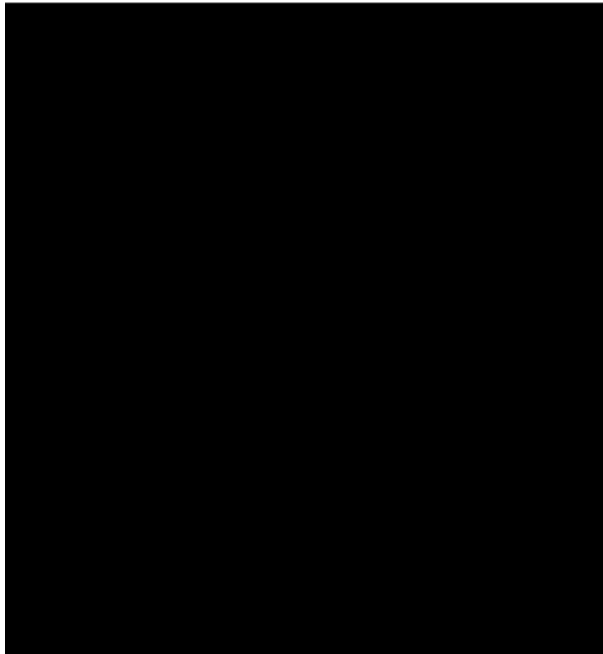


Figura 2.45. Fuente: www.ligthingeliminators.com

Las sales contenidas en el tubo absorben humedad del aire, creando una solución saturada de esa sal, la cual se filtra hacia afuera por la base de la barra acondicionando así el suelo en el área. Como resultado, se logra una reducción significativa en la resistividad del suelo en los lugares donde la humedad es alta, pero en los lugares desérticos este tipo de barras XIT tiene pocas ventajas sobre las varillas convencionales. Los sistemas, como la varilla XIT, que trabajan con el concepto de respiración de aire, sufren de dos limitaciones:

- Requieren de aire cargado de humedad.
- Sólo acondicionan el suelo alrededor de la base de la barra.

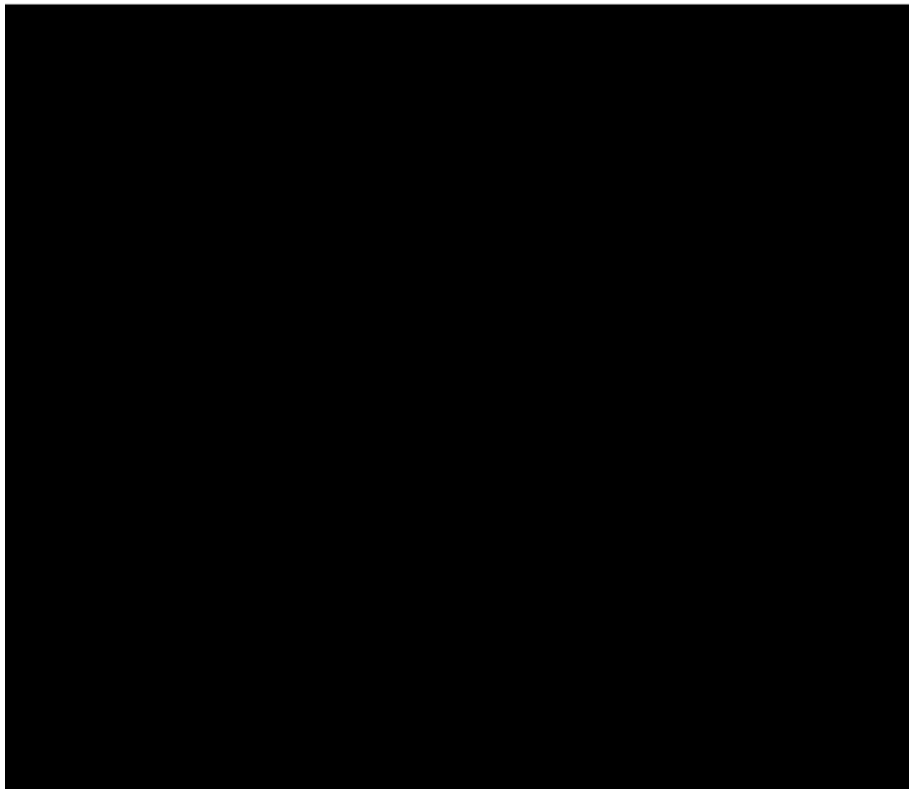
Para lograr mejores resultados se debe de acondicionar la mayor cantidad de suelo del Hemisferio de Interfase. Puesto que el Hemisferio de Interfase forma por lo menos el 90-95% de la conexión a tierra del electrodo, solamente se necesita acondicionar el suelo contenido en ese volumen. El suelo externo a ese volumen tiene poca influencia en la resistividad final del electrodo de interfase a tierra (5-10%).

Barras Químicas tipo Chem-Rod:

Bajo un principio de respiración de humedad, las barras químicas que tienen

este diseño, Chem-Rod, se asemejan a la barra XIT con la variante de tener varios orificios de salida a lo largo del electrodo, logrando una equiparación del volumen acondicionado. La tabla 2.4.6, compara el rendimiento de una barra tipo Chem-Rod con una barra convencional de 3/4 de pulgada por 10 pies, con terreno mezclado con sal simple (Na Cl); y una barra del tipo XIT rellena de sal (Na Cl). Estas medidas se hicieron para cinco suelos diferentes, en un margen de tres años.

TABLA 2.4.6. - : COMPARACIÓN DE LA CHEM-ROD Y OTROS ELECTRODOS



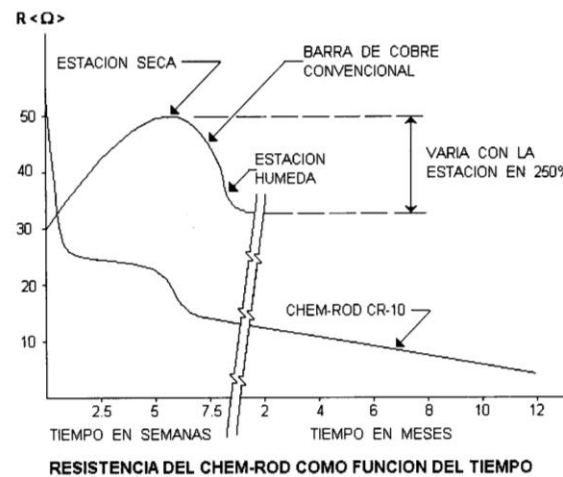
Fuente: Uso de electrodos químicos del tipo... (ver bibliografía)

El Chem-Rod produjo una resistencia más baja y tuvo la menor variación de resistencia en el período de un año. De esta forma se puede pensar que el mejoramiento mineral automatizado permitirá alcanzar una resistencia más baja, siempre que haya suficiente humedad.

Para que este tipo de barras logren su objetivo es necesario que pase cierto tiempo con la finalidad de que se puedan drenar las sales a la tierra. Las barras tipo XIT requieren de 4 meses bajo condiciones ideales, en cambio a las otras les toma 10

semanas para empezar a tener una buena efectividad. Este proceso es dependiente de las condiciones del medio, cuando las sales migran muy lentamente se puede llegar hasta 6 meses para poder lograr una resistencia de tierra estabilizada.

Figura 2.46. - Resistencia del Electrodo tipo Chem-Rod en función del tiempo.



Mejoramiento de Humedad Automatizado para electrodos químicos.

Debido a que la humedad es el medio que forma el electrolito en el suelo dándole su verdadero carácter conductivo, el contenido de humedad es quizás el factor más importante en la resistencia a tierra de un electrodo. Sin esto, se pierde gran parte del contacto con el suelo, haciendo dificultoso tener una buena resistencia de tierra para lugares que son considerados desérticos. Para un sistema convencional este tipo de reto puede involucrar un costo excesivo y para muchos casos no lograr el objetivo de una resistencia a tierra baja.

Para los ambientes secos, las barras químicas se pueden proveer de un acondicionamiento automatizado de humedad, tal que el suelo dentro del Hemisferio de Interfase pueda mantenerse al nivel de humedad requerido para cualquier situación. Para lograr esto, la humedad es inyectada directamente dentro de la varilla en forma de vapor.

Hay muchas formas de ofrecer humedecimiento automatizado, dos ejemplos de ello son: uno a través de una fuente de agua controlada centralmente. Mediante un sensor se abre la válvula del agua cuando esta se necesita, entonces se inyecta la humedad a la barra a través de un atomizador, el otro consiste en una unidad autónoma motivada solarmente, como se muestra en la figura 2.47.

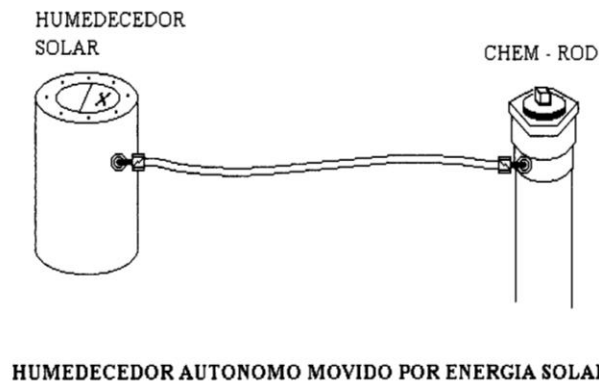


Figura 2.47. Fuente: www.ligthingeliminators.com

Esta incluye su propia fuente de agua que se encuentra situada en un reservorio que tiene una membrana que se expande y contrae con los efectos de temperatura. En el día se produce una evaporación debida al aumento de temperatura producido por el sol, luego con los cambios de temperatura la membrana se contrae formando una presión dentro del reservorio que inyecta la humedad que se queda en los ductos que comunican dicho reservorio y la barra.

Además de estos aditamentos, los electrodos químicos son dotados de un material de acondicionamiento en su cilindro crítico, esto le permite un mayor contacto con el suelo. Este material generalmente se compone de diferentes materiales conductivos. La resistividad del material varía de acuerdo al fabricante, pero los valores de resistividad son por el orden de los 6Ω .

Las variables de control para poder llegar a la resistencia deseada, con electrodos químicos son el número de sacos de material de acondicionamiento del terreno y el número de barras. Con estas variables se obtienen soluciones factibles para

el problema de bajar resistencias de puesta a tierra en terrenos de alta resistividad.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

Como se ha expuesto con anterioridad, el proyecto se enfoca en dar soluciones orientadas a la calidad de la energía dentro del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica (LCEE).

La metodología empleada para el cumplimiento de los objetivos planteados en este proyecto de grado está basada en conocimientos teóricos previos, información técnica obtenida en la Universidad, libros técnicos especializados en los temas tratados y material obtenido por Internet.

A continuación se presenta una descripción de la metodología empleada para la realización del proyecto de grado titulado **“Rediseño de las Instalaciones Eléctricas del área de Sistemas de Potencia del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica de la Universidad Simón Bolívar”**.

III.1. - FASES DE LA INVESTIGACIÓN

A) Rediseño del Sistema de Protecciones Eléctricas de la Sección de Potencia del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica:

1ra fase: Levantamiento de la información de la instalación eléctrica de la sección de Sistemas de Potencia del LCEE (niveles de cortocircuito, carga por circuito, etc), y recopilación de información referente a métodos de ensayos a interruptores termomagnéticos de caja moldeada.

2da fase: Selección de los interruptores de carga significativa, pertenecientes a la sección de Sistemas de Potencia y levantamiento de las curvas tiempo/corriente de los interruptores seleccionados.

3ra fase: Realización de análisis de coordinación de protecciones eléctricas en base a los resultados obtenidos.

4ta fase: Presentación de recomendaciones para la optimización del sistema de protecciones eléctricas.

B) Rediseño del Sistema de Iluminación del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica:

1ra fase: Recopilación de información acerca de las instalaciones de alumbrado actuales del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica.

2da fase: Recopilación de información acerca de los métodos de medición de niveles de iluminación para el diseño luminotécnico.

3ra fase: Realización de las mediciones de campo en el LCEE, utilizando el método de medición de punto por punto, descrito en el Marco Teórico.

4ta fase: Rediseño de las instalaciones de alumbrado del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica.

C) Rediseño de la Conexión de Puesta a Tierra del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica:

1ra fase: Recopilación de información referente a normativas nacionales e internacionales para conexiones de puesta a tierra en edificaciones.

2da fase: Recopilación de información referente al sistema de puesta a tierra del edificio y de información acerca de métodos estandarizados para el diseño de conexiones de puesta a tierra y ensayos.

3ra fase: Realización de ensayos a las instalaciones de puesta a tierra del Laboratorio, siguiendo el método normalizado conocido como método geoelectrico de Wenner, descrito en el Marco Teórico.

4ta fase: Realización del rediseño de la conexión de puesta a tierra.

III.2. - TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente Proyecto Especial de Grado, titulado "Rediseño de las instalaciones eléctricas del área de Sistemas de Potencia del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica de la Universidad Simón Bolívar", está enmarcado en la modalidad de proyecto factible, según los lineamientos establecidos por la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (1998), donde se define al mismo como:

“El Proyecto Factible consiste en la elaboración de un modelo operativo viable, o una solución posible a un problema de tipo práctico, para satisfacer necesidades de una institución o grupo social. La propuesta debe tener apoyo, bien sea de una investigación de campo, o de una investigación de tipo documental; y puede referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos y procesos. (p. 7)”.

III.3. - ÁREA DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación se desarrolló en las instalaciones de la Universidad Simón Bolívar, específicamente en la sección de Sistemas de Potencia de la Universidad Simón Bolívar, con los datos obtenidos a partir de los ensayos realizados y los resultados arrojados de programas de cálculo, especializados en la materia.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Con el enfoque dado al proyecto, orientándolo hacia la búsqueda de la calidad de la energía, se realizó un estudio de las características de las instalaciones eléctricas del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica (LCEE). Esta información se basó en planos de las instalaciones eléctricas del laboratorio, la supervisión de las mismas y en la evaluación de registros y levantamientos de carga recientemente realizados en el edificio. Una vez terminada esta fase del proyecto se realizó el siguiente análisis de la situación de la edificación en lo que respecta a las instalaciones eléctricas, la cual se describe a continuación:

- A pesar de las múltiples ampliaciones del espacio físico, existen muy pocas instalaciones eléctricas con tuberías expuestas en las recientes remodelaciones y se han aprovechado las instalaciones eléctricas ya existentes para alimentar las nuevas cargas. En este aspecto muchos de los circuitos se han visto afectados, sobrepasando su capacidad original.
- El estado en que se encontraron los tableros refleja un mantenimiento reciente, y se notó que algunos se encuentran fuera de los parámetros establecidos por el CEN en lo referente a la seguridad y riesgo eléctrico, como son los tableros de STB1T3 Y STB1T4.2.1; todos se encontraban debidamente identificados y con la leyenda de los circuitos. La mayoría de los tableros no poseen interruptores de reserva para futuras ampliaciones de la instalación y presentan un sistema desequilibrado, producto de la sobrecarga de algunos circuitos.
- Existe una documentación completa de los planos (planos de iluminación, tomas generales y especiales, plano de potencia) de la edificación. La simbología empleada en los planos se sujeta a lo normalizado en el Código Eléctrico Nacional.

- La capacidad instalada del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica es de 153KW, de la cual 67KW son cargas constantes y el resto de la carga, correspondiente a 87KW, pertenece a los equipos usados en las prácticas de laboratorio. El factor de uso de esta carga, de acuerdo con la información recopilada, depende de las cátedras dictadas por trimestre y las actividades prácticas por semana que estén planteadas en dicho período. Al estudiar el registro de carga y ser contrastado con el levantamiento de carga del LCEE, se presenta un máximo valor de potencia igual a 31KW. En base a esto, existe una diferencia de 121.98 KW, que al ser analizada revela una variación notable entre la capacidad instalada en el laboratorio y la carga empleada, incluso el máximo valor registrado es menor a las cargas que se consideran constantes dentro del laboratorio por lo que se evidencia un factor de uso muy bajo.
- El alumbrado, por su parte, presenta un deterioro significativo en algunas áreas como las luminarias del techo, lo que afecta significativamente las actividades académicas en horas nocturnas. Además, se cuenta con un tipo de lámpara que representa un significativo consumo de potencia en contraste con el nivel de iluminancia que proporciona.
- En cuanto al consumo del laboratorio, la demanda del edificio es de 40KW en promedio, muy baja con respecto a su capacidad instalada y a la demanda contratada con la Electricidad de Caracas, la cual está en 124KW. Por esta razón, en la actualidad se están haciendo esfuerzos dentro de la Universidad para ajustar los contratos y llevarlos a valores más cercanos al consumo real, con el objeto de disminuir el gasto por consumo eléctrico.
- La revisión del sistema de puesta a tierra reveló que, a excepción del Laboratorio de Análisis Transitorio de Redes (TNA), el resto de las instalaciones eléctricas carecen de conexión a tierra, lo que representa una deficiencia de la instalación en vista de que pone en riesgo al personal que labora en el edificio y, más aún, a los estudiantes que son generalmente los que trabajan directamente con los equipos de mayor potencia. Otra información adicional sobre la conexión de puesta a

tierra indica que está subdimensionada para el nivel de corto circuito del laboratorio. En un principio, esta condición tiene como origen el hecho de que la conexión de puesta a tierra consiste en un conductor de cobre desnudo calibre #2 que atraviesa los laboratorios de máquinas eléctricas y TNA a través de canaletas en el piso, y en sus extremos se conectan a tierra por medio de una jabalina. El conductor no es continuo ya que en parte de su recorrido está seccionado y unido mediante una abrazadera.

- Otro factor influyente en el valor de la resistencia de puesta a tierra se basa en el hecho de que la edificación está levantada sobre un relleno compuesto básicamente por piedra y tierra, haciendo que la resistividad que presenta el terreno sea alta, situación que se verificó con los datos obtenidos de las mediciones respectivas.

Básicamente, lo escrito anteriormente completa la información referente a la situación actual del sistema de potencia y las instalaciones eléctricas del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica, requerida para dar inicio al proyecto.

En el anexo A-2, se muestran imágenes de los ensayos realizados a los interruptores termomagnéticos del sistema de protecciones de la sección de Sistemas de Potencia, imágenes del estado actual del sistema de alumbrado del edificio y de la conexión de puesta a tierra.

CAPÍTULO V

Rediseño de las Instalaciones Eléctricas del área de Sistemas de Potencia del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica de la Universidad Simón Bolívar

1.- Rediseño del Sistema de Protecciones Eléctricas de la Sección de Sistemas de Potencia del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica.

- **Fase de medición:**

El objetivo de esta fase consistió en el levantamiento de las curvas de respuesta, tiempo vs corriente, de los interruptores termomagnéticos de caja moldeada (ITM) que correspondían a circuitos de la sección de Sistemas de Potencia del LCEE (Ver diagrama unifilar del sistema de potencia en el anexo A-11, P1), a fines de constatar si las características de diseño de los interruptores no se habían modificado con el tiempo, alterando a su vez el sistema de protecciones y la coordinación entre interruptores. Se realizaron las mediciones de acuerdo al procedimiento estipulado en la norma COVENIN para ensayos a protecciones, que permite medir con exactitud los tiempos de respuestas de los interruptores, sin introducir errores relacionados con el precalentamiento de las unidades térmicas del ITM.

Como el propósito no era evaluar cada uno de los interruptores de la sección de Sistemas de Potencia, se establecieron criterios de selección a fines de optimizar el trabajo y estudiar únicamente ramales que alimentaran cargas importantes de la sección. La selección de los interruptores para el levantamiento de curvas se basó en los siguientes criterios:

- ITM asociados a circuitos de uso más frecuente en la sección de Potencia del laboratorio.
- Circuitos con mayor capacidad de carga instalada.
- Circuitos con equipos de alto consumo de energía de uso frecuente.
- ITM que mostraron signos de deterioro.

