

CAPÍTULO 1

METODOLOGÍA Y CONCEPTOS BÁSICOS

1. Selección de los edificios.

Para el análisis que se propone se seleccionaron dos dependencias universitarias bajo los siguientes criterios:

- Un edificio nuevo de forma que cumpliera con la normatividad actual y sirviera como base de comparación.
- Un edificio cuyas instalaciones tuvieran más de 20 años de operación y presentara irregularidades respecto a la normatividad vigente.

2. Levantamiento eléctrico.

El levantamiento de cargas eléctricas en el edificio consiste en cuantificar todos los equipos consumidores de energía eléctrica, anotar la demanda eléctrica que la placa datos especifica. El censo o levantamiento de cargas se lleva a cabo por cada uno de los edificios a analizar.

Para conocer el comportamiento energético de los edificios, es necesario llevar a cabo mediciones de parámetros eléctricos y analizar toda esa información con el fin de obtener, en una primera aproximación las curvas características por uso final, factor de carga y patrones de uso.

Esto nos permite ir corrigiendo las estimaciones de los parámetros de los usos finales de la energía por actividad propia del edificio e ir recreando a través de las curvas de carga diaria el comportamiento energético de los edificios, con el fin de obtener un modelo de comportamiento energético y predecir el impacto en el consumo de energía y demanda al variar cualquier uso final del edificio.

Se debe tener en cuenta el envejecimiento de las instalaciones eléctricas, debido a las deficiencias que se presentan como: fugas de energía, pérdidas de aislamiento, aumento de

la carga demandada y como consecuencia en la facturación, operación inadecuada de interruptores, deterioro de equipos, entre otros.

El levantamiento de datos es la etapa de mayor importancia para el buen desarrollo del estudio, debido a que las subsecuentes etapas están fundamentadas en ella.

Se utilizaron como referencias las normas oficiales mexicanas: NOM-001-SEDE-2005 y NOM-007-ENER-2004; la primera contempla las especificaciones y lineamientos mínimos que deben satisfacer las instalaciones eléctricas con la finalidad de garantizar la seguridad de los usuarios y sus propiedades, la segunda establece los niveles de eficiencia energética en términos de Densidad de Potencia Eléctrica de Alumbrado con que deben cumplir los sistemas de alumbrado de edificios no residenciales nuevos, ampliaciones o modificaciones con la finalidad de hacer un uso eficiente de energía por medio de la optimización de diseños y utilización de equipo que aumente la eficiencia energética al mismo tiempo que se cuente con los niveles de iluminancia requerida.

3. Medición de niveles de iluminación.

Adicionalmente, se miden los niveles de iluminación por cada edificio con un equipo especializado, luxómetro, con el fin de seleccionar por medio de un muestreo las áreas por tipo de actividad. Los valores de niveles de iluminación promedio obtenidos son comparados con la normatividad vigente nacional. Asimismo, se analiza su correlación con el índice de potencia por área en iluminación interior.

4. Análisis de Información

Una vez terminada la etapa de medición y recopilación de información se procede al análisis con base en las normas oficiales para verificar su cumplimiento conforme a los procesos de evaluación de conformidad correspondientes.

De la información recabada en la medición de parámetros eléctricos es identificada la demanda máxima y el consumo estimado mensual, así mismo y con la información de planos se obtiene la superficie construida y los indicadores energéticos de consumo y demanda.

De los resultados obtenidos se llevan a cabo ajustes ya sea por horas de uso reportadas o por la demanda de los equipos anotada. Asimismo, se hacen consideraciones por uso, especialmente por sistema o usos finales de la energía.

De las mediciones de nivel de iluminación por dependencia se lleva a cabo un muestreo de los recintos más representativos por tipo de actividad y nuevamente se miden los niveles. Los resultados son correlacionados con el indicador energético de potencia por área en iluminación.

Del levantamiento eléctrico se identifican los circuitos o tableros que están destinados a un sistema para conectar un equipo de medición de parámetros eléctricos, comprobando las estimaciones teóricas.

Para el cálculo del punto de eficiencia máxima de operación de un transformador, de acuerdo a la carga demandada; nos basamos en las tablas 1 y 2 de la NOM-002-SEDE-2007 *“Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución”* con los cuales nos es posible determinar las pérdidas en vacío, las pérdidas debidas a la carga y las pérdidas totales de un transformador, con el fin de obtener un punto en el cual el transformador pueda operar con la eficiencia máxima de acuerdo a su capacidad y a la carga demandada.

5. Diagnóstico Energético

El gran consumo de energía eléctrica en edificios representa una importante área de oportunidad para el ahorro. El continuo crecimiento de cargas en las instalaciones existentes y la falta de mantenimiento adecuado, son causas del uso ineficiente de la energía en este tipo de inmuebles.

Un diagnóstico energético es la aplicación en conjuntos de técnicas que permiten determinar el grado de eficiencia con el que se utiliza la energía; con lo anterior se establece el punto de partida para la implementación de un programa de ahorro de energía.

