



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

GUÍA PARA EL DISEÑO DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE UNA FÁBRICA DE ENVASES DE PLÁSTICO

Karl Ulrich Seifert Hopun

Asesorado por el Ing. Enrique Ruíz Carballo
Guatemala, octubre de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GUÍA PARA EL DISEÑO DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE UNA
FÁBRICA DE ENVASES DE PLÁSTICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

KARL ULRICH SEIFERT
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**GUÍA PARA EL DISEÑO DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE UNA
FÁBRICA DE ENVASES DE PLÁSTICO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 25 de noviembre de 2005


Karl Ulrich Seifert

Guatemala,
28 de septiembre del 2006

Ingeniero
Francisco Javier González López
Coordinador Área Básica
Escuela Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
USAC

Señor Coordinador:

Atentamente me dirijo a usted, para informarle que he llevado a cabo la revisión del trabajo de graduación denominado: GUÍA PARA EL DISEÑO DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE UNA FÁBRICA DE ENVASES DE PLÁSTICO, presentado por el estudiante KARL ULRICH SEIFERT, previo a optar al título de Ingeniero Electricista.

Me complace así mismo, informarle que el presente trabajo hace una importante aportación a la Ingeniería Eléctrica y será de mucha utilidad para los profesionales que se dediquen a diseño y/o mantenimiento de plantas industriales.

Finalmente, debo expresarle que el desarrollo del trabajo y las conclusiones del mismo, son responsabilidad del autor y del asesor.

Sin otro particular me es grato suscribirme,

Atentamente,


Ing. Enrique Ruíz Carballo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



Guatemala, 29 de septiembre 2006.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**GUÍA PARA EL DISEÑO DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE
UNA FÁBRICA DE ENVASES DE PLÁSTICO**, desarrollado por el
estudiante; Karl Ulrich Seifert, por considerar que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador Área de Electrotécnica

FJGL/sro



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Karl Ulrich Seifert titulado: **GUÍA PARA EL DISEÑO DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE UNA FÁBRICA DE ENVASES DE PLÁSTICO**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 06 DE OCTUBRE 2,006.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.422.2006

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **GUÍA PARA EL DISEÑO DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE UNA FÁBRICA DE ENVASES DE PLÁSTICO**, presentado por el estudiante universitario **Karl Ulrich Seifert Hopun**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, Octubre 25 de 2006

/gdech

Todo por ti, Carolina Mta
Dr. Carlos Martínez Durán
2006: Centenario de su Nacimiento

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ASPECTOS GENERALES	1
1.1 Características de una fábrica de envases de plástico	1
1.1.2 Equipo básico de una fábrica de envases de plástico	2
1.2 Requerimientos para el establecimiento de una fábrica de envases de plástico	4
1.3 Lineamientos generales	7
2. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA	9
2.1 Requerimientos básicos de una instalación eléctrica	9
2.2 Calidad y seguridad de una instalación eléctrica	13
2.3 Prueba inicial de la instalación	13
3. ANÁLISIS DE LAS CARGAS	15
3.1 Características de la potencia de las cargas instaladas	15
3.1.1 Motores de inducción	15
3.2 Equipo de calefacción resistivo y lámparas incandescentes (convencionales o halógenas)	17

4.	DETERMINACIÓN DE LA CARGA DE LA INSTALACIÓN	21
4.1	Potencia instalada (kW)	22
4.2	Potencia aparente (kVA)	22
4.3	Estimación de la demanda de potencia aparente (kVA)	24
4.3.1	Factor de utilización máxima (ku)	24
4.3.2	Factor de simultaneidad (ks)	24
4.3.2.1	Factor de simultaneidad para tableros de distribución	25
4.4	Ejemplo de la aplicación de los factores ks y ku	26
4.5	Elección del transformador	29
4.6	Elección del suministro de potencia	30
5.	LA SUBESTACIÓN	33
5.1	Procedimiento para el establecimiento de una subestación	33
5.2	Información preeliminar	34
5.3.	Estudios del proyecto	35
5.4.	Implementación	36
6.	ASPECTOS DE PROTECCIÓN	37
6.1	Protección contra cargas eléctricas (shocks eléctricos)	38
6.1.1	Protección contra contacto directo	38
6.1.2	Protección contra contacto indirecto	39
6.2	Protección de transformadores y de circuitos	
6.2.1	Lineamientos generales de protección	40
6.2.2	Protección de transformadores	40
6.2.3	Influencia de las cargas en el transformador	41
6.2.4	Protección contra fallas internas en los transformadores	42