De los tableros que alimentan a la sección de potencia, los circuitos que cumplieron con uno o más de los criterios son los siguientes:

Tablero **STB1T4.1** (Tomacorrientes sistemas de potencia):

- **Circuito 1** (Tomacorrientes oficinas 11 y 12): 1 interruptor termomagnético Westinghouse tipo Quicklag THQCL 1020, 1 polo, 40° C, 240/120V, 20A, Icc 10KA.
- **Circuito 2** (Tomacorrientes oficina 11 y laboratorio de protecciones): 1 interruptor termomagnético Westinghouse tipo Quicklag THQCL 1020, 1 polo, 40° C, 240/120V, 20A, Icc 10KA.
- **Circuito 5** (Tomacorrientes oficinas sp-7, sp-8 y laboratorio de protecciones): 1 interruptor termomagnético Westinghouse tipo Quicklag THQCL 1020, 1 polo, 40° C, 240/120V, 20A, Icc 10KA.

Tablero **STB1T2** (Tomacorrientes T.N.A.):

- **Circuito 4** (Tomacorrientes oficina sp-13): interruptor termo magnético Westinghouse tipo Quicklag THQC 1020, 1 polo, 40° C, 240/120V, 20A, Icc 10KA
- **Circuito 5** (Tomacorrientes oficina sp-13): 1 interruptor termomagnético Westinghouse tipo Quicklag THQC 1020, 1 polo, 40°

C, 240/120V, 20A, Icc 10KA.

- **Circuito 6** (Tomacorrientes oficina sp-13): 1 interruptor termomagnético Westinghouse tipo Quicklag THQC 1020, 1 polo, 40° C, 240/120V, 20A, Icc 10KA.

Tablero **STB1T3** (Tablero de la Mezanine del edificio de la sección potencia CEE):

- **Circuito 1** (Tomacorrientes sala de computación): 1 interruptor termomagnético Federal Pacific Corporation, 1 polo, 40° C, 120V, 20A, Icc 10KA.
- **Circuito 3** (Tomacorrientes oficinas sp-23, sp-24 y un tomacorriente oficina sp-21): 1 interruptor termomagnético Federal Pacific Corporation, 1 polo, 40° C, 120V, 20A, Icc 10KA.

Tablero **STB1I1** (Subtablero de iluminación, Laboratorio de Máquinas Eléctricas CEE):

- **Circuito 14** (Iluminación Mezanine de la sección de potencia): 1 interruptor termomagnético Westinghouse tipo EHB 1020, 1 polo, 40° C, 277V, 20A, Icc 10KA.
- **Circuito 18** (Iluminación techo edificio hileras 2 y 3): 1 interruptor termomagnético Westinghouse tipo EHB 1020, 1 polo, 40° C, 277V, 20A, Icc 10KA.

Tablero **STB2** (Analizador transitorio de redes TNA sección de potencia CEE):

- **Circuito 1** (Salida a transformador 416/220V): 1 interruptor termomagnético Westinghouse Tipo EHB, 3 polos, 40° C, 480V, 30A, Icc 10KA.

Una vez seleccionados los interruptores se procedió a ejecutar la siguiente fase, que tiene que ver con la medición y el procedimiento empleado.

Para simular las corrientes de falla en los ITM se utilizó un inyector de corriente marca Multi-amp, con capacidad máxima de inyección de corriente de 25000 amp momentáneos. Para medir los tiempos de respuesta de los ITM, ante corrientes de sobrecarga se utilizó el cronómetro del inyector y para medición de corrientes de cortocircuito se empleó un osciloscopio digital, capaz de registrar de forma más precisa los tiempos de disparo de la unidad instantánea. (Ver anexo A-3)

Los resultados de las mediciones se representan en las siguientes tablas, junto a su gráfica respectiva, donde se compara la curva levantada mediante el ensayo y la curva suministrada por el fabricante (Ver anexo A-4)

Tablero **STB1T4.1** (Tomacorrientes PB Sistemas de Potencia)

Tabla 5.1.1.- I vs t Circuito 1 - STB1T4.1. Fuente : Ensayos realizados por los autores

Medición	Múltiplo de I_n	I (A)	Tiempo (s)	Tiempo mín. Fabricante (s)	Tiempo máx. Fabricante (s)
1	1.5	30	201.32	200	1800
2	2	40	24.28	24	62
3	2.5	50	10.01	13	35
4	3	60	6.95	7	22
5	3.5	70	4.47	5	16
6	4	85	2.9	3.6	9.5
7	6.4	128	1.52	1.5	4
8	16	320	0.23	0.2	0.75
9	24.5	490	0.12	0.019	0.36
10	27.5	550	0.084	0.018	0.3
11	31	620	0.067	0.018	0.25
12	41	820	0.041	0.018	0.15
13	48	960	0.034	0.018	0.023
14	57	1140	0.022	0.017	0.017

15	62	1240	0.013	0.017	0.017
16	72	1440	0.016	0.0165	0.0165

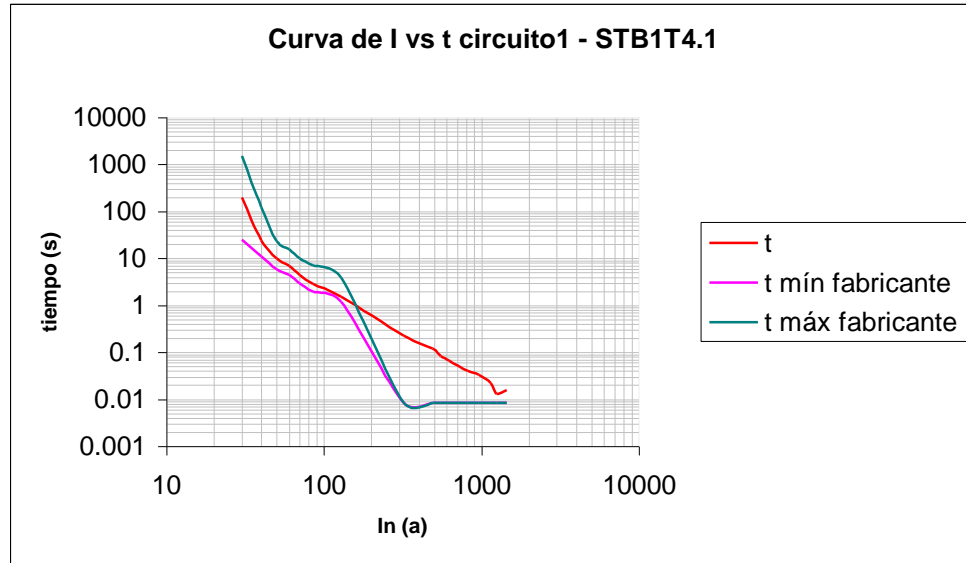


Figura 5.1. Fuente : Ensayos realizados por los autores

La gráfica anterior muestra tres curvas, la curva levantada por ensayo al interruptor y la curva de diseño suministrada por el fabricante con valores máximos y mínimos. El comportamiento de la curva revela que el interruptor ha perdido sus características de diseño en la zona umbral de disparo magnético, por lo que se podría afirmar que es la unidad térmica la única que está realizando la apertura del interruptor. Por la pendiente casi constante que presenta, en estas condiciones de operación, si ocurre una falla se sometería la instalación a sobrecalentamiento de los conductores debido a la apertura retardada del interruptor y puede incluso, en determinadas condiciones, provocar la apertura el ITM que le antecede, perdiéndose la selectividad en las operaciones del sistema de protecciones.

Por último, la unidad térmica opera en sus condiciones de diseño.

Tabla 5.1.2.- I vs t Circuito 2 - STBIT4.1. Fuente : Ensayos realizados por los autores

Medición	Múltiplo de In	I (A)	Tiempo (s)	Tiempo mín. Fabricante (s)	Tiempo máx. Fabricante (s)
1	1.5	30	81.83	200	1800
2	2	40	17.72	24	62
3	2.5	50	7.38	13	35
4	3	60	3.83	7	22
5	3.5	70	3.28	5	16
6	4	80	2.81	3.5	9.5
7	6	120	1.4	1.49	4.2
8	6.1	122	1.34	1.5	4.1
9	17	340	0.196	0.019	0.63
10	24	480	0.11	0.018	0.3
11	30	600	0.068	0.018	0.25
12	34	680	0.054	0.018	0.15
13	40	800	0.034	0.018	0.023
14	48	960	0.03	0.0175	0.0175
15	56	1120	0.021	0.017	0.017
16	64	1280	0.014	0.0165	0.0165

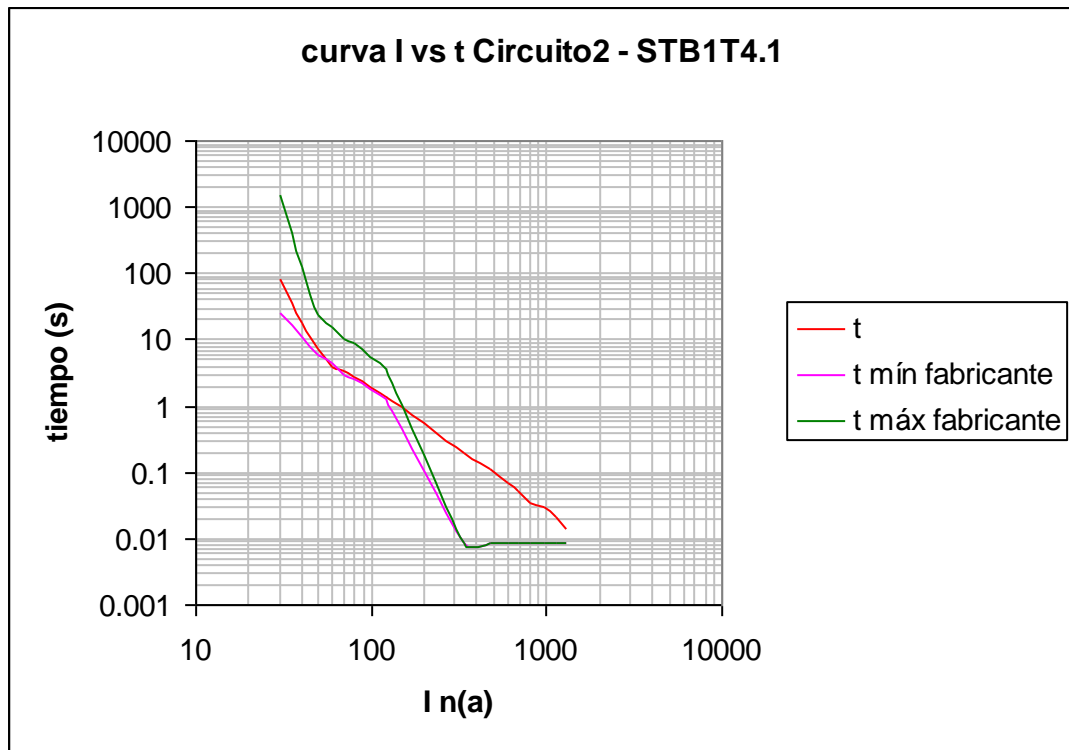


Figura 5.2. Fuente : Ensayos realizados por los autores

En base a las curvas del fabricante y los tiempos medidos, se confirmó que este interruptor se encuentra en las mismas condiciones de operación en su unidad magnética que el anterior, como es posible observar en la gráfica. La curva que describe el ITM se ajusta en la zona térmica suministrada por el fabricante, pero al acercarse a la zona de disparo instantáneo esta curva mantiene su pendiente por lo que se presume que es la misma unidad de disparo la que sigue realizando la apertura. Ante tal situación, se recomienda la remoción de los interruptores de este tablero por razones de seguridad y porque esta condición afecta la posibilidad de que se realice una adecuada coordinación con los interruptores que le anteceden. Además, el interruptor no garantiza que cumpla con sus funciones de protección en caso de falla, pues no se encuentra en plenas condiciones operativas.

Tabla 5.1.3.- I vs t Circuito 5 - STB1T4.1. Fuente : Ensayos realizados por los autores

Medición	Múltiplo de In	I (A)	Tiempo (s)	Tiempo mín. Fabricante (s)	Tiempo máx. Fabricante (s)
1	1.5	30	71.74	200	1800
2	2	40	15.04	24	62
3	2.5	50	10.38	13	35
4	3	60	6.03	7	22
5	3.5	70	3.86	5	16
6	4	80	3.45	3.5	9.5
7	6	120	1.36	1.25	3
8	15.2	304	0.2	0.22	0.81
9	20	400	0.12	0.019	0.36
10	27	550	0.074	0.018	0.3
11	32	640	0.048	0.018	0.25
12	40	800	0.04	0.018	0.23
13	44	880	0.037	0.018	0.015
14	55	1100	0.021	0.018	0.018
15	60	1200	0.012	0.0175	0.0175

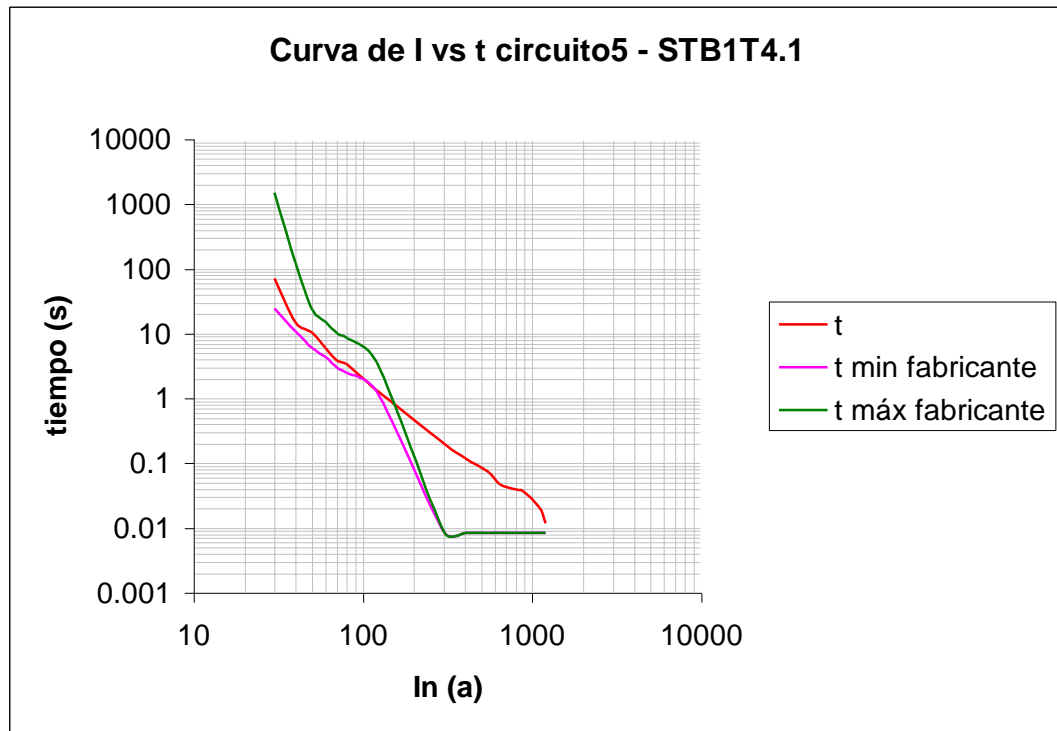


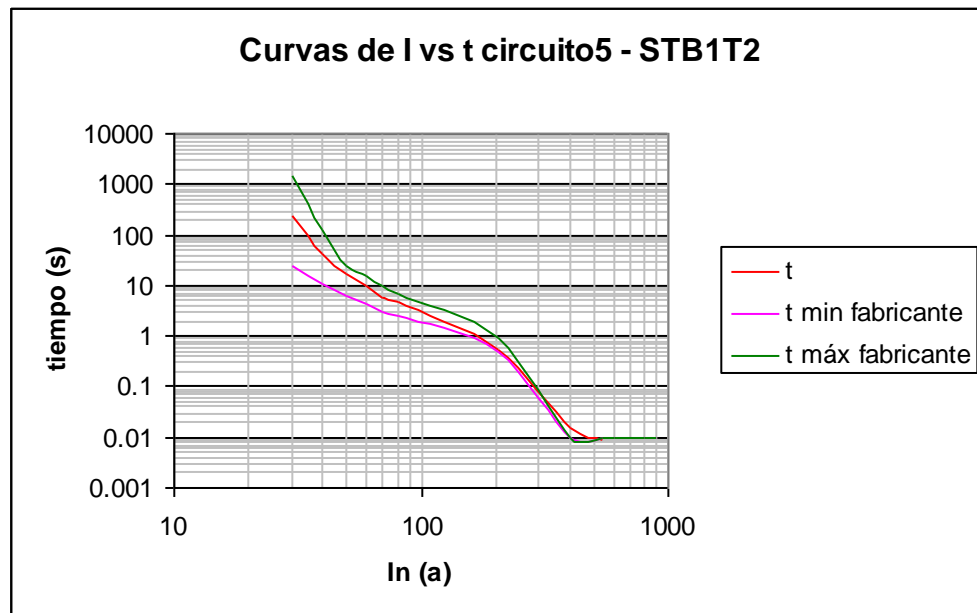
Figura 5.3. Fuente : Ensayos realizados por los autores

En base a las curvas resultantes y los tiempos medidos se observó que los interruptores conservan las características de respuesta tiempo-corriente que el fabricante especifica en sus catálogos. Es posible notar que las curvas en la zona de disparo de la unidad térmica están ligeramente por debajo de la curva del fabricante. Este comportamiento presupone en un primer momento que la unidad está precalentada o refleja un pequeño deterioro por el tiempo de uso. Pero, si se toma en consideración que para las mediciones se utilizaron dos instrumentos para obtener el total de las curvas, se asume que el cambio de instrumento afectó los resultados finales. Por ende, se hace la acotación de que al ser el osciloscopio digital un instrumento de mayor precisión que el cronómetro del inyector de corriente, el error cometido en la zona de disparo instantáneo es menor que en la zona térmica, por lo que se refleja en las gráficas como si del ITM disparara por debajo de su tiempo mínimo.

Tablero **STB1T2** (Tomacorrientes T.N.A.)