Existen tres grados de diagnósticos energéticos:

Primer grado: Detectar medidas de ahorro de manera inmediata es decir de forma usual, inspección visual del estado de conservación de las instalaciones y los equipos, análisis de los registros de operación y mantenimiento que rutinariamente se llevan a cabo en la instalación.

Segundo grado: Abarca el diagnóstico de manera visual, más el análisis detallado de los registros históricos de las condiciones de operación de los equipos con el objeto de establecer variaciones de eficiencia.

Tercer grado: Análisis con equipos de medición y control.

1-1 INSTALACIÓN ELÉCTRICA

Se le llama instalación eléctrica al conjunto de elementos que permiten transportar y distribuir la energía eléctrica, desde el punto de suministro hasta los equipos que la utilicen. Entre estos elementos se incluyen: tableros, interruptores, transformadores, bancos de capacitores, sensores, dispositivos de control, cables, conexiones, contactos, canalizaciones, y soportes.

Las instalaciones pueden ser abiertas (conductores visibles), aparentes (en ductos o tubos), ocultas, (dentro de paneles o falsos plafones), o ahogadas (en muros, techos o pisos) o una combinación de ellos.

Objetivos de una instalación.

Una instalación eléctrica debe distribuir la energía eléctrica a los equipos conectados de una manera segura y eficiente. Además algunas de las características que deben de poseer son:

- Confiables.
- Eficientes.
- Económicas.
- Flexibles.
- Simples.

- Seguras.

1-2 COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA

Acometida

Se entiende por el punto donde se hace la conexión entre la red, propiedad de la compañía suministradora, y el alimentador que abastece al usuario. La acometida también se puede entender como la línea aérea o subterránea según sea el caso que por un lado entronca con la red eléctrica de alimentación y por el otro tiene conectado el sistema de medición.

Acometida Aérea

Conductores de entrada de acometida, sistema aéreo, que van desde el último poste u otro soporte aéreo hasta un conector, incluyendo los empalmes, si existen, a los conductores de entrada de acometida en un edificio u otra estructura.

Acometida subterránea

Conductores de acometida subterránea entre la calle principal, incluyendo conductores verticales a un poste u otra estructura o desde el(los) transformadores y el primer punto de conexión de los conductores de entrada de acometida en una caja terminal o de punto de medición u otra caja dentro o fuera de la pared de la edificación. Donde no exista caja de terminales o medición u otro punto de conexión se considera ser un punto de entrada al interior de la edificación de los conductores de acometida.

Alimentador

Todos los conductores de un circuito entre el equipo de acometida o la fuente de un sistema derivado separadamente u otra fuente de alimentación y el dispositivo final de protección contra sobrecorriente del circuito derivado.

Circuito derivado

Conductor o conductores de un circuito desde el dispositivo final de sobrecorriente que protege a ese circuito hasta la o las salidas finales de utilización.

Circuito derivado de uso general

Circuito derivado que alimenta a diversas salidas para alumbrado y electrodomésticos.

Circuito derivado individual

Circuito derivado que alimenta a un sólo equipo de utilización.

Equipos de Medición

Por equipo de medición se entiende a aquél, propiedad de la compañía suministradora, que se coloca en la acometida con el propósito de cuantificar el consumo de energía eléctrica de acuerdo con las condiciones del contrato.

Interruptor

Un interruptor es un dispositivo que está diseñado para abrir o cerrar un circuito eléctrico por el cual está circulando una corriente.

Interruptor general

Se le denomina interruptor general o principal al que va colocado entre la acometida (después del equipo de medición) y el resto de la instalación y que se utiliza como medio de desconexión y protección del sistema o red suministradora.

Luminario

Equipo de iluminación que distribuye, filtra o controla la luz emitida por una lámpara o lámparas y el cual incluye todos los accesorios para fijar, proteger y

operar estas lámparas y los necesarios para conectarlas al circuito de utilización eléctrica.

Motores

Los motores se encuentran al final de las ramas de una instalación y su función es transformar la energía eléctrica en energía mecánica.

Planta de Emergencia

Son elementos que generan energía eléctrica en caso de que el suministro de energía por parte de la compañía suministradora falle, constan de un motor de combustión interna acoplada a un generador de corriente alterna. El cálculo de la capacidad de una planta eléctrica se hace en función con las cargas que deben de operar permanentemente.

Subestación Eléctrica

Es una instalación destinada a modificar y establecer los niveles de tensión de una infraestructura eléctrica, con el fin de facilitar el transporte y distribución de la energía eléctrica.

Sistema de Tierras

Comprende a todos los dispositivos de tierra interconectados dentro de un área específica.

Transformador

El transformador eléctrico es un equipo que se utiliza para cambiar el voltaje de suministro al voltaje requerido. En las instalaciones grandes pueden necesitarse varios niveles de voltaje, lo que se logra instalando varios transformadores (agrupados en subestaciones).