6.3	Protección de circuitos	43
7.	SUBESTACIÓN CON MEDICIÓN EN BAJO VOLTAJE	47
7.1.	Elección del equipo de switcheo del panel de alto voltaje HV para el circuito del transformador	49
7.1.1	Elección del transformador de medio voltaje/bajo voltaje MV/LV	49
7.1.1.1	Características eléctricas de un transformador	50
7.1.1.2	Características con relación a la tecnología y la utilización del transformador	51
7.2	Elección de la tecnología	52
7.2.1	Determinación de la potencia óptima	52
7.2.1	Orificios de ventilación	53
7.3	Subestación con medición en el lado de alto voltaje	55
7.3.1	Subestación con generadores	57
7.4	Operación en paralelo de transformadores	60
7.4.1	Condiciones para la operación de transformadores en paralelo	61
8.	CONSTITUCIÓN DE SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN DE ALTO/BAJO VOLTAJE HV/LV	63
8.1	Subestación en interiores	63
8.1.1	Conexiones de servicio e interconexiones de equipo	65
8.2	Subestaciones en exteriores	
8.2.1	Subestaciones con gabinetes	67
8.2.2	Subestaciones sin gabinetes	67
8.3	Subestaciones montadas en postes	68

9.	ESQUEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE BAJO VOLTAJE LV	69
9.1	Esquemas principales de distribución en bajo voltaje LV	69
9.2	Selección de un esquema de distribución	70
10.	ESQUEMAS DE CONEXIONES A TIERRA	75
10.1	Definiciones	75
10.2	Conexiones a tierra	
10.2.1	El sistema de unión equipotencial principal.	76
10.2.2	Conexiones equipotenciales suplementarias	77
10.2.3	Conexión de partes conductoras expuestas a los electrodos a tierra	77
10.3	Definiciones de esquemas de tierra estandarizados	77
10.4	Sistema TT (neutro aterrizado)	78
10.5	Sistema TN (partes conductoras expuestas conectadas al neutro)	79
10.6	Sistema TN-C	79
10.7	Sistema TN-S	81
10.8	Sistema TN-C-S	81
10.9	Sistema IT (neutro aislado)	82
10.9.1	Sistema IT (neutro con impedancia a tierra)	84
10.10	Características de los sistemas TT, TN e IT	84
10.11	Criterios de selección para los sistemas TT, TN e IT	87
10.12	Implementación del sistema de tierras	93
10.12.1	División de la fuente	93
10.12.2	Islas en la red	93
10.12.3	Conclusión	94

11. TABLEROS DE DISTRIBUCIÓN	99
11.1 El sistema de instalación	99
11.2 Tipos de tableros de distribución	100
11.3 Cables y vías para los cables	
11.3.1 Definiciones	102
11.3.2 Identificación de conductores	102
11.3.3 Métodos de distribución e instalación	103
12. LA PROTECCIÓN DE CIRCUITOS	105
12.1 Procedimiento para la selección de los cables y equipo de protección para un circuito	106
12.2 Protección contra sobre corrientes	108
13. DETERMINACIÓN DE LA CAÍDA DE VOLTAJE EN CONDUCTORES	115
13.1 Cálculo de la caída de voltaje en condiciones de carga estable	116
13.1.1 Cálculo simplificado para determinar la caída de voltaje en conductores	118
14. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO	125
14.1 Métodos para calcular la impedancia total Z_T	126
15. FACTOR DE POTENCIA Y HARMÓNICAS	131
15.1 Mejoramiento del factor de potencia y filtración de armónicas	131
15.2 Factor de potencia	132