Tabla 5.1.4.- I vs t Circuito 5 - STB1T2. Fuente : Ensayos realizados por los autores

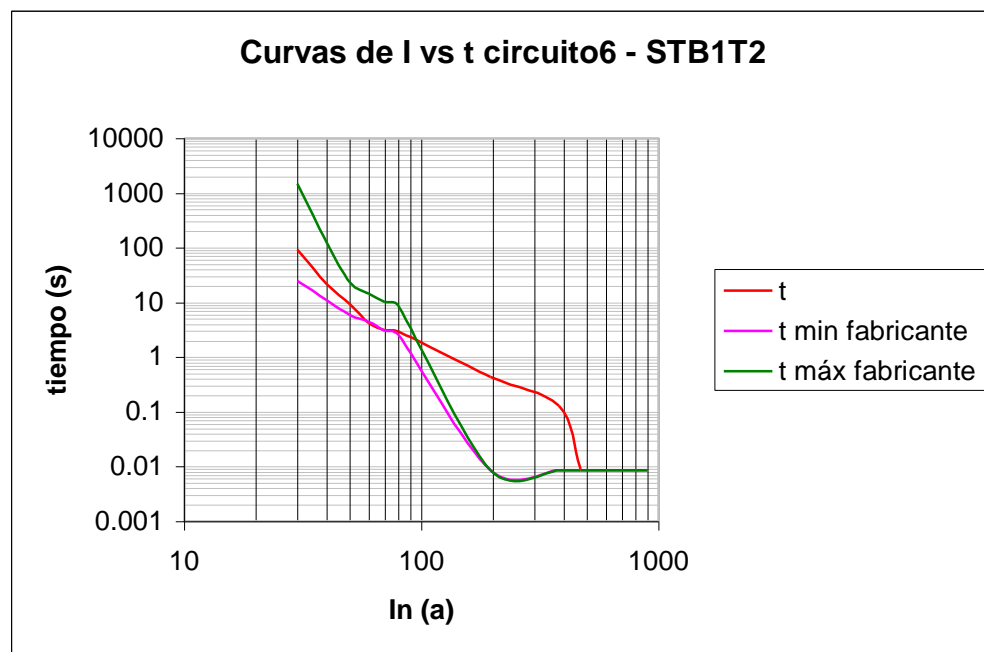
Medición	Múltiplo de I_n	I (A)	Tiempo (s)	Tiempo mín. Fabricante (s)	Tiempo máx. Fabricante (s)
1	1.5	30	242.66	25	1500
2	2	40	43.82	11	125
3	2.5	50	17.68	6	23.5
4	3	60	9.52	4.4	19
5	3.5	70	5.59	3	10.1
6	4	80	4.74	2.6	8.6
7	10.2	204	0.55	0.5	1
8	20	400	0.016	0.0098	0.39
9	27	540	0.009	0.0098	0.21



El interruptor conserva sus características de diseño, y se encuentra en buen estado de funcionamiento, lo que se evidencia en la gráfica anterior al encontrarse su curva dentro del rango de operación.

Tabla 5.1.5.- I vs t Circuito 6 - STB1T2. Fuente : Ensayos realizados por los autores

Medición	Múltiplo de In	I (A)	Tiempo (s)	Tiempo mín. Fabricante (s)	Tiempo máx. Fabricante (s)
1	1.5	30	242.66	25	1500
2	2	40	43.82	11	125
3	2.5	50	17.68	6	23.5
4	3	60	9.52	4.4	19
5	3.5	70	5.59	3	10.1
6	4	80	4.74	2.6	8.6
7	10.2	204	0.55	0.5	1
8	20	400	0.016	0.0098	0.39
9	27	540	0.009	0.0098	0.21

**Figura 5.5. Fuente : Ensayos realizados por los autores**

Este interruptor, al igual que los interruptores del tablero STB1T4.1, perdió sus características de respuesta tiempo-corriente producto del envejecimiento, considerándose, además, otras causas como la falta de mantenimiento en los tableros de la instalación.

De los interruptores ensayados, el interruptor del circuito 4 mostró durante las pruebas signos de deterioro físico, ya que uno de los tornillos que ajustan los cables se aisló y no se logró solventar el defecto, por lo que fue removido y su circuito se reubicó temporalmente al circuito de menor carga en el tablero, para no afectar el servicio que presta la sala de computación de la sección de Sistemas de Potencia.

En cuanto a las curvas levantadas, el ITM del circuito 5 conserva sus características de respuesta de t vs I , en tanto que en el ITM del circuito 6, los tiempos del instantáneo están desajustados por un rango bastante amplio con respecto a sus valores nominales, ubicándose por debajo de la curva, por lo que se recomienda su reemplazo.

Tablero **STB1T3** (Mezanina de la sección de Sistemas de Potencia)

Tabla 5.1.6.- I vs t Circuito 1 – STB1T3. Fuente : Ensayos realizados por los autores

Medición	Múltiplo de I_n	I (A)	Tiempo (s)
1	1.5	30	52.61
2	2	40	17.22
3	2.5	50	5.89
4	3	60	4.34
5	3.5	70	3.31
6	4	80	2.34
7	10.6	212	0.4
8	20	400	0.096
9	38	760	0.032
10	45	900	0.023
11	47	940	0.02
12	60	1200	0.014

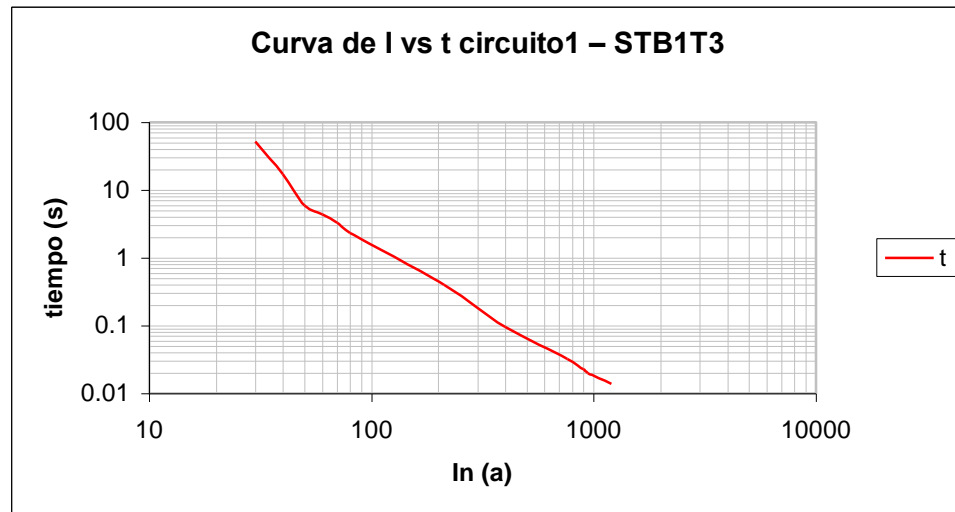


Figura 5.6. Fuente : Ensayos realizados por los autores

Tabla 5.1.7.- I vs t Circuito 3 – STB1T3. Fuente : Ensayos realizados por los autores

Medición	Múltiplo de I_n	I (A)	Tiempo (s)
1	1.5	30	140.61
2	2	40	27.39
3	2.5	50	11.11
4	3	60	7.88
5	3.5	70	5.92
6	4	80	3.87
7	10	200	0.64
8	20	400	0.146
9	38	760	0.04
10	46	920	0.028
11	56	1120	0.016

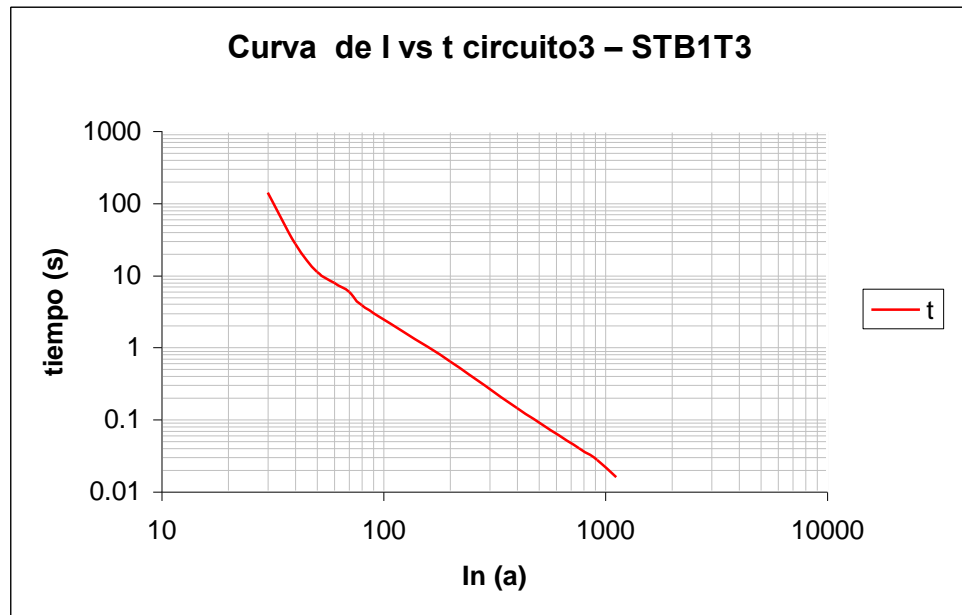


Figura 5.7. Fuente : Ensayos realizados por los autores

En el caso de estos dos interruptores no se trabajó junto con las curvas del fabricante porque este tablero, según la última auditoría técnica realizada en las instalaciones del edificio (ver “Auditoría Técnica del Sistema Eléctrico de Potencia del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica de la Universidad Simón Bolívar”, trabajo de pasantía) y la recomendación hecha a la institución, debe ser removido de su ubicación actual y sustituido por un tablero de tipo NLAB de servicio a cuatro hilos para 12 circuitos como mínimo, por lo tanto estas gráficas se utilizarán solo para el análisis de las coordinaciones eléctricas de la sección de potencia, correspondiente a la siguiente fase de este rediseño.

Tablero STB1I1 (Subtablero de iluminación)

Tabla 5.1.8.- I vs t Circuito 14 – STB1I1. Fuente : Ensayos realizados por los autores

Medición	Múltiplo de In	I (A)	Tiempo (s)	Tiempo mín.	Tiempo máx.

				Fabricante (s)	Fabricante (s)
1	1.5	30	218.13	150	1500
2	2	40	35.64	24	100
3	2.5	50	32.29	12	36
4	3	60	28.68	7	19
5	3.5	70	14.28	5	13
6	4	80	7.96	3.4	9.5
7	4.75	95	5.09	2.3	6
8	5.15	103	3.92	2.2	5.7
9	11.2	224	1.36	0.03	0.03
10	20	400	0.39	0.019	0.019
11	36	720	0.13	0.019	0.019
12	56	1120	0.076	0.019	0.019
13	68	1360	0.064	0.018	0.018
14	76	1520	0.051	0.0175	0.0175

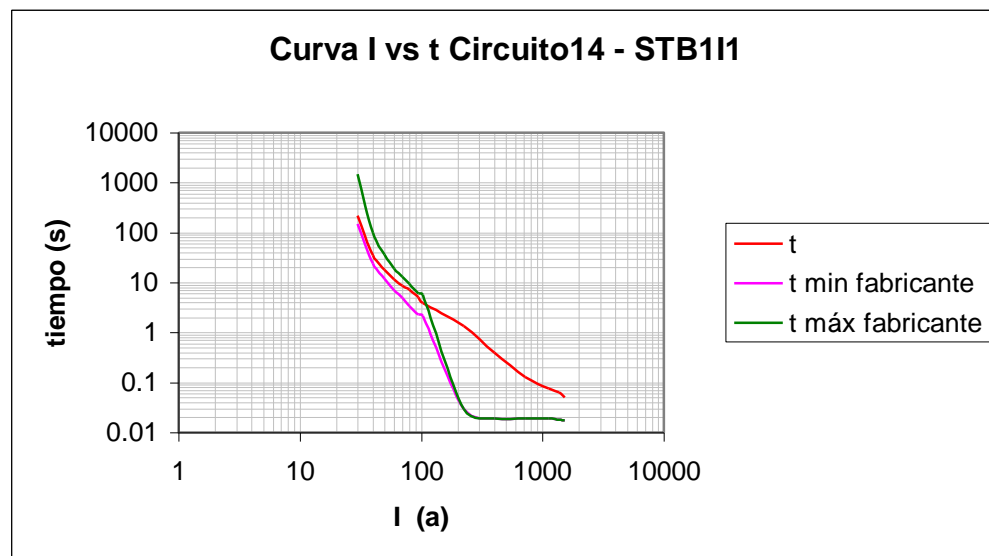


Figura 5.8. Fuente : Ensayos realizados por los autores

El interruptor ha perdido sus características de disparo instantáneo, la unidad térmica, además falló su aislamiento a una corriente de 1520A por lo que fue removido del tablero y su circuito pasado temporalmente a otro interruptor.

Tabla 5.1.9.- I vs t Circuito 18 – STB1I1. Fuente : Ensayos realizados por los autores

Medición	Múltiplo de In	I (A)	Tiempo (s)	Tiempo mín. Fabricante (s)	Tiempo máx. Fabricante (s)
1	1.5	30	114.99	150	1500
2	2	40	41.28	24	100
3	2.5	50	21.08	12	36
4	3	60	14.78	7	19
5	3.5	70	9.26	5	13
6	4	80	5.97	3.4	9.5
7	4.5	90	4.4	2.7	8
8	5.15	103	2.84	2	5.3
9	8.8	176	2.16	0.6	1.8
10	16	320	0.56	0.02	0.02
11	29	580	0.2	0.019	0.019
12	39	780	0.108	0.019	0.019
13	48	960	0.053	0.019	0.019
14	60	1200	0.028	0.019	0.019
15	72	1440	0.036	0.018	0.018
16	80	1600	0.06	0.017	0.017
17	98	1960	0.024	0.0165	0.0165

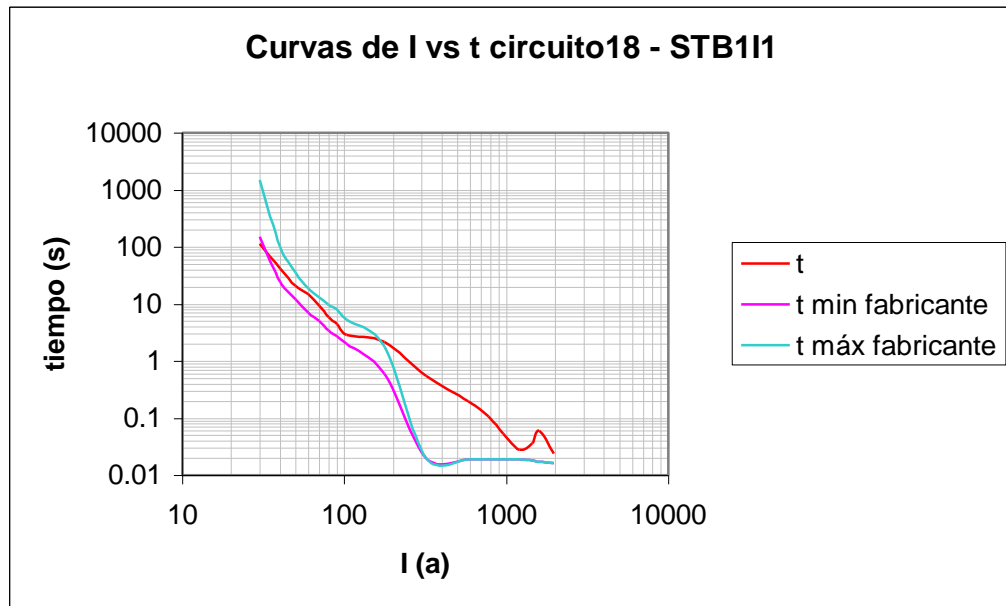


Figura 5.9. Fuente : Ensayos realizados por los autores

El interruptor está fuera de la curva de diseño en la zona de disparo instantáneo, la zona térmica se encuentra en el rango de operación normal.

Tablero **STB2** (Analizador transitorio de redes T.N.A.)

Tabla 5.1.10.- I vs t Circuito 18 – STB2. Fuente : Ensayos realizados por los autores

Medición	Múltiplo de I_n	I (A)	Tiempo (s)	Tiempo mín. Fabricante (s)	Tiempo máx. Fabricante (s)
1	2.08	62.5	71	10	90
2	2.3	70	50.1	5.1	40
3	2.67	80	33.2	4.1	34
4	3	90	24.8	3.1	27
5	3.47	104	17	2.2	15.7
6	7.73	232	2.8	0.0086	0.0086
7	14.67	440	0.66	0.0085	0.0085
8	26.67	800	0.22	0.0085	0.0085
9	34	1020	0.112	0.0085	0.0085
10	45	1360	0.027	0.0085	0.0085
11	46.67	1400	0.012	0.0085	0.0085

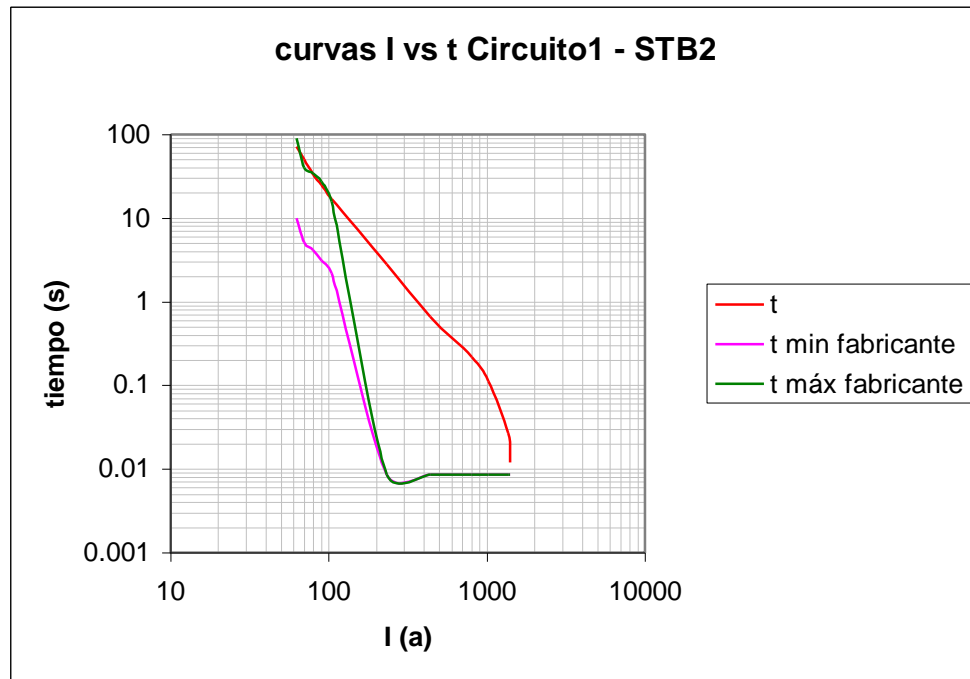


Figura 5.10. Fuente : Ensayos realizados por los autores

El ITM del circuito 1 del tablero STB2 tiene una curva totalmente fuera de las de su diseño.

- **Fase de análisis del sistema actual de protecciones eléctricas:**

Como se ha mencionado en el Marco Teórico, un sistema de protecciones eléctricas tiene que cumplir con los cuatro criterios de una adecuada protección que son selectividad, confiabilidad, rapidez y seguridad. Con el levantamiento de curvas de respuesta tiempo-corriente que se realizaron, se detectó que el sistema de protecciones instalado en el laboratorio, basado únicamente en interruptores termomagnéticos de caja moldeada (ITM), no es seguro. Se sustenta esta aseveración en el hecho de que haya fallado un interruptor cuando se le inyectó una corriente de prueba en el orden de los 1500 amperios. Otro falló por deterioro físico de sus componentes y además, en la mayoría de los interruptores, no hay disparo instantáneo. En cuanto a la confiabilidad, al no realizársele los ensayos a todos los interruptores, no es posible afirmar que esté presente cuando ocurra una falla con un máximo nivel de cortocircuito, permitiendo

que las protecciones actúen debidamente.

Se puede afirmar que el sistema de protecciones no es rápido para despejar fallas severas que ocurran dentro de los circuitos pertenecientes a la sección de Sistemas de Potencia, en vista de que los interruptores no están actuando en el tiempo correspondiente a sus características y, como se destacó en líneas precedentes, no puede asegurarse su intervención ya que la confiabilidad evaluada es deficiente.

Sólo falta corroborar si el último criterio se cumple y tiene que ver con la selectividad del sistema ante la ocurrencia de una falla y se define como la capacidad que presenta el sistema para despejar una falla con el mínimo de operaciones posibles, de tal manera que si una falla se presenta en un tramo de la instalación, únicamente actué la protección destinada a proteger ese tramo y no otra en el tramo inmediatamente superior.