Capacidad Nominal de un Transformador

Se define como los KVA que su devanado secundario es capaz de operar por un tiempo específico, bajo condiciones de tensión y frecuencia de diseño sin que la temperatura promedio de su devanado exceda 65 °C, sobre una temperatura ambiente promedio de 30 °C y máxima de 40°C.

Pérdidas en vacío

Son las pérdidas que se tienen en el transformador cuando está energizado a tensión y frecuencia eléctricas nominales y sin ninguna carga externa.

Pérdidas debidas a la carga

Son las pérdidas que se tienen en un transformador cuando está operando a corriente y frecuencia nominal alimentándolo a la tensión eléctrica de impedancia.

Pérdidas totales

Es la suma de las pérdidas en vacío más las pérdidas debidas a la carga (corregidas a 75°C u 85°C, según corresponda el diseño).

Eficiencia

La eficiencia expresada en por ciento, es la relación que existe entre la potencia real de salida con respecto a la potencia real de entrada, donde la potencia real de salida es igual a la capacidad nominal del transformador.

Tablero

El tablero es un gabinete metálico donde se colocan instrumentos con interruptores arrancadores y/o dispositivos de control. El tablero es un elemento auxiliar para lograr una instalación segura confiable y ordenada.

Tablero general

El tablero general es aquel que se coloca inmediatamente después del transformador y que contiene un interruptor general. El transformador se conecta a

la entrada del interruptor y a la salida de este se conectan barras que distribuyen la energía eléctrica a diferentes circuitos a través de interruptores derivados.

Tablero de alumbrado y control

Panel sencillo o grupo de paneles unitarios diseñados para ensamblarse en forma de un solo panel, accesible únicamente desde el frente, que incluye barras conductoras de conexión común y dispositivos automáticos de protección contra sobrecorriente y otros dispositivos de protección, y está equipado con o sin desconectores para el control de circuitos de alumbrado, calefacción o fuerza; diseñado para instalarlo dentro de un gabinete o caja de cortacircuitos ubicada dentro o sobre un muro o pared divisora y accesible únicamente desde el frente.

Tablero de distribución

Panel grande sencillo, estructura o conjunto de paneles donde se montan, ya sea por el frente, por la parte posterior o en ambos lados, desconectores, dispositivos de protección contra sobrecorriente y otras protecciones, barras conductoras de conexión común y usualmente instrumentos. Los tableros de distribución de fuerza son accesibles generalmente por la parte frontal y la posterior, y no están previstos para ser instalados dentro de gabinetes.

Tubo (conduit)

Sistema de canalización diseñado y construido para alojar conductores en instalaciones eléctricas, de forma tubular, sección circular.

Unión

Conexión permanente de partes metálicas, que no lleva corriente normalmente, que forma una trayectoria eléctricamente conductora que asegure la continuidad y capacidad de conducir con seguridad cualquier corriente eléctrica a la que puedan estar sometidas.

1-3 PROYECTO ELÉCTRICO

Planos, memorias técnico-descriptivas y diagramas correspondientes a una instalación que se ha de construir o a partir de los cuales se ha construido.

Plano Eléctrico

Representación gráfica de las diferentes partes de una instalación eléctrica incluyendo el sistema de alumbrado.

Diagrama Unifilar

Es la representación gráfica como se encuentran distribuidas las cargas de la instalación eléctrica y su función es esquematizar la distribución de tableros, equipos instalados. Así como mostrar datos principales de los circuitos alimentadores como son calibres de conductores, caída de tensión, longitudes, diámetros de tuberías y características de equipos.

Evaluación de la conformidad

La determinación del grado de cumplimiento con las normas oficiales mexicanas o la conformidad con las normas mexicanas, las normas internacionales u otras especificaciones, prescripciones o características. Comprende entre otros, los procedimientos de muestreo, prueba, calibración, certificación y verificación.

Dictamen de verificación

Documento foliado y elaborado en papel seguridad que emite y firma bajo su responsabilidad la Unidad de Verificación, el cual certifica que una instalación eléctrica cumple con la NOM en un momento dado.

Informe técnico

Documentación que incluye el Proyecto Eléctrico, listas de verificación y, en su caso, los informes de las pruebas y mediciones.

Unidad de verificación de instalaciones eléctricas (UVIE)

La persona física o moral acreditada y aprobada que realiza actos de verificación.

Verificación

La constatación ocular o comprobación mediante muestreo, medición, pruebas de laboratorio, o examen de documentos que se realizan para evaluar la conformidad con la NOM-001-SEDE-2005 en un momento determinado.

1-4 PROYECTO DEL SISTEMA DE ALUMBRADO

Conjunto de documentos correspondientes a una instalación del sistema de alumbrado que se ha de construir o a partir de los cuales se ha construido. Los documentos son: planos eléctricos, cuadros carga del sistema de alumbrado, y la memoria de cálculo donde se detallen las densidades de potencia eléctrica por concepto de alumbrado (DPEA), de acuerdo con lo establecido en la NOM-007-ENER-2004; características técnicas de los componentes del sistema de alumbrado (lámparas, balastos, sistemas de control para alumbrado) y el plano general de la edificación que permita determinar el área total iluminada, así como toda la información que pueda ayudar a evaluar el sistema de alumbrado.