15.3	Principios para mejorar el factor de potencia	134
15.3.1	Capacitores fijos	135
15.3.2	Bancos de capacitores automáticos	136
15.4	Harmónicas en sistemas de potencia	136
15.4.1	Origen de las harmónicas	139
15.4.2	Filtros pasivos	142
15.4.3	Filtros activos	144
15.4.4	Filtros híbridos	145
15.5	Indicadores de distorsión harmónica	145
15.5.1	Factor de potencia	146
15.5.2	Factor de picos	146
15.5.3	Valores de potencia y harmónicas	147
15.5.4	Espectro harmónico y distorsión harmónica	148
15.5.5	Distorsión harmónica total (THD)	150
15.5.6	Utilidad de los diferentes indicadores	151
15.6	Equipo utilizado para medir los indicadores	152
15.7	Procedimiento para el análisis harmónico de la red de distribución	153
15.8	Soluciones para atenuar harmónicas	154
15.8.1	Soluciones básicas	155
15.8.2	Filtración de harmónicas	159
15.8.3	Criterios de selección	162
	CONCLUSIONES	165
	RECOMENDACIONES	167
	BIBLIOGRAFÍA	169

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Ejemplo para la demostración en la estimación de la demanda de una instalación	28
2. Discriminación entre la operación de fusibles de alto voltaje HV y el disparo del cortacircuito de bajo voltaje LV para la protección de transformadores	44
3. Ventilación natural	54
4. Arreglo típico de paneles de switcheo para medición en bajo voltaje	64
5. Las dos topologías básicas de esquemas de distribución	70
6. Sistema TT	79
7. Sistema TN-C	80
8. Sistema TN-S	81
9. Sistema TN-C-S	82
10. Sistema IT	83
11. Sistema IT (neutro aislado)	83
12. Ejemplo para el cálculo de la corriente máxima de carga I_b	107
13. Protección por medio de corta circuitos y fusibles	110
14. Niveles de corriente para determinar el corta circuitos o las características de los fusibles	111
15. Ejemplo 1 para el cálculo de la caída de voltaje	120
16. Ejemplo 2 para el cálculo de la caída de voltaje	123
17. Diagrama unifilar mostrando la impedancia del circuito de alimentación para una armónica de orden h	140

18. Instalación que alimenta una carga no lineal donde sólo se toma en cuenta el fenómeno con la frecuencia de 60 Hz	141
19. Misma instalación en la que sólo se muestra el efecto de la armónica de orden h	141
20. Flujo de corrientes armónicas en una red de distribución	142
21. Espectro armónico para una señal rectangular para un voltaje $U(t)$	149
22. Posicionamiento de las cargas no lineales lo más cerca a la fuente posible	155
23. Agrupando las cargas no lineales y una conexión lo más cerca a la fuente como sea posible	156
24. Alimentar cargas lineales por medio de transformadores separados	157
25. Principio de operación de un filtro pasivo	160
26. Principio de operación de un filtro activo	161
27. Principio de operación de un filtro híbrido	162

TABLAS

I. Potencia aparente nominal estándar para transformadores HV/LV y su corriente de salida nominal	30
II. Características de los sistemas de tierra	88
III. Caída de voltaje fase a fase ΔU para un circuito en voltios amperios por kilómetro	119

GLOSARIO

- IEC** International Electrotechnical Commission, *Comisión Electrotécnica Internacional*. Es una organización que trata tecnologías eléctricas y electrónicas. Algunos de sus estándares son desarrollados conjuntamente con ISO, Organización Internacional para las Estandarizaciones.
- IEEE** Institute of Electrical and Electronic Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. Es una organización internacional sin fines de lucro para el mejoramiento de la tecnología relacionada con la electricidad.
- NEC** National Electric Code, Código Nacional Eléctrico. Conjunto de reglas publicadas por la Asociación de Protección contra Incendios de los Estados Unidos, NFPA National Fire Protection Association, que proveen requerimientos para la instalación de equipo eléctrico y su cableado.
- PET** politereftalato de etileno, tipo de material plástico utilizado para hacer envases para alimentos y bebidas, así como para otras aplicaciones termoformadas.

RESUMEN

El diseño de la instalación eléctrica de una fábrica de envases de plástico requiere de muchas fases. Este trabajo contiene los principales factores a tomar en cuenta para lograr un diseño que se ajuste a las necesidades de una instalación eléctrica.

Los primeros dos capítulos tratan de las generalidades de una fábrica de envases de plástico, así como de los criterios básicos para el diseño de una instalación eléctrica. Los siguientes dos capítulos tratan acerca de el análisis de cargas y de cómo determinar la carga de la instalación para poder dimensionar adecuadamente la subestación. El dimensionamiento de la subestación es muy importante y se deben tomar en cuenta futuras expansiones de la fábrica para el mismo. También, es necesario escoger, adecuadamente, el sistema de tierras para proteger los equipos y el personal.