Para verificar tal criterio se graficaron las curvas de protección de los ITM con el fin de confirmar si la coordinación entre tiempos de los interruptores se encontraba en los rangos adecuados, de manera que por un lado les permitiese actuar en su tramo de protección con un tiempo de retardo entre interruptores, que asegurase la selectividad sin que se incurriera en daños a las instalaciones por tiempos prolongados de espera de los interruptores de respaldo.

Para facilitar el análisis del sistema de protecciones de la sección de Sistemas de Potencia se dividieron las instalaciones por tramos, desde el interruptor principal del edificio hasta el tablero del cual se seleccionaron los ITM a los que le fueron levantadas las curvas. De este procedimiento se originaron cuatro casos en total, donde se encuentran conectadas las cargas significativas de la sección de Sistemas de Potencia.

A continuación se presentan los casos con las curvas de interruptores y su respectivo análisis de coordinación de protecciones, para luego llegar a la fase de diseño donde se realizaron las propuestas que requiere el sistema para lograr que sea seguro, confiable, rápido y selectivo.

Caso 1: Coordinación de protecciones actual del tablero STB1T4.1 (PB

Sistemas de Potencia).

El diagrama y las curvas siguientes (todas referidas al lado de baja del transformador), representan el tramo de alimentación del tablero STB1T4.1 cuya carga está representada por tomacorrientes generales (ver diagrama unifilar caso 1). Los interruptores están dispuestos en el diagrama esquemático en forma radial, sin incluir los demás ramales del sistema, para facilitar la comprensión de los casos presentados, como se ha mencionado antes.

Para que exista coordinación entre interruptores y en general de un buen sistema de protecciones en baja tensión, el tiempo de retardo entre la protección del tramo de instalación y su respaldo (interruptor que lo antecede), debe estar entre 0,3 y 0,5 segundos. Antes de ese tiempo se puede perder la selectividad de la protección y después de ese tiempo se pueden presentar daños irreversibles en las instalaciones por lo que el ajuste entre curvas debe ser lo más preciso posible, a fines de evitar los males antes mencionados.

Todos los comentarios que siguen a continuación están referidos a las curvas de los interruptores del caso 1 y el diagrama unifilar del caso:

- Las primeras dos curvas representan t y C1, que son la curva real del interruptor y la curva de diseño. Como era de esperarse, el interruptor tiene un retardo excesivo en las corrientes de cortocircuito lo suficientemente grande como para darle tiempo al interruptor principal del tablero para actuar (curva C2), por lo tanto quedaría fuera de servicio todo el tablero, perdiéndose la selectividad. Por otra parte, como el interruptor C3 es el que le sigue a este en orden ascendente y es de las mismas características, los dos actuarían al mismo tiempo, lo que conlleva a que también quede sin energía la carga conectada al otro interruptor.
- C3 coordina con el interruptor que le antecede C4, pero los tiempos de retardo son sensiblemente mayores a 0,5 segundos por lo que la coordinación es aceptable pero no es la ideal.
- C4 y C5 coordinan. En este caso C4 es la protección principal del transformador de tomas generales y C5 es la protección principal del Panel Master, por lo que la

coordinación en este punto es de vital importancia para la instalación y, como puede observarse, los interruptores coordinan adecuadamente (en la gráfica del caso 2 se puede apreciar mejor la coordinación entre estas dos curvas).

- El interruptor principal no coordina con los demás interruptores. Es posible observar que el tiempo de retardo que existe entre C5 y C6 sería muy perjudicial si C5 fallara a la hora de despejar una falla, por lo tanto tampoco coordinan adecuadamente el Panel Master y el interruptor principal.

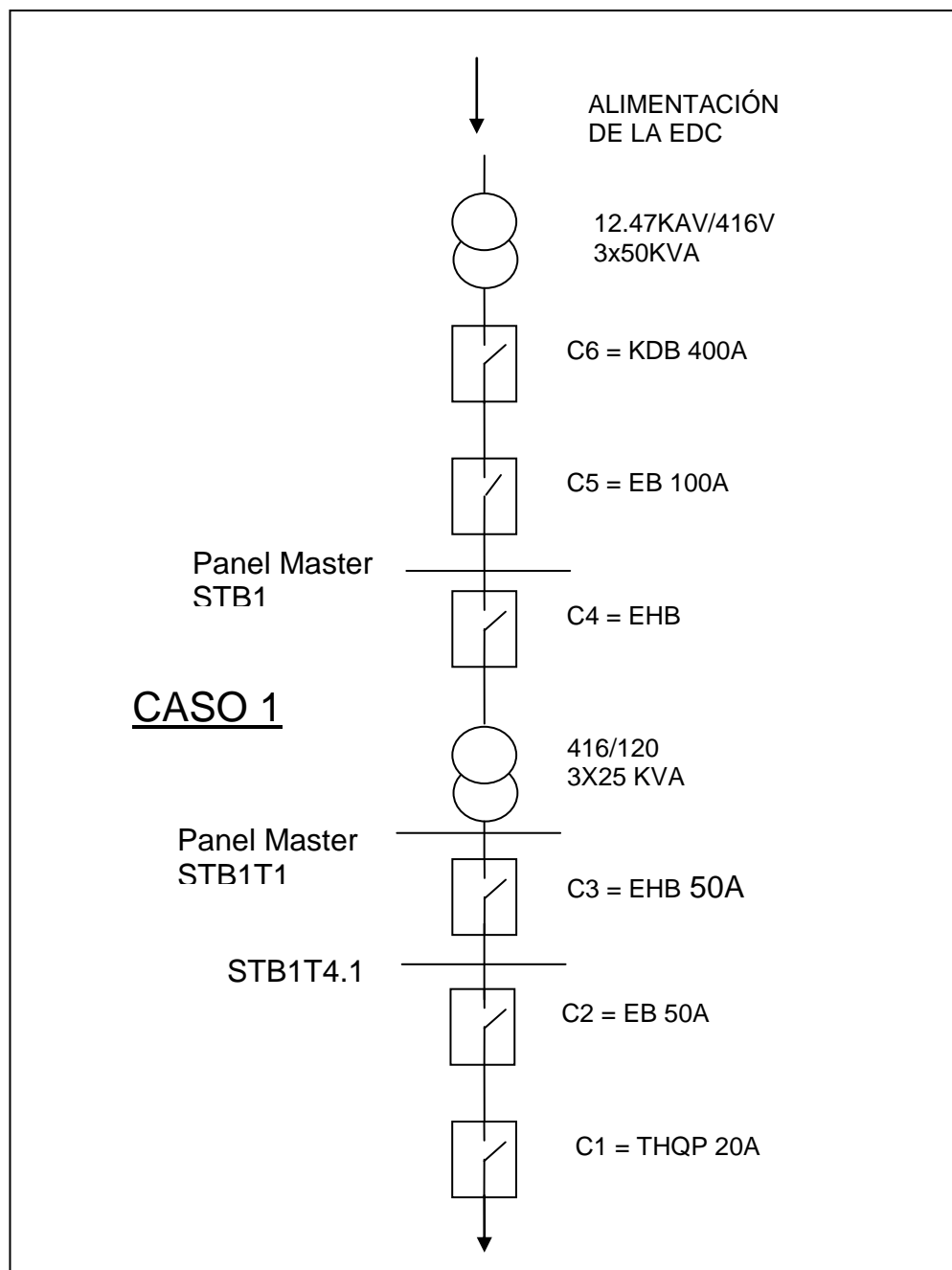


Figura 5.11. Fuente: Los autores.

Caso 2: Coordinación de protecciones actual de los tableros STB1T2 y STB1T3 (tomas generales del TNA y Mezanina de la sección de Sistemas de Potencia)

Como ambos tableros se encuentran alimentados de un mismo interruptor en el panel master, se analizarán las coordinaciones actuales en un mismo caso. (Ver diagrama unifilar y curvas del caso 2)

Se procede entonces al análisis del Caso 2:

- Las primeras curvas corresponden a los interruptores de los tableros STB1T2 y STB1T3. Como son dos ramales de un circuito troncal, no existe coordinación entre ellos, estos se coordinan con los interruptores THQC 3040, que son los interruptores principales de tales tableros, y como son de iguales características tienen la misma curva de respuesta. Es evidente que el tiempo de retardo entre los C1 Y C2 y sus interruptores principales C3 y C4, no es suficiente para garantizar la selectividad, ya que para el caso de C1 prácticamente los tiempos de apertura instantánea son los mismos que para C3. Con la curva de C2 en STB1T3 es más amplia la falta de coordinación, porque el retardo del interruptor es tan largo que prácticamente se hace imposible coordinarlo en tiempo o corriente con el interruptor termomagnético C4 del tablero.
- La coordinación entre las curvas C3 y C4 no es la más adecuada para los tiempos de zona térmica, por lo tanto, aunque coordinen para disparo instantáneo, el retardo entre las curvas no asegura selectividad del sistema, como es el caso de la coordinación entre las curvas C6 y C7, comentadas en el caso anterior.
- La coordinación entre las curvas C6, C7 y C8, ha sido analizada en el caso anterior.

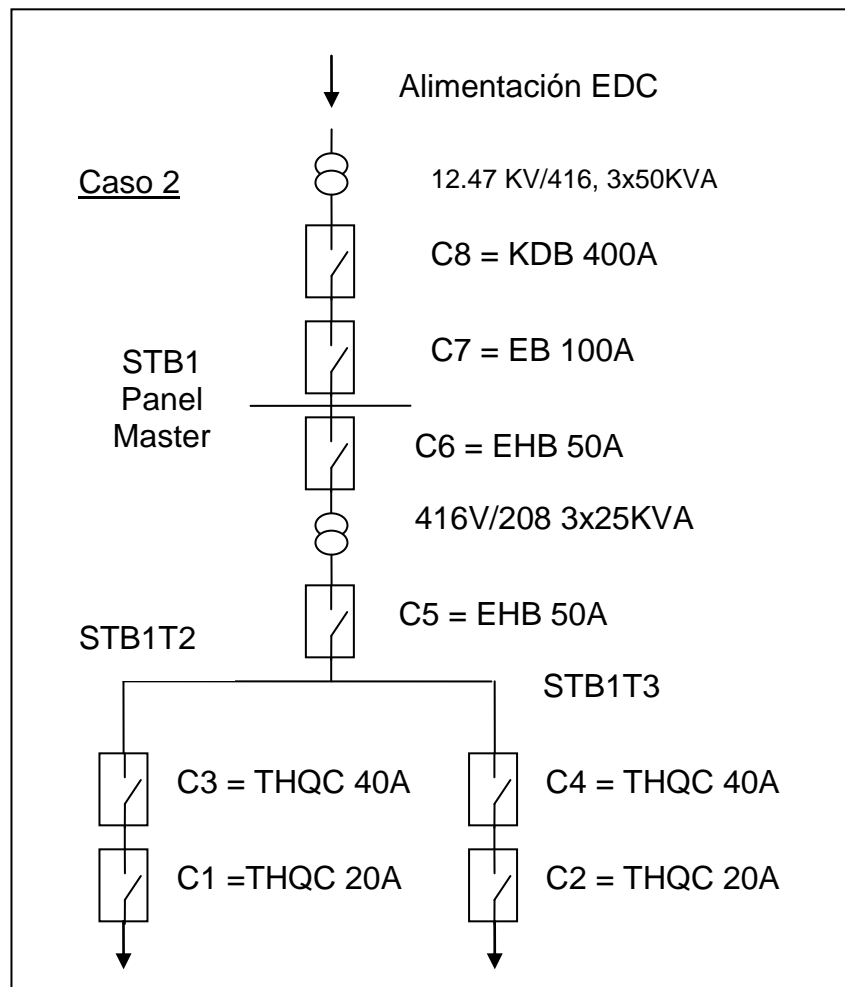
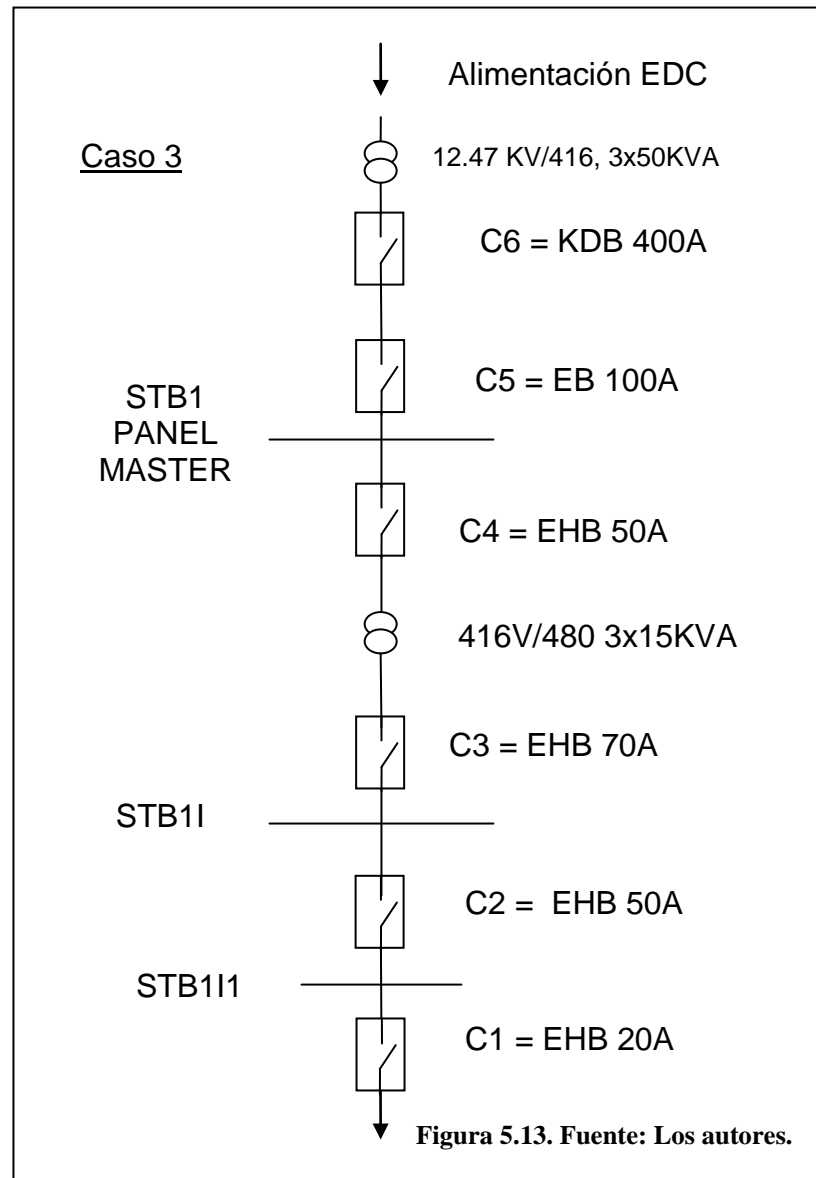


Figura 5.12. Fuente: Los autores.

Caso 3: Coordinación de protecciones actual del tablero STB1I1 (ubicado en el laboratorio de máquinas eléctricas).

Este caso contempla la verificación de las protecciones en las instalaciones eléctricas de iluminación, como se ha dicho anteriormente.

A continuación se muestran el diagrama unifilar y las curvas de los interruptores seguidas del análisis de coordinaciones:



- Como el interruptor del circuito 14 falló en el levantamiento de la curva de tiempo, siendo removido del tablero y su circuito cambiado temporalmente a otro, el análisis de coordinación se realizó con el interruptor del circuito 18, el cual presentó una característica que se manifestó en casi todos los interruptores a los que se les hizo el levantamiento de las curvas de tiempo: su unidad de tiempo instantáneo no

disparaba, por lo que la unidad térmica, con un tiempo de respuesta mucho menor, realizaba la apertura del interruptor. Como resultado, y esto se ha venido repitiendo en todos los casos anteriores, la actuación es muy tardía para niveles de corrientes elevadas, por lo que da tiempo más que suficiente para que los ITM que lo anteceden actúen y despejen la falla antes que él, perdiéndose la selectividad. C1 en la gráfica muestra dos curvas: la curva que debería tener el interruptor por diseño y la curva levantada, que en la gráfica se muestra con un tiempo de respuesta muy alto en los valores de corriente mayores a 1100 amp. Esto implica que prácticamente todos los interruptores que lo anteceden, salvo el principal, despejarían la falla antes que él, por lo que no existe coordinación selectiva del tramo.

- La curva C2 no coordina tampoco con C3 que la antecede, ya que ambas curvas se superponen en la zona de disparo de la unidad térmica.
- La curva C4 y C5 si coordinan correctamente. Esta condición es sumamente importante que se cumpla, por ser éstos los interruptores más relevantes dentro del Panel Master, ya mencionado anteriormente, y por supuesto el interruptor principal C6, del cual ya se hablo en el Caso 1.

Caso 4: Coordinación de protecciones actual del tablero STB2:

El Caso cuatro es el circuito principal del laboratorio de Análisis Transitorio de Redes (T.N.A.), de la sección de Sistemas de Potencia del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica. El T.N.A. es un laboratorio cuya construcción es posterior a la del edificio, por esta razón su alimentación es independiente del Panel Master y su interruptor principal se encuentra dentro de un módulo del tablero de máquinas eléctricas. El diagrama unifilar de este tablero es muy simple y se presenta a continuación, en conjunto con las curvas de protección del circuito:

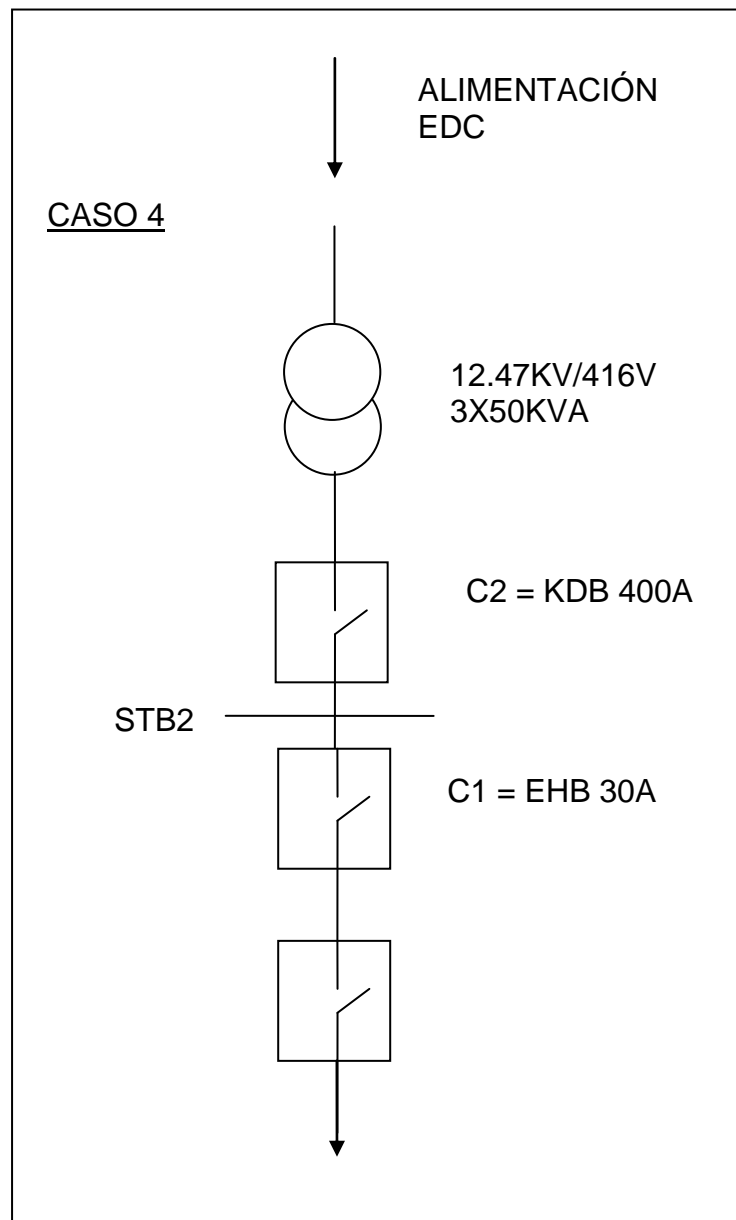


Figura 5.14. Fuente: Los autores.