Carga total conectada para alumbrado

Es la suma de la potencia en watts, de todos los luminarios y sistemas de iluminación permanentemente instalados dentro de un edificio, para la iluminación general, de acento, localizada, decorativa, etc., incluyendo la potencia del balastro.

Densidad de potencia eléctrica para alumbrado (DPEA)

Índice de la carga conectada para alumbrado por superficie de construcción; se expresa en W/m^2 .

Eficiencia energética (NOM-007-ENER-2004)

Es la que persigue obtener el máximo rendimiento de la energía consumida, a través del establecimiento de valores límite de la DPEA sin menoscabo del confort psicofisiológico de sus ocupantes.

Iluminancia

Es la luminosidad en un punto de una superficie, se define como el flujo luminoso que incide sobre un elemento de la superficie dividido por el área de ese elemento. La iluminancia esta expresada en lux (lx).

1-5 DEFINICIONES COMPLEMENTARIAS

Calidad de la Energía Eléctrica

Cualquier disturbio en los sistemas de energía eléctrica, que se manifiesta en desviaciones de las condiciones adecuadas de tensión, corriente o frecuencia, lo cual resulta en una falla o una mala operación de equipos.

Clasificación a prueba de fuego de una hora en un circuito eléctrico

Al término de una prueba de una hora aplicado una flama sobre un tubo conduit con conductores, estos y su aislamiento, deben estar intactos y funcionando eléctricamente.

Clasificación de resistencia al fuego de una hora en un elemento estructural

En el caso de un muro sometido a una prueba de resistencia al fuego de una hora, el muro debe evitar que un incendio lo atraviese sin importar el daño al mismo.

Conductor desnudo

Conductor que no tiene ningún tipo de cubierta o aislamiento eléctrico.

Conductor de puesta a tierra

Conductor utilizado para conectar un equipo o el circuito puesto a tierra de un sistema de alambrado al electrodo o electrodos de puesta a tierra.

Conductor de puesta a tierra de los equipos

Conductor utilizado para conectar las partes metálicas no conductoras de corriente eléctrica de los equipos, canalizaciones y otras envolventes al conductor del sistema puesto a tierra, al conductor del electrodo de puesta a tierra o ambos, en los equipos de acometida o en el punto de origen de un sistema derivado separadamente.

Desbalances

Los desbalances describen una situación, en la cual las tensiones de una fuente trifásica no son idénticas en magnitud o el desplazamiento entre fases no es de 120 grados eléctricos o ambas. Esto afecta a los motores y otros dispositivos que dependen del adecuado balanceo de la fuente de suministro trifásica.

Efecto Joule

Fenómeno por el cual si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. El nombre es en honor a su descubridor el físico británico James Prescott Joule.

Representa la energía eléctrica que se transforma en calor por segundo en un dispositivo de resistencia R , por el cual circula una corriente i .

Matemáticamente se expresa como:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

Factor de carga

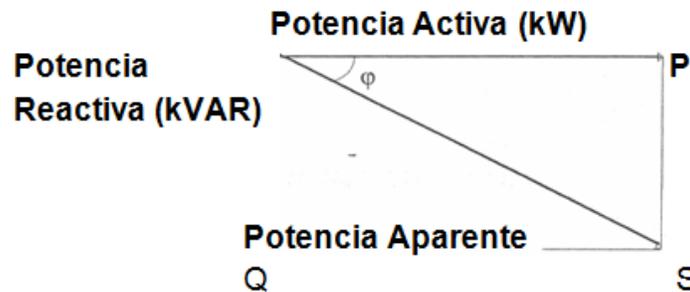
Relación entre la carga media en un sistema durante un período específico de tiempo y la carga máxima que se produzca en ese período.

Factor de demanda

Relación entre la demanda máxima de un sistema o parte del mismo, y la carga total conectada al sistema o a una parte del mismo.

Factor de potencia

Es la relación que existente entre la potencia activa en W y la aparente total en VA. Se obtiene dividiendo la potencia activa entre la potencia aparente. Describe la relación entre la potencia de trabajo y la potencia total consumida.



$$fp = \cos \varphi = \frac{P (kW)}{S (kVA)}$$

Potencia Activa

Es la potencia que representa la capacidad de un circuito para realizar una transformación de la energía en trabajo.

Potencia Reactiva

Es la potencia consumida por los circuitos de corriente alterna con cargas reactiva, no produce trabajo útil, pero se encarga de producir los campos magnéticos en los enrollamientos de cobre de algunos dispositivos como transformadores y motores.