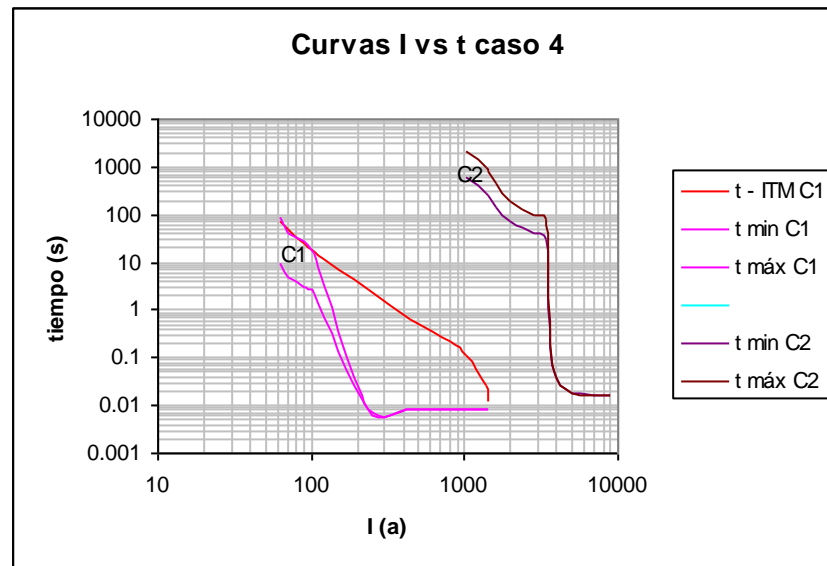


Figura 5.15. Fuente: Los autores.

Como se observa en la gráfica, la curva del interruptor está fuera de sus características de diseño. Otra observación importante que hacer al respecto, es que el interruptor principal C2, siendo respaldo de C1, presenta su curva muy separada, de manera que si el interruptor C1 fallara, los tiempos de disparo del principal están tan distantes que la instalación eléctrica estaría en riesgo de sufrir daños irreversibles. Por lo tanto, por ser los tiempos de retardo del sistema valores prohibitivos para la protección de las instalaciones eléctricas, entre ambas curvas no existe una adecuada coordinación de protecciones.

- **Fase de rediseño:**

El objetivo de esta fase es el de proponer un rediseño del sistema de protecciones eléctricas para la sección de Sistemas de Potencia, de manera que cumpla con los cuatro criterios de coordinación de protecciones eléctricas, a fines de llevar el sistema actual a una condición de operación más segura para las instalaciones eléctricas, el personal y estudiantes de las diferentes carreras que laboran en el lugar.

Por las características de los equipos de protección, basados en interruptores

termomagnéticos, la coordinación de protecciones se hará por corriente y no por tiempo, ya que es el tipo de coordinación posible en estos casos.

Con el fin de facilitar la comprensión de las recomendaciones y las modificaciones, cambios de interruptores, etc., que se plantean en el rediseño para llevar el sistema actual a uno selectivo, confiable, rápido y seguro, se utilizará el esquema anterior de casos, incluyendo en ellos las modificaciones pertinentes y las curvas de diseño mostrando las coordinaciones finales.

Toda la coordinación del Sistema de Protección se realizó con curvas de interruptores de la empresa Cutler-Hammer, fabricante de los interruptores de la marca Westinghouse. Las curvas de los interruptores seleccionados para la coordinación se encuentran en el anexo A-4.

Antes de comenzar a describir el sistema propuesto se tienen que hacer las aclaratorias, siguientes:

- Basados en los resultados de los levantamientos de curvas, se llegó a la obligación de recomendar a la institución la verificación de las curvas de todos los interruptores de la sección de Sistemas de Potencia, debido a la gran cantidad de interruptores con curvas de respuesta alejadas de sus características de diseño y más aún, se recomienda reemplazar todos los interruptores que daten de la época de construcción de edificio.
- Las coordinaciones propuestas están basadas en el supuesto de que los interruptores principales de cada tablero y el Panel Master se encuentran en su rango de diseño, esto es necesario decirlo en vista de que sus curvas no fueron levantadas.
- De todas maneras, de comprobarse que los interruptores actúan fuera del rango de tiempo del fabricante, el cambio de interruptores debe corresponder con los señalados a continuación para que la coordinación esté acorde a lo calculado en el rediseño.

Las curvas de coordinación de los rediseños propuestos en cada uno de los casos en estudio se muestran en el anexo A-5, en conjunto con diagramas unifilares de la instalación.

- **Rediseño para el Caso 1:**

Para lograr una adecuada coordinación por corriente, se propone la implementación de los siguientes interruptores, para el caso en cuestión:

- Para el tablero STB1T4.1:
 - Para la protección de los circuitos del tablero STB1T4.1 (curvas C1 en el diagrama unifilar Caso 1) se propone la implementación de interruptores termomagnéticos de caja moldeada Quicklag 1020, 1 polo, tipo HQP 20A, 120/240 Voltios, capacidad interrupción de corriente simétrica 10KA, 40°C, spacial low-magnetic.
 - Para el interruptor principal del tablero se propone la implementación de un interruptor temo magnéticos de caja moldeada, Quicklag 3050, 1 polo, tipo: HQP 50A, 120/240 Voltios, capacidad interrupción de corriente simétrica 10KA, 40°C, (curva C2 en el diagrama unifilar Caso 1).
 - Se propone colocar para el tablero STB1T1 un interruptor termomagnético de caja moldeada, Marck 75, 3 polos, 3050 tipo: EHB 480V, 50A, capacidad interrupción de corriente simétrica 14KA, 40°C (curva C3 en el diagrama unifilar Caso1).
 - Como interruptor principal de Tomas Generales en STB1 se recomienda la implementación de un interruptor de caja moldeada, Marck 75, 3 polos, 3050 tipo: EHB 480V, 50A, capacidad interrupción de corriente simétrica 14KA, 40°C (curva C4 en el diagrama unifilar Caso 1), este interruptor es el mismo para el Caso 2, ya que se comparte para ambos ramales.
 - Como interruptor principal del tablero STB1 se sugiere la instalación de un interruptor de caja moldeada, AB DE-ION 3100, 3 polos, tipo: GHB 480V, 100A, capacidad interrupción de corriente simétrica 22KA, 40°C (curva C5 en el diagrama unifilar Caso 1), este interruptor es el mismo

para los Casos 2 y 3 ya que se comparte para ambos ramales.

- El interruptor principal del edificio, será el actual, sólo se recomienda corroborar las curvas de respuesta del interruptor con el fin de verificar si se ajustan a las del fabricante.

- **Rediseño para el Caso 2:**

Para lograr una adecuada coordinación de protecciones entre los tableros STB1T2, STB1T3 y el panel master, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Tableros STB1T2 y STB1T3:

- Para la protección de los circuitos de los tableros STB1T2 y STB1T3, (curva C1 y C2 en el diagrama unifilar del Caso 2) se propone la implementación de interruptores termomagnéticos de caja moldeada Quicklag 1020, 1 polo, tipo HQP 20A,120/240 Voltios, capacidad interrupción de corriente simétrica 10KA, 40°C, spacial low-magnetic.
- Para el interruptor principal de los tableros STB1T2 y STB1T3, se propone la implementación de interruptores termomagnéticos de caja moldeada, Quicklag 3040, 3 polos, tipo: HQP 40A, 120/240 Voltios, capacidad interrupción de corriente simétrica 10KA, 40°C, (curvas C3 y C4 en el diagrama unifilar Caso 2).
- Se propone colocar como protección del circuito de acometida principal de alimentación de los tableros STB1T2 y STB1T3, en STB1T un interruptor termomagnéticos de caja moldeada, Marck 75, 3050, 3 polos, 50A, tipo: EB 240V, capacidad interrupción de corriente simétrica 14KA, 40°C (curva C5 en el diagrama unifilar Caso 2).
- Los interruptores restantes (curvas C6, C7 y C8) del diagrama unifilar del caso 2, son los interruptores C4, C5 y C6 del caso 1, por lo que las especificaciones de estos interruptores se encuentran reseñadas en dicho caso (Ver rediseño del caso 1 y el diagrama unifilar del sistema de potencia modificado en el anexo A-11, P2).

- **Rediseño para el Caso 3:**

Para lograr una adecuada coordinación de protecciones en los tableros de iluminación estudiados, se debe tomar la implementación de los siguientes interruptores:

- Para el tablero STB1I1:
 - Para la protección de los circuitos del tablero (curva C1 en el diagrama unifilar del Caso 3) se propone la implementación de interruptores termomagnéticos de caja moldeada Marck 1020, tipo EHB 20A, 277 Voltios, capacidad interrupción de corriente simétrica 14KA, 40°C.
 - Para el interruptor principal del tablero se propone la implementación de un interruptor termomagnético de caja moldeada, Marck 75, 3 polos, 3050, tipo: EHB 50A, 480V, capacidad interrupción de corriente simétrica 10KA, 40°C, (curva C2 en el diagrama unifilar Caso 3).
 - Se propone colocar como elemento de protección para la acometida principal del tablero STB1I1, en el tablero STB1I un interruptor termomagnéticos de caja moldeada, Marck 75, 3 polos, 3050 tipo: EHB 480V, capacidad interrupción de corriente simétrica 14KA, 40°C (curva C3 en el diagrama unifilar del Caso 3), esto obedece a que por las características de la instalación ambos interruptores C4 y C5 protegen el mismo tramo de la instalación.
 - Como interruptor principal de iluminación a la entrada del STB1I, se plantea la implementación de un interruptor de caja moldeada, AB DE-ION 3070 tipo: GHB 480V, capacidad interrupción de corriente simétrica de interrupción 22KA, 40°C (curva C4 en el diagrama unifilar Caso 3).
 - Como interruptor principal de iluminación en el tablero STB1 se sugiere la instalación de un interruptor de caja moldeada, AB DE-ION 3080 tipo: GHB 480V, capacidad interrupción de corriente simétrica 22KA,

40°C (curva C5 en el diagrama unifilar Caso 3).

- Los interruptores restantes (curvas C6 y C7) del diagrama unifilar son los mismos del caso 1, por lo que las especificaciones de estos interruptores se encuentra reseñada en dicho caso (Ver rediseño del caso 1 y el diagrama unifilar del sistema de potencia en el anexo A-11, P2).

- **Rediseño para el Caso 4:**

Para lograr una adecuada coordinación de protecciones en este tramo del circuito el tablero STB2:

- Para el tablero STB2:

- Para la protección de los circuitos del tablero (curva C1 y C2 del diagrama unifilar Caso 4), se recomienda cambiar el interruptor, Marck 75, 3030, 3 polos tipo: EHB 277V, 30 A, capacidad interrupción de corriente simétrica 14KA, 40°C, por uno de iguales características, ya que en el levantamiento de las curvas del interruptor se evidenció que este perdió la capacidad de realizar su apertura en los tiempos establecidos por el fabricante. De igual manera se recomienda a la institución, realizar el levantamiento de las curvas del interruptor C2 del caso cuatro para verificar que esté operando en los tiempos de respuesta correctos. Las características de este interruptor son las siguientes, Marck 75, 3050, 3 polos, tipo: EHB, 480V, 50A, capacidad de corriente de interrupción simétrica 10KA, 40°C.

2.- Rediseño del sistema de alumbrado del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica.

- **Fase de medición.**

Esta fase consiste en la recolección de datos de campo para sustentar la necesidad de realizar un rediseño que adecue el sistema de alumbrado a las necesidades

reales del laboratorio. Se busca comprobar, a partir de los datos obtenidos, el nivel de iluminación existente en cada una de las áreas evaluadas y establecer si cumple con los niveles estándares establecidos según las actividades que en ellas se realizan.

Actualmente, el sistema de iluminación del laboratorio cuenta con dos tipos de luminarias, definidas según el área de uso. Las luminarias establecidas para oficinas y para locales menores a 3.5 m de altura corresponden al sistema convencional CADA de 4x40W, y las empleadas en áreas de mayor altitud pertenecen al mismo tipo en la versión de 2x75W. Se cuenta con un total de 119 luminarias de 4x40W y 96 luminarias de 2x75W, de las cuales sólo se consideran, a efectos del rediseño, 66 luminarias.

Se utilizaron como muestra para los ensayos las áreas de mayor uso y aquellas que difieren en aplicación con respecto a la generalidad de las áreas. Para ello se definieron como áreas a evaluar los laboratorios de máquinas eléctricas tanto de la sede de Sartenejas como de la sede del Litoral, la sala de proyectos de investigación y el salón de entrada, todos definidos como exteriores por presentar una altura de 7.2m. Se consideraron, además, el laboratorio de Protecciones Eléctricas, el laboratorio de Análisis Transitorio de Redes (T.N.A.), la sala de computación perteneciente a la Sección de Sistemas de Potencia (sala sp-13), la sala de computación perteneciente al núcleo del Litoral (sala Litoral), la oficina destinada para la estadía de pasantes y tesistas y la oficina de la secretaría del Laboratorio, consideradas estas últimas como interiores.

Se define como áreas interiores las oficinas, salas de computación y laboratorios que no sobrepasan los 3.5m de altura; y como áreas exteriores aquellos locales cuya altura excede los 3.5m.

Para la adquisición de los datos correspondientes al nivel de iluminación o iluminancia de las áreas seleccionadas se siguió el método conocido como punto por punto, teoría que fue explicada en detalle en el Capítulo II (Marco Teórico), utilizando para la adquisición de datos dos luxómetros analógicos clase 0.5, calibrados debidamente.

Para la realización de los ensayos se tomaron en consideración los siguientes parámetros:

- Plano de trabajo a una altura de 0.8m para todas las áreas.
- Para la determinación de la contribución de la luz del día en el nivel de iluminación del laboratorio se tomaron como condiciones ambientales las correspondientes a un día soleado y tomando como hora para la recolección de datos 12:00 Pm.
- Para la determinación de la contribución de la iluminancia de las lámparas se realizaron ensayos en horas nocturnas.
- Se tomó como área para la realización de la retícula de medición 1m² para interiores y 2.25m² para exteriores, variando el tamaño de la retícula con el área del local en estudio.

De los datos obtenidos se realizaron tres tablas por área: nivel de iluminación debido a la luz del día, nivel de iluminación debido a las luminarias y nivel de iluminación máximo (producto de la suma de los niveles de iluminación individuales). En base a estos resultados se levantaron las curvas isolux con la ayuda del programa de cálculo MATLAB, considerando para ello todas las iluminancias registradas por área.

El análisis de las curvas obtenidas confirma que, en el área definida como exteriores, el nivel de iluminación proporcionado por las luminarias existentes es inferior a los 300 lux y su distribución no es uniforme, lo que permite aseverar que no es la condición más adecuada para el desempeño de actividades dentro de un laboratorio, estimando como óptimos aquellos valores cercanos al límite de los 500 lux. La iluminancia de la luz del día permite, en cambio, disponer de un ambiente de trabajo que no requiere luz artificial, siempre y cuando se cumpla la condición de cielo despejado.

De igual manera, se obtuvo que para el área destinada a salas de computación, el nivel de iluminación se encontraba por debajo de los 300 lux, siendo el mínimo requerido para áreas de esta categoría un nivel de 750 lux, por realizarse en ellas actividades asociadas al uso del computador y al uso de programas de diseño que

requieren un nivel de iluminación mayor. Estas áreas no cuentan con iluminación natural, por lo que el uso de la iluminación artificial es permanente

En las áreas definidas como oficinas se presentó un nivel inferior a los 300 lux, siendo, de igual forma, un nivel insatisfactorio.

Para los laboratorios de protecciones y T.N.A. el nivel de iluminación proporcionado por las luminarias es favorable, más la iluminancia natural es deficiente, circunstancia que obliga al uso permanente del alumbrado.

El análisis realizado refleja la necesidad de optar por una alternativa de iluminación que permita obtener niveles de iluminación acordes con el lugar de trabajo y que permitan a su vez introducir nueva tecnología, con el objeto de reducir el consumo de energía por concepto de iluminación.

En el anexo A-6 se muestran las curvas obtenidas por área evaluada, presentándose la curva correspondiente a la iluminancia debido a la luz del día, la iluminancia debido a las luminarias y la iluminancia en conjunto, añadiéndose las matrices resultantes de las mediciones..

Partiendo del análisis realizado se procede, entonces, al rediseño.

▪ **Fase de rediseño.**

Para el rediseño se empleó como herramienta el programa de cálculo luminotécnico Litestar 3.22 de la compañía **Troll Lighting**, actualizado con las últimas versiones de luminarias y lámparas existentes en el mercado, tanto de la compañía como de otras empresas del ramo.

Se utilizaron los siguientes criterios para el diseño:

- Disminución del consumo de potencia por grupo de luminarias.
- Niveles de iluminación predeterminados en 500 lux para los laboratorios en general, 750 lux para oficinas y salas de computación, 200 lux para pasillos y áreas de circulación.

- En el caso de los laboratorios de Protecciones Eléctricas y T.N.A. se predetermina la iluminancia en 650 lux, con el objeto de mantener las condiciones actuales de iluminación, contando para ello con un grupo de luminarias menor al existente.
- Plano de trabajo definido a 0,8m.
- Modelación del mobiliario de cada local, estableciendo dimensiones reales y colores aproximados.
- Utilización de luminarias de última tecnología, con lámparas ahorradoras de energía y balastos electrónicos en el caso de los fluorescentes.
- Simulación del nivel de iluminación de los locales utilizados para los ensayos luminotécnicos, utilizando para ello la luminaria propuesta. Se toman éstas áreas para la simulación con el objeto de obtener un diseño específico para los locales que difieren de los demás tanto en uso como en estructura y un diseño standard para las oficinas y el resto de las áreas definidas.

Se estableció para el diseño en interiores la luminaria tipo polivalente 731TC doble parábola dark brillo, de la línea Philips Fluorescent Compact (Ver anexo A-7), que cuenta con balastro electrónico y 3 lámparas TC- L de 36W. El diseño de la luminaria ha sido concebido especialmente para trabajos de oficina, disminuyendo en considerables proporciones el efecto de deslumbramiento, partiendo del sistema de difusión de espejo parabólico. Este modelo de luminaria es análogo al modelo TBS300 3x32W de la compañía Philips, con lámparas del tipo T – 8, enteramente comercial en el mercado venezolano.

Se toma como criterio para el resto de las oficinas dos luminarias por espacio, una luminaria para áreas destinadas a servicio público (baños, depósitos de pequeñas dimensiones, etc) y luminarias cada 3m en pasillos y áreas de circulación.

Para el diseño de exteriores se plantean tres propuestas que proporcionan la iluminancia requerida y representan una disminución significativa del consumo de potencia.

1era propuesta: Se estableció el uso de proyectores tipo Mastercolour CDM-R Hipar 30 de 70W, PAR30L10Ø 70W/830, de la línea Philips Metal Halide (Ver anexo A-7), proporcionando como nivel de iluminación máximo 515 lux y medio 387 lux a una altura de 7.2 m, reduciendo el consumo de energía por grupo de lámparas en 2.900W, con respecto a la configuración actual, utilizando para ello un arreglo de 10 filas y 10 columnas. Los resultados arrojados del cálculo, junto con las curvas isolux originadas por las luminarias, se presentan en el anexo A-8.