Potencia Aparente

La potencia aparente de un circuito eléctrico de corriente alterna, es la suma de la energía que disipa dicho circuito en cierto tiempo en forma de calor o trabajo y la energía utilizada para la formación de los campos eléctricos y magnéticos de sus componentes.

Pérdidas de Energía

Es toda aquella energía que no se aprovecha en trabajo útil debido a que se disipa por efecto joule o por alguna fuga en la instalación.

Sobrecarga

Funcionamiento de un equipo excediendo su capacidad nominal, de plena carga, o de un conductor que excede su capacidad de conducción de corriente nominal, cuando tal funcionamiento, al persistir por suficiente tiempo puede causar daños o sobrecalentamiento peligroso. Una falla, tal como un cortocircuito o una falla a tierra, no es una sobrecarga sino una sobrecorriente.

Sobrecorriente

Cualquier corriente eléctrica en exceso del valor nominal de los equipos o de la capacidad de conducción de corriente de un conductor. La sobrecorriente puede ser causada por una sobrecarga, un cortocircuito o una falla a tierra.

Puesto a tierra

Conectado al terreno natural o a algún cuerpo conductor que pueda actuar como tal.

Puesto a tierra eficazmente

Conectado al terreno natural intencionalmente a través de una conexión o conexiones a tierra que tengan una impedancia suficientemente baja y capacidad de conducción de corriente, que prevengan la formación de tensiones eléctricas peligrosas a las personas o a los equipos conectados.

1-6 MÉTODOS DE CÁLCULO

1-6-1 CÁLCULO DE CONDUCTORES POR AMPACIDAD

Para el cálculo de las corrientes de los alimentadores se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Para tres fases cuatro hilos:

$$I = \frac{W}{\sqrt{3} * E_L * \cos\phi}$$

(1.1)

$$e\% = \frac{2 * \sqrt{3} * L * I}{S * E_L}$$

(1.2)

- I = Corriente en Amperes por conductor
- w = Potencia en Watts
- E_L = Tensión entre líneas
- cos φ = Factor de potencia
- L = Longitud del conductor en metros
- e% = Caída de Tensión en %
- S = Sección del conductor en mm²

La caída de tensión de un conductor es la diferencia de potencial que existe entre los extremos del mismo.

1-6-2 CÁLCULO DEL SISTEMA DE TIERRAS

La necesidad de contar con una red de tierra en las subestaciones es la cumplir con las siguientes funciones:

Proporcionar un circuito de baja impedancia para las corrientes de tierra ya sea que se deban a una falla de corto circuito o a la operación de un pararrayo sin exceder los límites de operación de los equipos.

Evitar durante la circulación de estas corrientes de tierra en condiciones de corto circuito puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de la subestación lo cual significa un peligro para el personal.

La corriente de corto circuito aportada por el sistema se calcula por medio de la ecuación:

$$I_{cc} = \frac{S_{CC3\phi}}{\sqrt{3} * kV}$$

(1.3)

Donde:

- I_{cc} = Corriente de corto circuito trifásica
- $S_{CC3\phi}$ = Potencia de corto circuito trifásica

Cálculo de la sección transversal del conductor de la malla para tierra:

$$A = \frac{I_{cc}}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a}\right) + 1}{33 T_s}}}$$

(1.4)

Donde:

- T_m = Temperatura máxima permisible en °C.
- T_a = Temperatura ambiente en °C.
- T_s = Duración de la falla en segundos.
- A = Área del conductor en circular mils.

Como el resultado obtenido se encuentra en Circular Mils se utilizará un factor de conversión para obtener la sección transversal en mm².

$$A = (CM) \frac{A}{1CM}$$

(1.5)

Corriente de falla máxima a tierra en la malla:

$$I_{\max \text{ cc}} = (I_{\text{cct-t}})(D_f)(F_p)$$

(1.6)

Donde:

- I_{cc} = Corriente de corto circuito trifásica.
- D_f = Factor de decremento.
- F_p = Factor de proyección.

Factor de reflexión (K):

$$k = \frac{\sigma - \sigma_s}{\sigma + \sigma_s}$$

(1.7)

Donde:

- σ = resistividad del terreno
- σ_s = resistividad de la superficie de contacto

Factor de reducción (F_r):

$$F_r = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{\sigma}{\sigma_s})}{2h_s + 0.09}$$

(1.8)

Donde:

- σ = resistividad del terreno.
- σ_s = resistividad de la superficie de contacto.

- h_s = espesor de la capa de la superficie.

Potenciales tolerable para el cuerpo humano con un peso corporal de 70 [Kg]:

$$E_{contacto} = \frac{(1000 + 1.5 \times C_s \times \sigma_s) 0.157}{\sqrt{t_{falla}}}$$

(1.9)

$$E_{paso} = \frac{(1000 + 6 \times C_s \times \sigma_s) 0.157}{\sqrt{t_{falla}}}$$

(1.10)

Longitud total de las varillas (L_{vt}).

$L_{vt} = \text{No. Varillas} \times l_v$.

Donde:

- l_v = longitud de las varillas.