Se considera esta configuración como una propuesta debido a la uniformidad que proporciona en el nivel de iluminación, disminuyendo el consumo de potencia e igualando la cantidad de luminarias existentes actualmente, además de conservarse la altura original.

2da propuesta: Se estableció el uso de luminarias polivalentes del tipo industrial 10MGA/258 Muy Grandes Alturas, de la línea Philips Fluorescent Linear (Ver anexo A-7), proporcionando como nivel de iluminación máximo 509 lux y medio 338 lux a una altura de 7.2 m, reduciendo el consumo de energía por grupo de lámparas en 3.404W, con respecto a la configuración actual, utilizando para ello un arreglo de 8 filas y 7 columnas. Los resultados arrojados del cálculo, junto con las curvas isolux originadas por las luminarias, se presentan en el anexo A-8.

La ventaja que representa la implementación de esta propuesta es la disminución del consumo de potencia considerablemente, con un grupo de luminarias menor y sin modificar la ubicación actual (7.2 m de altura).

3era propuesta: Se estableció el uso de luminarias polivalentes del tipo industrial 10MGA/258 Muy Grandes Alturas, de la línea Philips Fluorescent Linear (Ver anexo A-7), proporcionando como nivel de iluminación máximo 606 lux y medio 293 lux a una altura de 4 m, reduciendo el consumo de energía por grupo de lámparas en

5.028W, con respecto a la configuración actual, utilizando para ello un arreglo de 6 filas y 7 columnas.

Para este caso se propone la elaboración de soportes de extremo a extremo, tomando como bases las paredes laterales y la pared central, de manera de poder ubicar las luminarias a la altura predeterminada. El cableado eléctrico debe ser hecho por medio de tubería adosada a la estructura de soporte.

Los resultados arrojados del cálculo, junto con las curvas isolux originadas por las luminarias y la disposición de los soportes para esta propuesta se presentan en el anexo A-8.

Esta propuesta representa la de menor consumo de energía, partiendo del uso de menor cantidad de luminarias, proporcionando el nivel de iluminación requerido. Para ello debe implementarse una estructura de soporte, ubicada a 4 m de altura.

El rediseño planteado presenta la siguiente estructura:

Local	Tipo de luminaria	Cantidad de luminarias x área	Consumo de potencia por grupo (W)	Nivel de iluminación preestablecido	Nivel de iluminación Máx/Med
Exteriores 1era propuesta	Proyectores CDM-R 70W	100	7000	500 lux	515/387 lux
Exteriores 2da propuesta	Fluorescente industrial 10MGA/258	56	6496	500 lux	509/338 lux
Exteriores 3era propuesta	Fluorescente industrial 10MGA/258	42	4872	500 lux	606/293 lux
Lab. T.N.A.	Fluorescente 731TC/336	14	1512	650 lux	709/396 lux
Lab. Protecciones	Fluorescente 731TC/336	14	1512	650 lux	654/421 lux
Sala sp-13	Fluorescente 731TC/336	4	432	750 lux	710/404 lux
Sala Litoral	Fluorescente 731TC/336	6	576	750 lux	838/449 lux
Ofic.	Fluorescente	3	324	750 lux	727/361 lux

Secretaría	731TC/336				
Ofic. Pasantes	Fluorescente 731TC/336	3	324	750 lux	727/361 lux
Ofic. En general	Fluorescente 731TC/336	2	216	500 lux	
Áreas de circulación	Fluorescente 731TC/336	Identificadas en cada área	432	200 lux	

Tabla 5.2.1. – Características del rediseño propuesto. Fuente: Los autores.

En vista de que la estructura presenta un diseño previo, con canalizaciones eléctricas para los circuitos de alumbrado, se tomó en consideración la utilización de la tubería existente para la alimentación del diseño propuesto, modificando las cargas por circuito y optimizando la configuración de encendido de las luminarias, partiendo de la redistribución de los circuitos. En caso de que exista la necesidad de realizar canalizaciones para los montajes planteados, se establece el uso de tubería EMT Ø ½”.

Se tomó en consideración para la reubicación de cargas las recomendaciones hechas a la Institución en la última auditoria técnica del sistema eléctrico de potencia del edificio, estandarizando la carga de iluminación a un nivel de 277V en todo el laboratorio, reubicando los circuitos de alumbrado pertenecientes a la mezanina de CEE en el subtablero de iluminación STBIII.

Se plantea el recableado de la instalación con el objeto de optimizar el funcionamiento del sistema, evitando la posibilidad de daños previos en el cableado. A tales fines, bajo la normativa del Código Eléctrico Nacional, se establece para la alimentación conductor # 12 TW AWG Cu 60° C y neutro del mismo calibre.

Para todas las áreas se sugiere el uso de interruptores de pared con una capacidad mínima de 10A.

No se incluyen en el rediseño las luminarias ubicadas en el techo sobre la mezanina de la sección de Sistemas de Potencia, partiendo del conocimiento del proyecto existente para la remodelación de este sector. En cambio, se propone la utilización del mismo tipo de luminaria, siguiendo el estándar que se plantea para áreas de oficina y áreas de circulación, y estableciendo para las salas de computación un grupo de luminarias adecuado al nivel de iluminación que se requiere.

Para la alimentación de los circuitos de alumbrado que se originen de la construcción de la mezanina se deja a disposición los circuitos 2,3,4 y 5 del subtablero de iluminación STB1I, ubicado en el área sp-11.

Se plantea para la alimentación de todos los circuitos el uso de interruptores termomagnéticos tipo EHB, 1 polo, 20A, con corrientes asimétricas de cortocircuito de 10KA, 40°C.

El plano eléctrico de iluminación actual y el plano eléctrico de iluminación propuestos se presentan en el anexo A-11, I1 e I3 respectivamente, reseñando la redistribución de circuitos concebida en función del ahorro de energía y de la comodidad del servicio.

El plano de luminarias actual y propuesto se presentan en el anexo A-11, I2, I4 e I5.

A continuación se presenta la tabla de contraste entre el consumo de potencia actual y el consumo del sistema propuesto para las instalaciones de alumbrado del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica.

1era propuesta: Projectores 70W a 7.2 m de altura.

Local	Consumo de potencia actual (W)	Consumo de potencia propuesto (W)
Áreas exteriores	9900	7000
Lab. T.N.A.	3040	1512
Lab. Protecciones	2400	1512
Sala sp-13	320	432
Sala Litoral	640	648
Ofic. Secretaría	320	324
Ofic. Pasantes	320	324
Áreas restantes	11.680	6696
Total Potencia (W):	28.620	18.448

Tabla 5.2.2.- Comparación entre consumos de potencia en base a la primera propuesta. Fuente: Los autores.

2da propuesta: Fluorescentes industriales a 7.2 m de altura.

Local	Consumo de potencia actual (W)	Consumo de potencia propuesto (W)
Áreas exteriores	9900	6496
Lab. T.N.A.	3040	1512
Lab. Protecciones	2400	1512
Sala sp-13	320	432
Sala Litoral	640	648
Ofic. Secretaría	320	324
Ofic. Pasantes	320	324
Áreas restantes	11.680	6696
Total Potencia (W):	28.620	17.944

Tabla 5.2.3.- Comparación entre consumos de potencia en base a la segunda propuesta. Fuente: Los autores.

3era propuesta: Fluorescentes industriales a 4 m de altura.

Local	Consumo de potencia actual (W)	Consumo de potencia propuesto (W)
Áreas exteriores	9900	4872
Lab. T.N.A.	3040	1512
Lab. Protecciones	2400	1512
Sala sp-13	320	432
Sala Litoral	640	648
Ofic. Secretaría	320	324
Ofic. Pasantes	320	324
Áreas restantes	11.680	6696
Total Potencia (W):	28.620	16.320

Tabla 5.2.4.- Comparación entre consumos de potencia en base a la tercera propuesta. Fuente: Los autores.

Para este análisis se omite el consumo de potencia representado por las luminarias ubicadas sobre la mezanina de la sección de Sistemas de Potencia ya que no se consideran dentro del rediseño.

El consumo de potencia actual en el edificio por concepto de alumbrado corresponde a un total de 28.620W, mientras que el consumo de potencia para la

primera propuesta representa un total de 18.448W, significando esto un ahorro de energía de 10.172W representando una disminución del consumo en 35.54%. Para la segunda propuesta el consumo de potencia total es igual a 17.944W, representando un 37.3% menos que el diseño actual. En tanto que para la tercera propuesta, el consumo calculado equivale a un total de 16.320W, lo que representa una diferencia de 42.98%.

De las tres propuestas presentadas, se toma como primera opción la tercera, constituida por la configuración de 6 filas y 7 columnas de luminarias 10MGA/258, de 2x58W, ubicadas a 4 m de altura. Se establecen como parámetros para la elección de esta propuesta el ahorro considerable de energía que representa (42.98%), la disminución en la cantidad de luminarias (42 vs 66) y el cumplimiento con el nivel de iluminación preestablecido en el diseño (máx 606 lux vs 500 lux de diseño). Sin embargo, el análisis de costos no se contempla dentro de este proyecto, por lo que se estima conveniente el estudio de la factibilidad económica de las tres propuestas a objeto de determinar la que cumpla con los principios aquí establecidos y a la vez resulte la más accesible en términos de inversión.

En cuanto al ahorro de energía y niveles de iluminación, el diseño propuesto cumple con los objetivos planteados para este proyecto de grado, dejando a disposición de la Universidad Simón Bolívar la información aquí presentada, de manera que sea de utilidad para proyectos futuros de la Institución.

3.- Rediseño de la Conexión de Puesta a Tierra del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica:

- **Fase de medición:**

El objetivo de esta fase fue el de recabar un conjunto de datos de campo, utilizando como instrumento para tales fines un Telurómetro digital y empleando una metodología de medición adecuada para lograr la obtención de valores correctos de resistencia.

Haciendo referencia al Marco Teórico, las dos mediciones obtenidas son la

resistividad del terreno a diferentes estratos y la de la resistencia de puesta a tierra, es decir la resistencia que presenta el terreno en el punto donde están enterradas las jabalinas conectadas al conductor.

Para la medición de la resistencia del terreno se empleó el Método Geoelectrico de Wenner o método de los cuatro electrodos, descrito en detalle en el marco teórico, haciéndose las mediciones en las adyacencias del edificio. Para obtener la resistividad por el método de Wenner se emplea la ecuación:

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

Arroja valores de resistividad correctos solo con electrodos pequeños enterrados a la profundidad b (ver arreglo de Wenner en el marco teórico) con cables aislados. Si además b no es mayor al 10% de a, asumiendo entonces b = 0 en la ecuación anterior se obtiene la siguiente fórmula usada en la práctica, que proporciona aproximadamente la resistividad promedio del suelo a la profundidad “a”:

$$\rho = 2\pi a R$$

Donde

ρ : resistividad del terreno a la profundidad “a”.

R: resistencia medida en el telurómetro.

Los valores obtenidos de la medición se representan en la siguientes tablas:

Tabla 5.3.1.- Resistividad del Terreno. 1ra Medición D = 13 m

Fuente: Ensayos realizados por los autores.

A (m)	R (Ω)	Pa (Ω)
13	2.41	196.85
11	3.57	246.74
9	4.79	270
7	7.64	336.02
5	9.96	312.9
3	13.93	262.57
1	24.65	154.88

Tabla 5.3.2.- Resistividad del Terreno. 1ra Medición D = 11 m.

Fuente: Ensayos realizados por los autores.

a (m)	R (Ω)	Pa (Ω)
11	3.07	212.18
9	3.84	217.15
7	6.69	294.24
5	11.36	356.88
3	23.37	440.51
1	37.8	237.5

Al analizar estos resultados se consiguieron errores en las mediciones porque no se tomó en cuenta la existencia de tubería de agua dentro de la zona de medición, afectando los valores obtenidos. Posteriormente, se inició el período de lluvia en esta zona por lo que las condiciones y características resistivas del terreno cambiaron y se optó por mediciones realizadas al terreno en época de sequía, específicamente en enero del 2001, temporada en donde las condiciones del terreno son las más adecuadas para

medir la máxima resistividad del suelo, por lo tanto los valores de resistividad por estratos para el diseño de la malla de tierra son los siguientes:

Figura 5.16.- Curva de R vs D resultante de las mediciones del terreno en Enero 2001. Fuente: Informes Técnicos.



Tabla 5.3.3.- Estratificación Vertical del Terreno. Fuente: Informes Técnicos.

Estrato	Resistividad ($\rho.m$)	Profundidad (m)
1	249.196	4.591
2	120.46	∞

La medición de la resistencia de puesta a tierra se obtuvo con el Método de Caída de Potencial o de los tres electrodos, tomando como zona de medición un terreno despejado en las adyacencias del edificio. Con la finalidad de obtener mediciones reales se desconectó la jabalina del resto de la conexión de puesta a tierra ya que el instrumento mediría, de no hacerse este procedimiento, un valor de resistencia resultante de la resistencia de puesta a tierra del edificio en paralelo con la puesta a tierra de la red de alimentación de la Electricidad de Caracas.

La resistencia de puesta a tierra se obtiene teóricamente, según el método usado, en el punto de equilibrio de la curva R vs D a un valor aproximado del 62% de la

distancia total de la medición y de acuerdo con el ensayo se obtuvo lo siguiente:

Tabla 5.3.4.- Resistencia de Puesta a Tierra. Fuente: Ensayos realizados por los autores

D (m)	R (Ω)
25	230
20	226.7
15	226.2
10	225.5
5	222.3

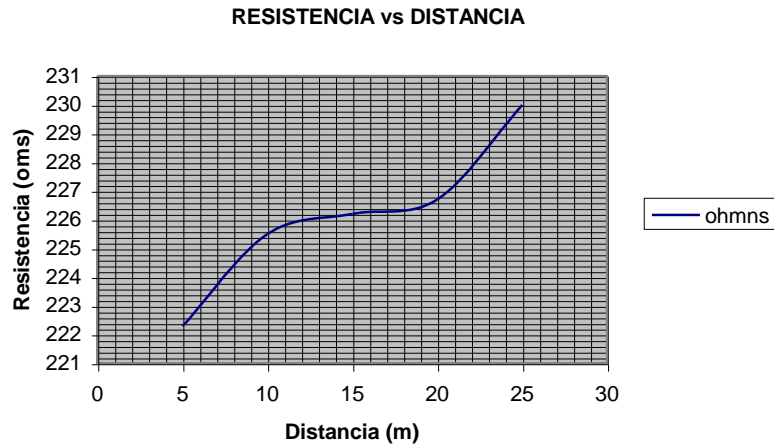


Figura 5.17

Fuente: Ensayos realizados por los autores

La resistencia de puesta a tierra da como valor:

$$R = 226.3 \Omega$$

De los resultados obtenidos producto de las mediciones efectuadas, se puede concluir que existen evidencias de alta resistencia y resistividad de suelo en el terreno, con consecuencias desfavorables a los usuarios y equipos instalados. Adicionalmente, de acuerdo a las especificaciones y normas existentes sobre la materia, el sistema de puesta a tierra deberá tener valores más bajos de los que arrojan los resultados de las mediciones actuales, por lo tanto cabe destacar la importancia que representa el

rediseño de la misma por el papel que juega en la salvaguarda del personal usuario de las instalaciones y en función de la calidad de la energía.

- **Fase de Diseño:**

El objetivo de esta fase fue el diseño del arreglo de puesta a tierra, de acuerdo a los requerimientos exigidos por la norma ANSI / IEEE std 80 – 2000, determinando los voltajes de toque y de paso que se pueden presentar en caso de cortocircuitos a tierra y calculando las tensiones de toque y de paso en la malla diseñada para verificar si éstas no sobrepasan el valor máximo permitido. La tensión máxima de trabajo es de 416 voltios, y la corriente de falla 1Φ es de 2.068 KA (calculado en base al nivel de cortocircuito de 7,5 MVA 3Φ , de la subestación de distribución “El Placer” de la Electricidad de Caracas c.a.)

Para la obtención de los niveles de cortocircuito de las barras del sistema eléctrico de potencia del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica se utilizó un programa de cálculo de cortocircuito conocido como ASP, UNEFA – Maracay. La base de cálculo del programa es la norma IEC-909. Los resultados del cálculo se muestran en el anexo A-9. El diagrama de impedancias implementado para el cálculo se muestra en el anexo A-11, T1.

El requerimiento de la institución sobre el diseño es llevar la resistencia de puesta a tierra (R_g), a un valor dentro del rango de 10Ω a 25Ω por metro o menos, según la norma COVENIN 200 en el artículo 250-84 que cita lo siguiente:

250-84. **Resistencia de los electrodos artificiales:** un electrodo único que consista en una barra, tubo o placa y que no tenga una resistencia a tierra de 25Ω como máximo, se complementará con uno o varios electrodos adicionales de cualquiera de los especificados en los artículos 250-81 o 250-83, hasta cumplir con el requerimiento de este artículo. Cuando se instales varios electrodos de barras, tubos o placas para cumplir con los requisitos de este artículo se deben colocar a una distancia mínima de 1,8 m entre sí.

Nota: la diferencia de la instalación en paralelo de barras de más de 2.40m

aumenta si se separan a más de 1.8m de distancia.

El procedimiento que se sigue corresponde al descrito en la norma std 80 – 2000, la cual recoge los principales cálculos en el diseño de mallas de tierra y en base a ellos se diseñó la propuesta definitiva y los elementos que la constituyen.

La conexión de puesta a tierra de diseño estará constituida por un anillo externo a la estructura (Ver anexo A-11, T2) contentivo de jabalinas tipo Copperwel, las cuales estarán instaladas convenientemente y su número depende del análisis y cálculo que se muestra a continuación:

Base de estudio: El diseño se realizó tomando como base la tensión de servicio de la Electricidad de Caracas EDC (416 V), la conexión del transformador es Delta-Estrella neutro puesto a tierra, conexión que evita la contribución de corrientes asimétricas por fallas a tierra en el lado de baja tensión. El nivel de cortocircuito en la sub-estación de alimentación es de 7.5 MVA trifásicos, y en base a este dato se modeló el equivalente de Thevenin del sistema para hallar la corriente de cortocircuito monofásica de la instalación, arrojando como resultado una corriente de 2,068KA, con una resistencia de falla de 0Ω

La resistividades promedio que se utilizaron para el diseño de la malla de tierra se determinaron producto de las mediciones de campo descritas anteriormente, tomando en cuenta la resistividad promedio para el primer estrato de 249,2 Ω -MTS, como peor condición para el diseño como lo estipula la norma IEEE std 80.

A) Consideraciones para el cálculo.

Datos del sistema:

- Nivel de Cortocircuito. $I_{cc} 1\Phi = 2,068KA.$
- Tiempo máximo de despeje de falla. $t = 0.03$ segundos.

Datos de resistividad del terreno.

- Resistividad del suelo. $\rho_s = 249.2 \Omega$ - MTS.
- Resistividad del suelo $\rho = 120.46 \Omega$ - MTS.

Datos de la malla.

- Área neta de! Terreno $A = 128 \text{ mts}^2$.
- Largo de la malla $b = 37.7 \text{ mts.}$
- Ancho de la malla $a = 37.7 \text{ mts.}$
- Profundidad de la Malla (h). $0,2 \text{ mts.}$
- Espesor del primer estrato (hs), $hs = 4.591 \text{ mts.}$

Datos de la jabalina:

- Barras de aterramiento tipo copperweld de 2.44 mts de longitud.
- Diámetro de las Barras. $0,0152 \text{ mts. } 5/8 \text{ pulgadas.}$
- Número de las Jabalinas ($\eta = 36$)

Desarrollo del cálculo:

- Longitud del conductor: $l = 226 \text{ m}$

Tabla 5.3.5.- Sección mín requerida para el conductor. Fuente: Standard 80-IEEE

Table 1 – Material constants

Description	Material conductivity (%)	α_p factor at 20 °C (1/°C)	K_0 at 0 °C (0 °C)	Fusing ^a temperature T_m (°C)	ρ_{20} 20 °C ($\mu\Omega\text{-cm}$)	TCAP Thermal capacity [$J/(\text{cm}^3\text{-}^\circ\text{C})$]
Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.003 93	234	1083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.003 81	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.003 78	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.003 78	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod ^b	20.0	0.003 78	245	1084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade	61.0	0.004 03	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy	53.5	0.003 53	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy	52.5	0.003 47	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.003 60	258	657	8.48	3.58
Steel, 1020	10.8	0.001 60	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod ^b	9.8	0.001 60	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated steel rod	8.6	0.003 20	293	419	20.10	3.93
Stainless steel, 304	2.4	0.001 30	749	1400	72.00	4.03

Table 2 – Material constants

Material	Conductivity (%)	T_m ° (°C)	K_f
Copper, annealed soft-drawn	100.0	1083	7.00
Copper, commercial hard-drawn	97.0	1084	7.06
Copper, commercial hard-drawn	97.0	250	11.78
Copper-clad steel wire	40.0	1084	10.45
Copper-clad steel wire	30.0	1084	12.06
Copper-clad steel rod	20.0	1084	14.64
Aluminum EC Grade	61.0	657	12.12
Aluminum 5005 Alloy	53.5	652	12.41
Aluminum 6201 Alloy	52.5	654	12.47
Aluminum-clad steel wire	20.3	657	17.20
Steel 1020	10.8	1510	15.95
Stainless clad steel rod	9.8	1400	14.72
Zinc-coated steel rod	8.6	419	28.96
Stainless steel 304	2.4	1400	30.05

Se tomó de las tablas anteriores el conductor de cobre duro con temperatura de fusión

- $T_m = 1084^\circ$
- $K_f = 7.06$
- Área de conductor en circular Mil: $A = (I_{cc}) (K_f) (\sqrt{tc})$

Donde:

- I_{cc} es la corriente de falla eficaz en amperios, $I_{cc} = 2.068\text{KA}$.
- tc es el tiempo de despeje de la falla. $tc = 0.03$ seg.
- K_f es una constante que depende del valor T_m . $K_f = 7.06$.

$$A = (2068 \text{ Amp}) (7.06) (\sqrt{0.03 \text{ seg}}) = 2722.23 \text{ circular Mil}$$

Tomando el área de conductor comercial inmediatamente superior, Área en $\text{mm}^2 = 1366.33 / 1974 = 1.3790423 \text{ mm}^2$.

El diámetro del conductor

$$1.3790423 \text{ mm}^2 = \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{(1.3790423 \text{ mm}^2) (4)}{\pi}} = 1.325085 \text{ mm}$$

Este diámetro D, corresponde aproximadamente a un calibre de conductor menor al N° 14 AWG.

El conductor determinado no corresponde, según El código Eléctrico Nacional (Covenin 200) el menor calibre a utilizar en estos casos es el N° 6 AWG, por otra parte, la norma ANSI / IEEE std 80 Apéndice C de año 2000, en lo referente al mínimo diámetro que deberá tener el conductor de la malla a diseñar debido a esfuerzos mecánicos, donde esto no deberá ser inferior a un diámetro de 0,0105 mts, conduce a recomendar el uso del conductor N° 2/0 o equivalente en área, ($d_1 = 10.608 \text{ mm}$, $A = 0,8839 \text{ mm}^2$), pero tomando en cuenta las características del sistema de potencia en cuanto a la corriente de cortocircuito, se elige el calibre de conductor N°2 AWG $d = 7.419 \text{ mm}$ y $A = 0.4322 \text{ cm}^2$, este calibre de conductor es más que suficiente para soportar la corriente de falla monofásica y además cumple con la norma COVENIN 200 del Código Eléctrico Nacional.

B) Tensiones de toque y de paso tolerables sobre el primer estrato, según la norma ANSI / IEEE.

$$E_{paso} = \sqrt{R_b + R_{2ps}} (I_b) \quad \text{y} \quad E_{toque} = \sqrt{R_b + R_{2pp}} (I_b)$$

$$C_s(hs, K) = \frac{1}{0,96} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2n hs}{0,08} \right)^2}} \right]$$

Donde:

- Rb es la resistencia ofrecida por el cuerpo humano. $R_b = 1000 \Omega$.
- R2ps es la resistencia de dos pies en serie.

$$R_{2ps} = 6C_s(hs, K)\rho_s$$

- R2pp es la resistencia de dos pies en paralelo.

$$R_{2pp} = 1,5 C_s(hs, K)\rho_s$$

- $C_s(hs, K)$ es el factor por efecto del espesor de la piedra picada ($hs = 0,05 \text{ m}$) y el factor de reflexión K.

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

- ρ es la resistividad de la tierra, para el diseño. $\rho = 120.46 \Omega \cdot \text{mts}$.
- ρ_s es la resistividad de la piedra picada. $\rho_s = 249.2 \Omega \cdot \text{mts}$.
- Ib es la corriente máxima permitida para evitar efectos de fibrilación ventricular.

$$I_{b70Kg} = \frac{0,157}{\sqrt{t \text{ seg}}}$$

Si:

$$K = \frac{(120.46 \Omega - mts) - (249.2 \Omega - mts)}{(120.46 \Omega - mts) + (249.2 \Omega - mts)} = -0.3487$$

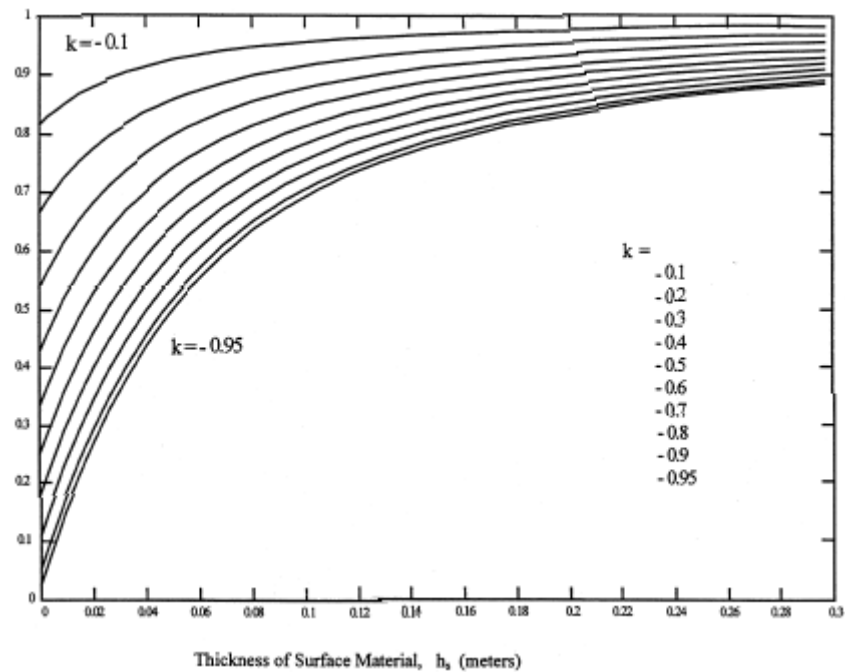


Figura 5.18. Fuente: Standard 80-IEEE

Entonces $C_s(hs, K)$ según la gráfica C_s vs h_s es, $C_s(hs, K) = 0,93$

Luego:

$$E_{paso 70Kg} = \mathbf{1000} \Omega + 6 C_s(hs, K) \rho_s \left[\frac{0,157}{\sqrt{t_{seg}}} \right]$$

$$E_{toque 70Kg} = \mathbf{1000} \Omega + 1,5 C_s(hs, K) \rho_s \left[\frac{0,157}{\sqrt{t_{seg}}} \right]$$

Entonces $E_{paso 70Kg}$ y $E_{toque 70Kg}$ son:

$$E_{paso\ 70Kg} = \left[1000\Omega + (6)(0,93)(249,2\Omega - mts) \right] \left(\frac{0,157}{\sqrt{0.03\ seg}} \right)$$

$$E_{paso\ 70Kg} = 2166.87\text{Voltios}$$

$$E_{toque\ 70Kg} = \left[1000\Omega + (1,5)(0,93)(249,2\Omega - mts) \right] \left(\frac{0,157}{\sqrt{0.03\ seg}} \right)$$

$$E_{toque\ 70Kg} = 1221.55\text{Voltios}$$

C) Cálculo de la resistencia de puesta a tierra.

$$R_g = \frac{(R_1 R_2) - (R_{12})^2}{R_1 + R_2 - 2 R_{12}}$$

Donde:

- R_1 es la resistencia de los conductores de la malla.

$$R_1 = \left(\frac{\rho l}{\pi l_1} \right) \left[\left(\ln \frac{2 l_1}{h} \right) + \left(K_1 \frac{l_1}{\sqrt{A}} \right) - K_2 \right]$$

$$h' = \sqrt{(d_1) (h)}$$

- R_2 es la resistencia de todas las jabalinas instaladas.

$$R_2 = \left(\frac{\rho l}{2\eta \pi l_2} \right) \left[\left(\ln \frac{8 l_2}{d_2} \right) - 1 + \left(2 K_1 \frac{l_2}{\sqrt{A}} \left(\sqrt{\eta} - 1 \right) \right) \right]$$

- R_{12} es la resistencia mutua entre R1 y R2.

$$R_{12} = \left(\frac{\rho_1}{\pi l_1} \right) \left[\left(\ln \frac{2 l_1}{l_2} \right) + K_1 \frac{l_1}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

En las ecuaciones anteriores tenemos:

- ρ_1 es la resistencia del terreno donde se encuentra implantadas las jabalinas (primer estrato de medición). $\rho_1 = 249.196 \Omega - \text{mts}$
- ρ_2 es la resistencia de la capa o segundo estrato de medición $\rho_2 = 120.46 \Omega - \text{mts}$.
- H es el espesor del primer estrato del terreno. $H = 4.591 \text{ mts}$.
- l_1 es la longitud total de los conductores de la malla. $l_1 = 94 \text{ mts}$.
- l_2 es la longitud promedio de las jabalinas. $l_2 = 2.44 \text{ mts}$.
- h es la profundidad a la cual se encuentra la malla. $H = 0,2 \text{ mts}$.
- h' es $\sqrt{(d_1)(h)}$ para conductores enterrados a una profundidad h, o $0,5 d_1$ para conductores a $h = 0$.
- η es el número de jabalinas. $\eta = 36$.
- A es el área del terreno. $A = 1418.8 \text{ mts}^2$.
- K_1 y K_2 son constantes derivadas de la geometría de la malla.
- d_1 es el diámetro del conductor # 2 AWG. $D_1 = 0,01341 \text{ mts}$.
- d_2 es el diámetro de la jabalina. $D_2 = 0,0152 \text{ mts}$.

$$h' = \sqrt{(d_1)(h)} = \sqrt{(0,00742 \text{ mts})(0,2 \text{ mts})} = 0,03852 \text{ mts}$$

A partir de la figura 5.19:

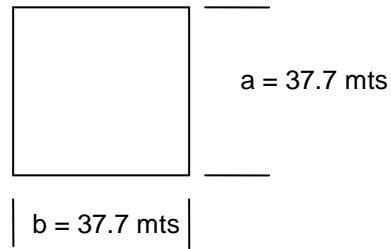


Figura 5.19. Fuente: Los autores.

Si llamamos x' a la relación longitud – ancho de la malla, tenemos;

$$x' = \frac{b}{a} = \frac{37.7 \text{ mts}}{37.7 \text{ mts}} = 1$$

Con el valor de x' entramos en la curva A de las siguientes gráficas, para encontrar los valores de K_1 y K_2 .

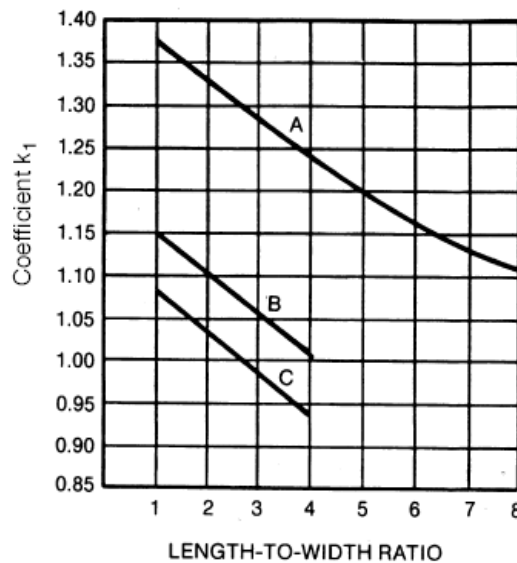


Figura 5.20. Fuente: Standard 80-IEEE

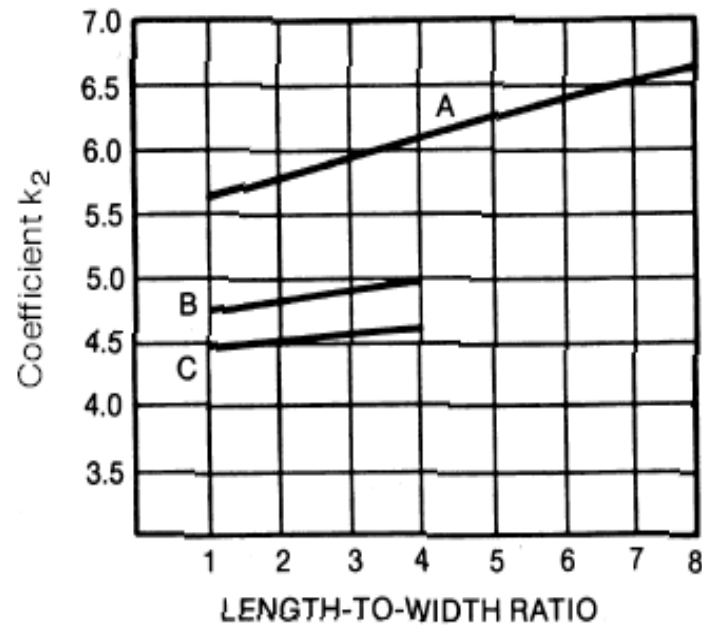


Figura 5.21. Fuente: Standard 80-IEEE

Los valores de K1 y K2 son:

$$K1 = 1,375$$

$$K2 = 5,6$$

D) Determinación de R₁, R₂ y R₁₂.

$$R_1 = \left(\frac{\rho l}{\pi l_1} \right) \left[\left(\ln \frac{2 l_1}{h'} \right) + \left(K1 \frac{l_1}{\sqrt{A}} \right) - K2 \right]$$

$$R_1 = \left(\frac{249.2\Omega \cdot \text{mts}}{(3,1416)(226\text{mts})} \right) \left[\left(\ln 2 \frac{226\text{mts}}{0,03852\text{mts}} \right) + \left(1,375 \frac{226\text{mts}}{\sqrt{1418.8\text{mts}^2}} \right) - 5,6 \right] = 4.21886\Omega$$

$$R_2 = \left(\frac{\rho a}{2\eta \pi l_2} \right) \left[\left(\ln \frac{8 l_2}{d_2} \right) - 1 + \left(2 K1 \frac{l_2}{\sqrt{A}} (\sqrt{\eta} - 1) \right) \right]$$

$$R_2 = \left(\frac{249.2\Omega - \text{mts}}{(2)(36)(3,1416)(2.44\text{mts})} \right) \left[\left(\ln \frac{(8)(2.44\text{mts})}{0,0152\text{mts}} \right) - 1 + \left((2)(1,375) \left(\frac{2.44\text{mts}}{\sqrt{1418.8\text{mts}^2}} \right) (\sqrt{36} - 1)^2 \right) \right]$$

$$. R_2 = 4.791225\Omega$$

$$R_{12} = \left(\frac{\rho a}{\pi l_1} \right) \left[\left(\ln \frac{2 l_1}{l_2} \right) + K_1 \frac{l_1}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

$$R_{12} = \left(\frac{249.2\Omega - \text{mts}}{(3,1416)(226\text{mts})} \right) \left[\left(\ln \frac{(2)(226\text{mts})}{2.44\text{mts}} \right) + \left(1,375 \frac{226\text{mts}}{\sqrt{1418.8\text{mts}^2}} \right) - 5,6 + 1 \right]$$

$$R_{12} = 3.11378\Omega$$

E) Determinación de la resistencia de puesta a tierra R_g .

$$R_g = \frac{(R_1 R_2) - (R_{12})^2}{R_1 + R_2 - 2 R_{12}}$$

$$R_g = \frac{[4.21886\Omega (4.791225\Omega)] - (3.11378\Omega)^2}{4.21886\Omega + 4.791225\Omega - (2)(3.11378\Omega)} = 3.77998\Omega$$

El resultado cumple la condición de diseño impuesta sobre el valor final de R_g , que debe ser menor a 25Ω .

Ahora con el valor de R_g , calculado con $\eta = 36$, se sigue con los cálculos finales de la malla de tierra.

F) Determinación de la máxima corriente de la malla.

De acuerdo con la figura 5.22.

$$I_g = I_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow I_g = 2.068 \text{ KA} \frac{4.791225\Omega}{4.218866\Omega + 4.791225\Omega}$$

$$I_g = 1099.68 \text{ Amp.}$$

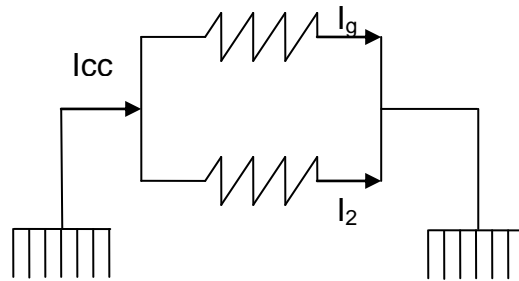


Figura 5.22. Fuente: Los autores.

G) Determinación del gradiente del potencial de tierra G.P.R.

$$\text{G.P.R.} = (I_g) (R_g) = (1099.68 \text{ Amp}) (3.77998 \Omega) = 4156.78 \text{ Volt.}$$

Este valor de G.P.R es mucho mayor que E_{toque} .

Es decir $\text{G.P.R} = 4156.78 \text{ Volt} > E_{\text{toque}} = 1221.55 \text{ Volt}$.

De aquí se concluye que el diseño presentado, no cumple porque el gradiente de

potencial es mayor que la tensión de toque, con una diferencia de 2935.23V.