Longitud total de la malla (L_T) considerando longitud total de las varillas (l_{vt}); (las varillas estarán ubicadas en las esquinas de la malla).

$$L_T = (c_v \times a) + (c_h \times b) + (L_{vt})$$

(1.11)

Área de la malla (A_m):

$$A_m = a \times b$$

(1.12)

Resistencia de la malla (R_g):

Utilizando la fórmula de Sverak para redes de tierra de una subestación recomendada por IEEE.

$$R_g = \sigma \left(\frac{1}{L_T} + \left(\frac{1}{\sqrt{20 \times A_m}} \right) \times \left(1 + \frac{1}{1 + \left(h \times \sqrt{\frac{20}{A_m}} \right)} \right) \right)$$

(1.13)

Factor de esparcimiento para la tensión de malla (km):

$$km = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8hd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{k_{ii}}{k_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right)$$

(1.14)

Donde:

- D = Separación entre conductores.
- h = Profundidad de la red.
- d = diámetro del conducto.

Donde: $k_{ii} = 1$ para mallas con varillas de aterrizaje en sus esquinas.

L_c = longitud total del conductor en la malla

$$L_c = (c_v \times a) + (c_h \times b)$$

(1.15)

L_p = longitud perimetral de la malla

$$L_p = (2 \times a) + (2 \times b)$$

(1.16)

$$n = \frac{2 \times L_c}{L_p}$$

(1.17)

$$k_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

(1.18)

Donde:

- n = Número de conductores equivalente en cualquier dirección.
- h = Profundidad de la malla.
- kh= Factor de corrección relacionado con la malla.
- ho= Profundidad de referencia.

Entonces se obtiene el valor km.

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8hd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{k_{ii}}{k_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right)$$

(1.19)

$$k_i = 0.645 + (0.172 \times n)$$

(1.20)

Donde ki es el factor de corrección para la geometría de la malla, debido a que la corriente tiende irse a la periferia de la red y especialmente hacia las esquinas y km es el factor geométrico.

Se calculan los potenciales de paso y de contacto de la malla:

$$E_{contacto} = \frac{\sigma * k_m * k_i * I_{cc}}{L_T}$$

(1.21)

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D(1-0.5^{n-1})} \right)$$

(1.22)

Donde:

ks = Factor de geometría de la malla

$$E_{paso} = \frac{\sigma * k_s * k_i * I_{cc}}{0.75L_c + 0.85Lvt}$$

(1.23)

Resistividad

Es la propiedad que tiene el suelo para conducir electricidad, la cual está determinada por el tipo de suelo, el contenido de humedad del mismo, su composición química y la temperatura entre otros factores.

La resistividad se mide en ohms-metro; existen dos formas para determinarla, una es de forma empírica mediante la tabulación y conocimiento del terreno y la otra efectuando la medición directamente en el terreno.

Resistencia

Oposición al paso de la corriente eléctrica.

Tensión de malla

Es la máxima tensión de contacto dentro de una malla en una rejilla para tierra.

Tensión de paso

Es la diferencia de potencial que puede experimentar una persona con los pies separados a 1 metro de distancia y sin hacer contacto con algún objeto aterrizado.

Tensión de contacto

Es la diferencia de potencial entre la elevación del potencial de tierra y el potencial superficial en el punto en donde una persona esta parada mientras al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura metálica aterrizada.

Elevación del potencial de tierra

Es el máximo potencial eléctrico que una rejilla para tierra en una subestación puede alcanzar con relación a un punto de tierra distante, asumiendo que esté al potencial de la tierra remota. Este potencial es igual a la corriente máxima de rejilla multiplicado por la resistencia de la rejilla.

Tierra

Conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por la cual un circuito eléctrico o equipo está conectado al suelo o algún cuerpo conductor de gran extensión y que sirve en lugar del suelo.

Electrodo para Tierra

Conductor embebido en el suelo y utilizado para coleccionar la corriente a tierra o para disipar la corriente de tierra hacia el suelo.

Método De Wenner

Para efectuar la medición de resistividad del suelo es necesario hacer circular una corriente por el mismo, el método más usual es el de Frank-Wenner denominado también “de los cuatro electrodos”, el equipo utilizado es el megger de tierra y la medición se efectúa como se muestra en la siguiente figura.

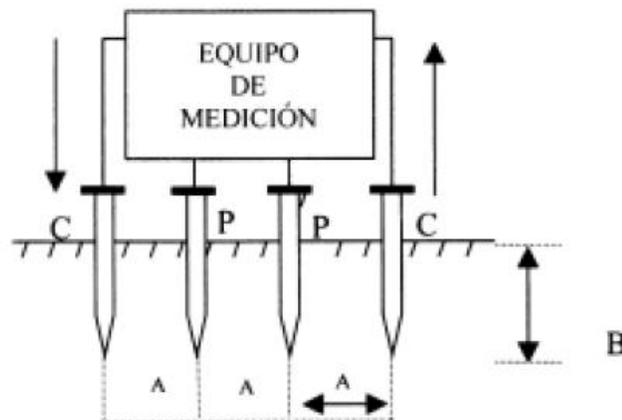


Figura 1 Método de Wenner para la medición de la resistividad

Donde:

A = separación entre varillas adyacentes en m

B = Profundidad de los electrodos en m

C = Electrodo de Corriente

P = Electrodo de potencial

Si la longitud B es mucho menor que la longitud A es decir cuando la relación A/B sea mayor o igual a 20, puede suponerse B=0 y la formula se reduce a:

$$\rho = 2\pi ar [\Omega m] \quad (1.24)$$

Donde:

ρ = resistividad del terreno

a = área del terreno

r = resistencia del terreno

1-6-3 CÁLCULO DEL CALIBRE ÓPTIMO DEL CONDUCTOR

Para la selección del área de sección transversal de un conductor eléctrico se realizan los siguientes cálculos:

1. Capacidad de conducción de corriente
2. Caída de tensión
3. Cortocircuito

Estos tres puntos anteriores se refieren al cálculo tradicional para un circuito alimentador o derivado, pero no se toma en cuenta el gasto de operación, que se traduce en pérdidas eléctricas por efecto joule que presentan, tomando en cuenta estas consideraciones el cálculo del calibre óptimo toma en consideración los dos factores anteriores.

$$\begin{aligned} &\text{Calculo Tradicional (costo cables) + Gasto de operación (costo perdidas por} \\ &\quad \text{calor)} \\ &= \text{Calibre óptimo (ahorro de energía)} \end{aligned}$$

Pérdidas en el Conductor

Las pérdidas en el conductor se calculan tomando en cuenta la corriente que circula por el mismo, la longitud, horas de operación y los factores de carga y de pérdidas, se calcula conforme a la ecuación (1.25):

$$W_c = I^2 \times R_{CA} \times 10^{-3} \times L \times N \times H \times F_p \text{ [kWh/año]} \quad (1.25)$$

Donde:

I = Corriente demandada por la carga

R_{CA} = Resistencia del conductor en c.a. a la temperatura de operación del cable [Ω/km]

L = Longitud del circuito en km

N = Número de cables del sistema

H = Horas efectivas de operación del sistema

F_p = Factor de pérdidas; $F_p = 0.3 F_c + 0.7 (F_c)^2$

F_c = Factor de carga por unidad

1-6-4 CÁLCULO DEL PUNTO DE EFICIENCIA MÁXIMA PARA UN TRANSFORMADOR

Para el cálculo del punto de eficiencia máxima de operación de un transformador, de acuerdo a la carga demandada y con base en los datos de las tablas 1 y 2 de la NOM-002-SEDE-2007, se diseñó un programa en Matlab para el cálculo de dicho punto:

$$\eta = \frac{C \times S \times \cos \phi_{carga}}{C \times S \times \cos \phi_{carga} + P_0 + C^2 \times P_{cc}}$$

(1.26)

La expresión (1.26) muestra que la eficiencia depende de la potencia de la carga que se conecte, su factor de potencia y las pérdidas propias del transformador (de vacío y de plena carga). Esta eficiencia no será constante para todos los grados de carga conectada, y alcanzará su máxima eficiencia en un grado de carga tal que las pérdidas de vacío igualen a las pérdidas de plena carga, según la expresión (1.27):

$$C_{\eta\text{máx}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}}$$

(1.27)

Donde:

$C_{\eta\text{máx}}$ Es el porcentaje de la capacidad nominal del transformador en que se presenta la máxima eficiencia.

P_0 Pérdidas en vacío del transformador

P_{cc} Pérdidas debidas a la carga

A continuación se presenta la demostración de la expresión anterior:

Si R_{eq} es la resistencia equivalente de los devanados primario y secundario referidos al lado secundario,

$$R_{eq} = R_1 \left(\frac{N_1}{N_2} \right) + R_2$$

(1.28)

De aquí para cualquier corriente de carga I_2 se tiene:

$$\text{pérdidas totales } RI^2 = R_{eq}I_2^2$$

(1.29)

Y la eficiencia quedará como:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{V_2 I_2 \times f.p.}{V_2 I_2 \times f.p. + P_0 + R_{eq} I_2^2} \\ &= \frac{V_2 \times f.p.}{V_2 \times f.p. + P_0 / I_2 + R_{eq} I_2} \end{aligned}$$

(1.30)

Para un transformador normal V_2 es aproximadamente constante; de aquí para una carga con un factor de potencia dado, la eficiencia es máxima cuando el denominador de la ecuación anterior tiene un valor mínimo, por lo tanto, si derivamos el denominador tenemos:

$$\frac{d}{dI_2} (V_2 \times f.p. + P_0 / I_2 + R_{eq} I_2) = 0$$

Resolviendo la ecuación queda:

$$-P_o/I_2^2 + R_{eq} = 0$$

$$I_2^2 R_{eq} = P_o$$

(1.32)

Para verificar que esta condición dé el valor mínimo y no el máximo del denominador en la ecuación de la eficiencia, la expresión anterior debería ser diferenciada con respecto a I_2 , así que:

$$\frac{d}{dI_2} (-P_o/I_2^2 + R_{eq}) = 2 P_o/I_2^3$$

Puesto que la cantidad es positiva, la expresión anterior es la condición para los valores mínimos en el denominador de la eficiencia y por lo tanto el valor máximo de la eficiencia. De aquí que la eficiencia es máxima cuando las pérdidas variables I^2R son iguales a las pérdidas del núcleo (pérdidas en vacío) que son constantes.