Datos de la nueva malla:

- longitud del conductor: 226m
- área de la malla A = 1418.78 m².
- Numero de jabalinas $\eta = 36$.
- Ancho y largo de las retículas a = b = 37.7m.

$$R_1 = \left(\frac{\rho l}{\pi l_1} \right) \left[\left(\ln \frac{2 l_1}{h'} \right) + \left(K_1 \frac{l_1}{\sqrt{A}} \right) - K_2 \right]$$

$$R_1 = \left(\frac{249.2\Omega - \text{mts}}{(3,1416)(226\text{mts})} \right) \left[\left(\ln 2 \frac{226\text{mts}}{0,03852\text{mts}} \right) + \left(1,375 \frac{226\text{mts}}{\sqrt{1418\text{mts}^2}} \right) - 5,6 \right] = 4.21894\Omega$$

$$R_2 = \left(\frac{\rho a}{2\eta \pi l_2} \right) \left[\left(\ln \frac{8 l_2}{d_2} \right) - 1 + \left(2 K_1 \frac{l_2}{\sqrt{A}} (\sqrt{\eta} - 1) \right) \right]$$

$$R_2 = \left(\frac{249.2\Omega - \text{mts}}{(2)(36)(3,1416)(2.44\text{mts})} \right) \left[\left(\ln \frac{(8)(2.44\text{mts})}{0,0152\text{mts}} \right) - 1 + \left((2)(1,375) \left(\frac{2.44\text{mts}}{\sqrt{1418.78\text{mts}^2}} \right) (\sqrt{36} - 1)^2 \right) \right]$$

$$R_2 = 4.79126\Omega.$$

$$R_{12} = \left(\frac{\rho a}{\pi l_1} \right) \left[\left(\ln \frac{2 l_1}{l_2} \right) + K_1 \frac{l_1}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

$$R_{12} = \left(\frac{249.2 \Omega - \text{mts}}{(3,1416) (226 \text{ mts})} \right) \left[\left(\ln \frac{(2) (226 \text{ mts})}{2.44 \text{ mts}} \right) + \left(1,375 \frac{226 \text{ mts}}{\sqrt{1418.78 \text{ mts}^2}} \right) - 5,6 + 1 \right]$$

$$R_{12} = 3.11383 \Omega$$

Determinación de la resistencia de puesta a tierra R_g :

$$R_g = \frac{(R_1 R_2) - (R_{12})^2}{R_1 + R_2 - 2 R_{12}}$$

$$R_g = \frac{[4.21894 \Omega (4.79126 \Omega)] - (3.11383 \Omega)^2}{4.21894 \Omega + 4.79126 \Omega - (2) (3.11383 \Omega)} = 3.78004 \Omega$$

$$I_g = I_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow I_g = (I_{cc}) \frac{4.79126 \Omega}{4.21894 \Omega + 4.79126 \Omega} = (I_{cc}) 0.53176 \Omega$$

$$I_g = (80.4 \text{ Amp}) (0.53176 \Omega) = 42.75384 \text{ Amp.}$$

$$G.P.R. = (I_g) (R_g) = (42.75384 \text{ Amp}) (3.78004 \Omega) = 161.6 \text{ Volt.}$$

Este valor de G.P.R es ligeramente mayor que E_{toque} .

Es decir $G.P.R = 161.6 \text{ Volt} > E_{\text{toque}} = 94.62 \text{ Volt}$.

Por las características altamente resistivas del primer estrato de terreno aunado a su espesor, la diferencia que presenta el gradiente de potencial de tierra con respecto al potencial de toque es muy alta, además se han extendido al máximo las posibilidades de diseño alrededor de las instalaciones del edificio. Por ende, no es posible realizar

más ampliaciones al diseño de la malla con los materiales convencionales y con la limitación del espacio, a objeto de llegar a una resistencia de puesta a tierra con los valores adecuados para las tensiones de toque y de paso del STD-80 2000.

Ante tal situación, la opción más conveniente es la de rediseñar la malla de tierra con electrodos químicos en vez de los electrodos convencionales. Los electrodos químicos seleccionados se les conoce en el mercado como electrodos químicos tipo CHEM-ROD (Ver anexo A-10), distribuidos por Lightning Eliminator & Consultants de Venezuela C.A., ubicada en Valencia, estado Carabobo, quien representa en el país a la compañía norteamericana LEC, con sede en Boulder Colorado (USA).

De antemano se debe decir que, para el diseño de mallas con electrodos químicos, la metodología de cálculo no es la misma que para electrodos convencionales, pues la resistencia de puesta a tierra en estos casos responde a otros factores propios de las características de los materiales empleados, el diseño del electrodo, el tipo de producto empleado, etc., por lo que se abordará el diseño desde un punto de vista más general, enfocando los cálculos de diseño para obtener la resistencia de tierra que arroje valores de resistencia de puesta a tierra seguros, tanto para la instalación como para el personal que labora en la edificación.

El problema se presenta en la forma de poder estimar la solución factible, respaldando teóricamente cada planteamiento con el número de barras necesarias, para llevar el terreno a un nivel de resistencia adecuado.

H) Cálculo del número de Barras Químicas en función de la Resistencia de Puesta a Tierra:

La empresa Lightning Eliminators, con sede en Colorado, USA., ofrece a través de internet un programa que realiza los cálculos del número de barras químicas del tipo Chem-Rod que se requieren para llevar el suelo a una resistencia determinada, así como los costos de venta en Estados Unidos para cada solución.

Requiere como datos de entrada las características del terreno, los cuales son la

resistividad y la resistencia deseada en el terreno; las características del electrodo ya vienen preestablecidas de acuerdo a uno de los modelos de barras que tiene la empresa, específicamente el de 3m (10ft). Todos los cálculos están hechos en base a un modelo homogéneo del terreno para el cálculo del número de barras.

Las ecuaciones en las que se basa este cálculo aproximado ya se han presentado en el basamento teórico, pero como ya se ha dicho, estas formulas están directamente relacionadas con las características propias de cada tipo de electrodo químico, el número de barras, la resistividad del terreno y sobre todo la calidad del material de acondicionamiento del terreno alrededor del electrodo.

A continuación se presentan los cálculos realizados para estimar el número de electrodos necesarios para bajar la resistencia de puesta a tierra R_g , de la malla, a un valor inferior a 1Ω , utilizando electrodos Tipo CHEM-ROD, de la Empresa Lightning Eliminators & Consultants de Venezuela C.A. con sede en Valencia, estado Carabobo:

La resistencia de puesta a tierra en función del número de electrodos se calcula de la siguiente manera:

1^{ro}- Se define el largo de la jabalina:

$$L = 10\text{ft} \pm 3\text{mts}$$

2^{do}- Se busca del fabricante la resistencia de esta sola jabalina, en función del material acondicionador del terreno (GAF) que en el caso del este fabricante da dos opciones que son:

- R_1 de una jabalina cubierta por un cilindro de material GAF de 30.48cm:

$$R_1 = .321 (.52\rho_{\text{GAF}} + .48\rho)$$

Donde:

R1: es la resistencia que se obtiene después de implantar el electrodo

ρ_{GAF} : es la resistencia del material acondicionador estimándose para este valor el peor de los casos consistente en $8\Omega\cdot m$.

ρ_s : es la resistividad del terreno.

$$R1 = .321 [(0.68)(0.8) + (0.32)(100)] = 10.5 \Omega$$

3^{ro}- Se calcula la resistencia critica de puesta a tierra una vez estabilizado el terreno, en función de la longitud de la jabalina instalada que se define para una eficiencia de $95\pm 2\%$ de la siguiente formula:

$$R1 = \frac{\rho}{1.915} \left[\ln \left(\frac{96L}{d} - 1 \right) \right] (E)$$

donde:

ρ : la resistencia del terreno.

L: es la longitud del electrodo en pies.

E: es la eficiencia de la interfase.

d: diámetro de la jabalina en pulgadas.

$$R1 = \frac{249.2}{(1.915)(10)} \left[\ln \left(\frac{(96)(10)}{2.625} - 1 \right) \right] (0.2) = 12.7576148 \Omega$$

4^{to}- Por último, se calcula la resistencia de puesta a tierra en función de la resistencia critica de las jabalinas, el número de jabalinas instaladas y una constante K combinante, que relaciona la resistencia de los electrodos con respecto al número de jabalinas instaladas cuya función se define así:

$$K = [(0.3775527)(L_N(N))] + 0.89057$$

Para finalmente calcular la resistencia de puesta a tierra aproximada del sistema instalado mediante la formula:

$$Rn \cong Rg = K \frac{R1}{N}$$

Como el cálculo de la resistencia de puesta a tierra deseada, se obtiene iterando con las formulas anteriores, producto de esta iteración se logró la obtener de un valor de Rg que cumpla con los estándares de seguridad.

El valor de Rg adecuado para la instalación de puesta a tierra se obtuvo con 20 electrodos colocados a una distancia de 3.3mts, pero como la resistencia de puesta a tierra mejora si la distancia entre electrodos es mayor a la distancia critica de 1.1 veces la longitud del electrodo, la resistencia puede mejorar con tan solo aumentar dicho valor de distancia. La configuración utilizada para la disposición de los electrodos químicos en la malla se muestra en el plano de malla de puesta a tierra, en el anexo A-11, T3.

Cálculos realizados:

$$N = 20$$

$$K = [(0.3775527)(L_N(20))] + 0.89057 = 2.02161681$$

$$Rn \cong Rg = K \frac{R1}{N}$$

Donde:

R1: es la resistencia de un electrodo en tierra, definido para un electrodo

de 3m, con resistencia de tierra estabilizada.

N: el número de electrodos químicos seleccionados.

K: el factor combinante entre el número de electrodos conectados.

$$R_g = 2.02161681 \left(\frac{12.7576148}{20} \right) = 1.28955042 \Omega$$

El valor de R_g que se estima aceptable para un I_g aproximado de 1099.68A es de $0,3\Omega$, este valor es posible obtenerlo con los veinte electrodos instalados aumentando la distancia entre estos a aproximadamente 2.5 veces la longitud del electrodo. Cerca de este valor el factor K es muy cercano a uno por ende, baja resistividad, otra medida que se puede aplicar para llevar este valor de resistencia a $0,3\Omega$, es aumentar el cilindro de interfase con más material acondicionador de suelos.

A continuación se da un resume a groso modo, de los requerimientos básicos para la construcción de este sistema de aterramiento:

- 20 electrodos químicos de 3 mts de longitud y 2.025' de diámetro.
- 97 mts de conductor de cobre #2 AWG Cu desnudo.
- Espaciamiento entre electrodos 4.81 mts

Para el sistema de puesta a tierra del edificio se propone conectar la carcasa de cada uno de los tableros a la malla de puesta a tierra, a fin de asegurar que todas las instalaciones del edificio contarán con una correcta conexión de puesta a tierra. A tales efectos, se establece que el conductor de tierra será calibre #12 AWG TW Cu 60 °C, de color verde, como lo indica el Código Eléctrico Nacional, para los tomacorrientes de uso general y para todos aquellos equipos que requieran de la conexión.

Para establecer la conexión de cada tablero a la malla de puesta a tierra se tomó como parámetro fundamental la acometida y el interruptor principal del tablero, si lo hubiera.

A continuación se presenta el conductor de puesta a tierra por tablero:

- **TBP:**
1x#2 AWG Cu Desnudo.
- **STB1:**
1x#6 AWG Cu Desnudo
- **STB1T:**
1x#6 AWG Cu Desnudo
- **STB1T1:**
1x#8 AWG Cu Desnudo
- **STB1T2:**
1x#10 AWG Cu Desnudo
- **STB1T3:**
Siguiendo las consideraciones establecidas en la última auditoria eléctrica efectuada en las instalaciones del edificio, se deja el cálculo del conductor de puesta a tierra para acondicionarlo a la acometida del nuevo tablero.
- **STB1T4.1:**
1x#10 AWG Cu Desnudo
- **STB1T4.2:**
1x#10 AWG Cu Desnudo
- **STB1T4.2.1:**
1x#10 AWG Cu Desnudo
- **STB1I:**
1x#10 AWG Cu Desnudo
- **STB1II:**
1x#10 AWG Cu Desnudo
- **STB2:**
1x#10 AWG Cu Desnudo

- **STB3:**
1x#6 AWG Cu Desnudo existente. Se aconseja conectarlo a la malla en el momento de su implementación.
- **STB3.1:**
1x#8 AWG Cu Desnudo

CONCLUSIONES

El sistema eléctrico de potencia del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica de la Universidad Simón Bolívar presentó condiciones de deterioro en sus instalaciones en general durante la evaluación realizada en este proyecto de investigación, mostrándose signos de envejecimiento y de una falta de mantenimiento severa.

De acuerdo a la última auditoria técnica realizada al laboratorio, y confirmado por nuestras observaciones, la carga que tiene el laboratorio de conversión de energía eléctrica es de 153KW. De esta carga total, 67KW son cargas constantes y el resto de la carga, 87KW, pertenece a los equipos usados en las prácticas de laboratorio. Su factor de uso depende de las materias dictadas por trimestre y las actividades prácticas por semana que este tenga. La revisión de los datos del registro de carga arrojó como máximo valor de potencia 31KW, estos valores revelan una diferencia de 121.98 KW, entre la carga instalada en el laboratorio y el máximo valor suministrado por el registrador de carga, evidenciando que el factor de uso del resto de las cargas es muy bajo.

Las mediciones de resistencia de puesta a tierra y resistividad del terreno arrojaron valores muy altos de resistencia, para el nivel de cortocircuito de la instalación, por lo que se concluye que esta condición pone en riesgo al personal que labora en el edificio y a la instalación misma.

En los ensayos luminotécnicos realizados se comprobó que la iluminancia, en la mayoría de las áreas evaluadas, estaba por debajo del nivel estipulado como óptimo. Además se constató el estado de deterioro severo de algunos equipos, como lo son las luminarias del techo del edificio y se determinó mediante cálculo el consumo de carga, resultando considerablemente alto.

El levantamiento de las curvas de tiempo-corriente reveló que los interruptores no están operando en el rango de tiempo instantáneo, por lo tanto sus curvas no

coordinan con los interruptores que los respaldan, dándose algunos casos donde las curvas se superponen por encima de dos o más interruptores que los anteceden, por lo tanto el sistema de protecciones en general no es selectivo. El estado actual de los equipos no asegura que funcionen en casos de fallas con altos niveles de corrientes, por lo que se concluye que el sistema de protecciones no es confiable. Además, el sistema no es seguro porque no garantiza que proteja las instalaciones ni al personal y por último es posible esperar que, para corrientes de falla que sean un poco mayores a las corrientes de sobrecarga, la respuesta de la protección no sea tan rápida como se requiera, por lo tanto el sistema no es rápido.

Con la implementación de los interruptores seleccionados, en el rediseño del sistema de protecciones, es posible garantizar una coordinación por corrientes del sistema de protecciones de la sección de Sistemas de Potencia que cumpla con los cuatro criterios de coordinación más importantes, por lo tanto los objetivos del rediseño del sistema de protecciones quedan cumplidos a plenitud.

El rediseño del sistema de alumbrado se realizó en base a tecnología de avanzada, con lámparas de un consumo de potencia significativamente menor, proporcionando los niveles de iluminación recomendados. Se diseñó una nueva distribución de los circuitos dentro del sistema de potencia, redistribuyendo las cargas con el objeto de optimizar la funcionalidad del tablero y eliminar desbalances presentes en la actualidad, utilizando a tales fines la canalización existente y corrigiendo defectos de diseño para comodidad del usuario, garantizando la mejor utilización del alumbrado. Con los resultados obtenidos se cumple con los objetivos planteados para el rediseño del sistema de iluminación.

El diseño de la malla de tierra es presentado en forma de anillo, delimitándose alrededor de la sección de Sistemas de Potencia, a consecuencia del área de terreno que se dispone para la realización de la malla. Se propone el diseño a base de electrodos químicos Chem-Rod para una resistencia menor a 1Ω con un arreglo de 20 jabalinas, al ser inviable lograr a partir de jabalinas convencionales tipo Copperwel esta misma resistencia de la malla, utilizando al máximo el poco terreno disponible.

RECOMENDACIONES

- Realizar una inspección minuciosa de las cargas, apoyándose en las auditorias técnicas que se hayan efectuado recientemente en el laboratorio, a fines de recablear los tramos de la instalación que se encuentren fuera de las normas establecidas en el Código Eléctrico Nacional.
- Remover el tablero STB1T3 de su ubicación actual y sustituirlo por un tablero NLAB412L como mínimo. A tales fines, se recomienda seguir las pautas establecidas en la última auditoria eléctrica realizada en el laboratorio.
- Verificar el dimensionamiento del sistema de protecciones en general y sustituir aquellos equipos que no se adecuen a la carga instalada.
- Evaluar el sistema de protecciones del edificio en su totalidad, a fines de comprobar si los interruptores se encuentran en buen estado de operación, y reemplazar aquellos que no se ajusten a la curva de diseño, a fines de garantizar la confiabilidad del sistema.
- Implementar la conexión de puesta a tierra en todos los tomacorrientes del edificio, en los mesones de ensayos de máquinas eléctricas, en los mesones de ensayos a protecciones y en cualquier otro punto de alimentación donde se considere necesaria una toma de puesta a tierra.
- Se recomienda a la Universidad Simón Bolívar la implementación de los rediseños propuestos en este trabajo de investigación, a fines de optimizar el servicio eléctrico del Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica, en función de la calidad de la energía.
- Se recomienda, a la hora de la implementación, asentar en planos y en documentación escrita cualquier alteración que se realice en los diseños propuestos, con la finalidad de mantener la información del sistema eléctrico de potencia debidamente actualizada.
- Se recomienda al Instituto Universitario Experimental de Tecnología de La

Victoria la actualización de bibliografía referente a sistemas de protecciones, sistemas de alumbrado y diseños de puesta a tierra, sugiriéndose para ello, en primera instancia, la adquisición de los textos citados en la bibliografía de este proyecto de investigación.

- Se recomienda al Instituto Universitario Experimental de Tecnología de La Victoria la actualización de documentación electrónica, adquiriendo software de uso regular en el mercado para el cálculo de iluminación, cálculo de variables de sistemas de potencia, cálculo de sistemas de puesta a tierra, diseño de planos, entre otros; proporcionándole al alumnado una introducción a estos programas, con el objeto de facilitarle su desenvolvimiento en el campo laboral.

BIBLIOGRAFÍA

USB Titulo “uso de electrodos químicos del tipo chem-rod para puestas a tierra en suelos homogéneos” autor: Gustavo Alberto Rementería Reyes, Informe Final de Pasantías presentado ante la ilustre Universidad Simón Bolívar como requisito parcial para optar al Título de Ingeniero Electricista, Sartenejal Marzo 1996.

Titulo : “soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución” autor: Pablo Díaz, editorial: McGraw-Hill interamericana, editores S.A. de C.V. primera edición, 2001. 330 pag.

Dr. Raúl Velásquez PH. D. in electrical engineering university of Montreal, Canada, Seminario – Workshop internacional en: “calidad de la energía”, septiembre12-septiembre14, 2001, hotel laguna mar Resort- casino isla de margarita- venezuela, 112 pag.

Westinghouse electric corporation - Lamp Division, titulo: “Manual del alumbrado”, editorial Dossat, S.A., 3^{ra} edición 1980, 255 pag.

Norma venezolana Covenin 2495:2001, “interrptores en caja moldeada hasta 1000V C.A. / 1200V D.C. Requisitos y Métodos de ensayo”, 2^{da} Revisión, Comité de electricidad de venezuela, editado por Fondonorma.

Juan J. Martínez R., José C. Toledano G. “Puesta a tierra en Edificaciones y En Instalaciones Eléctricas”, editorial Paraninfo Thomson Learning, cuarta edición, 2001, 276 pag.

Criterios de selección de aparatos de maniobra e indicaciones para el proyecto de instalaciones y distribución, "Manual de Baja Tensión", editorial Publicis MCD Verlag, Marcombo Boixareu Editores, 2^{da} edición revisada y ampliada año 2000, 792 Pag.

Comité de electricidad Codelectra, "Código eléctrico Nacional" Covenin 200, Fondonorma, edición 1999, 6^{ta}, venezuela
IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE STD 80-2000, (Revision of IEEE STD 80-1986), Sponsor "Substation Committee of the IEEE Power Engineering Society", Approved 30 January 2000.

Jesús Trashorras Montecelos, Diseño de Instalaciones Eléctricas de Alumbrado, editorial Paraninfo Thomson Learning, 1^{ra} edición año 2002, 565 pag.

Guillén Guedez Guillermo E., "Medición y Estimación de Potenciales en el Terreno Debidos a Inyecciones de Corriente", Proyecto de Grado presentado ante la ilustre Universidad Simón Bolívar como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Electricista, Marzo del 2000, 66 pag.