Normalmente, la máxima eficiencia se logra para cargas menores a la potencia nominal del transformador. Estas consideraciones y la estimación del grado de carga del transformador, arrojarán criterios que permitirán saber cuál es la mejor opción, de modo que la elección no pase sólo por el precio de compra, sino que también por los costos de operación de cada equipo en evaluación, que pueden llegar al cabo de algunos meses a ser del orden del precio de compra del transformador.

A continuación se muestra el programa diseñado para el cálculo del punto de eficiencia máxima, así como la variación que presenta la eficiencia bajo diversos factores de potencia:

```
%Programa para el cálculo del punto de eficiencia máxima del transformador
%Potencia nominal del transformador en W
Ptraf=112500;
%Corriente nominal del transformador
Inom=Ptraf/(1.7321*220);
%Pérdidas en vacío en W de acuerdo a tabla 2 de la NOM-002-SEDE-2007
Po=405;
%Pérdidas totales máximas en W de acuerdo a tabla 2 de la NOM-002-SEDE-2007
Ptmax=1713;
%Pérdidas debidas a la carga (máximas)
Pc=Ptmax-Po;
%Vector de corriente en función de la carga
```

```

I=0:0.1:Inom;
% Constante para el cálculo de pérdidas debidas a la carga (RI^2)
% Depende de la capacidad nominal del transformador
k=Pc/(Inom^2);
% Cálculo de las pérdidas debidas a la carga
% en función del cuadrado de la corriente
Pcc=(I.^2)*k;
% Carga demandada en por unidad
C=I./Inom;
% Gráfica de las pérdidas debidas a la carga vs. demandada en por unidad
plot(C,Pcc,'r');
title ('\bfCálculo del punto de eficiencia máxima del transformador');
xlabel ('\bfPorcentaje de carga');
ylabel ('\bfPérdidas en W');
hold on
% Gráfica de las pérdidas en vacío vs porcentaje de carga
plot(C,Po,'g');
% Cálculo de las pérdidas Totales (en función del porcentaje de carga)
PT=Pcc+Po;
% Cálculo y gráfico del punto de máxima eficiencia
% (intersección de las pérdidas en vacío con las pérdidas eléctricas)
Cmax=sqrt(Po/Pc);
hold on
plot(Cmax,Po,'ko');
hold on
plot(C,PT,'b');
% Cálculo y gráfico de la eficiencia de operación, con variación de carga
% se muestran las gráficas con factor de potencia 1,0,9,0,8,0,7,0,5,0,3
Efop=((C.*(Ptraf/1000))./(C.*(Ptraf/1000)+(Po/1000)+C.^2*(Pc/1000))*100);
figure
plot(C,Efop,'r');
title ('\bfEficiencia del transformador con variación de la carga');
xlabel ('\bfPorcentaje de carga (pu)');
ylabel ('\bfEficiencia (%)');
hold on
Efop2=((C.*(Ptraf/1000)*0.9)./(C.*(Ptraf/1000)*0.9+(Po/1000)+C.^2*(Pc/1000))*100);
plot(C,Efop2,'y');
hold on
Efop3=((C.*(Ptraf/1000)*0.8)./(C.*(Ptraf/1000)*0.8+(Po/1000)+C.^2*(Pc/1000))*100);
plot(C,Efop3,'g');
hold on
Efop4=((C.*(Ptraf/1000)*0.7)./(C.*(Ptraf/1000)*0.7+(Po/1000)+C.^2*(Pc/1000))*100);
plot(C,Efop4,'b');
hold on
Efop5=((C.*(Ptraf/1000)*0.5)./(C.*(Ptraf/1000)*0.5+(Po/1000)+C.^2*(Pc/1000))*100);
plot(C,Efop5,'m');
hold on
Efop6=((C.*(Ptraf/1000)*0.3)./(C.*(Ptraf/1000)*0.3+(Po/1000)+C.^2*(Pc/1000))*100);
plot(C,Efop6,'k');
hold on

```

Con las gráficas que se obtendrán en cada capítulo podemos observar el efecto que tiene un bajo factor de potencia en la eficiencia, la cual tiende a disminuir. Sin embargo con cualquier factor de potencia, el punto en el cual se obtiene la máxima eficiencia es el mismo que se calculó previamente.