Los últimos capítulos tratan acerca de la protección de los circuitos contra corrientes elevadas. Es importante que los voltajes en las terminales de la carga se mantenga dentro de los límites de la misma para su óptimo desempeño.

El último capítulo trata acerca de las armónicas en una instalación eléctrica y su efecto en el desempeño de las cargas. Debido al amplio uso que, actualmente, tienen los componentes electrónicos de potencia se han incrementado los efectos de armónicas en los sistemas de potencia. La presencia de armónicas causa distorsión en las ondas de voltaje o de corriente. Éstas distorsiones pueden causar sobrecargas y envejecimiento prematuro de generadores, transformadores y de motores.

OBJETIVOS

Generales

- 1 Proporcionar un documento que reúna los fundamentos técnicos necesarios para poder diseñar una instalación eléctrica para una fábrica de envases de plástico, la cual debe ser confiable, económica y segura.
- 2 Aplicar los conocimientos de Ingeniería en las ramas de subestaciones, generación, iluminación, etc.

Específicos

- 1 Elaborar un documento que sea útil al ingeniero que va a diseñar, así como al que va a realizar trabajos de mantenimiento.
- 2 Describir equipo del campo de la industria de envases de plástico.
- 3 Hacer hincapié en las normas de seguridad para una instalación eléctrica.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo es una guía para los profesionales de la Ingeniería Eléctrica que se dedican al diseño, inspección o mantenimiento de instalaciones eléctricas con base a códigos y normas internacionales, como lo son: los estándares de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC).

Esta guía contiene lineamientos generales que incluyen normas y técnicas que serán de gran valor para el profesional que se dedica a éstas actividades, así como algunos ejemplos para mostrar la aplicación de las técnicas utilizadas en el diseño de una instalación para una fábrica de envases de plástico.

El diseño de una instalación eléctrica para una fábrica es muy laboriosa, desde la elección de la fuente de alimentación, determinación y coordinación en la protección de los circuitos, equipos y del personal, elección del sistema de tierras, etc. La protección de circuitos equipos y del personal es un factor que debe tomarse en cuenta a lo largo de todo el diseño..

Una fábrica de envases de plástico que posee equipo deberá protegerse, adecuadamente, para evitar su mal funcionamiento. También, se muestra un ejemplo para poder dimensionar, adecuadamente, la fuente de alimentación tomando en cuenta factores como el factor de uso continuo o de simultaneidad. Estos factores ayudan para el cálculo de la demanda de la instalación.

Debido al uso actual de componentes electrónicos de potencia, la presencia de armónicas es muy común en una instalación eléctrica moderna. El uso de filtros o elementos que permiten su atenuación es importante para atenuar las armónicas.

Todos éstos factores ayudarán al profesional en el diseño de una instalación confiable y segura y prolongarán la vida de los equipos.

1. ASPECTOS GENERALES

1.1 Características de una fábrica de envases de plástico

Una fábrica de envases de plástico es un establecimiento donde se elaboran envases de plástico, los cuales pueden ser utilizados para empacar alimentos, medicamentos, productos de higiene personal o del hogar, etc.

Para que las actividades se puedan desarrollar adecuadamente, es necesario que las instalaciones estén especialmente diseñadas para ello.

Este tipo de fábrica esta compuesta de varia áreas entre las que se puede mencionar el área de producción, de administración, de bodega, de mantenimiento. Cada una de estas áreas tendrá sus propias necesidades en cuanto a las características de la instalación eléctrica de las mismas.

Entre el equipo que se puede encontrar en una fabrica de envases de plástico están las sopladoras; en las cuales se fabrican los envases plásticos a partir de la materia prima utilizada para la elaboración de los mismos, las inyectoras en las cuales se pueden elaborar las tapaderas de los envases y también las preformas de los envases PET, los compresores que proporcionan el aire comprimido que las sopladoras requieren para formar los envases.

También está el sistema de enfriamiento utilizando agua, el cual utiliza agua fría para enfriar los moldes de las inyectoras y sopladoras en las cuales se elaboran los envases y las tapaderas de los mismos. Se utilizan torres de enfriamiento para enfriar el agua y mantenerla a una temperatura adecuada para su uso.

También puede contar con una o varias máquinas para la elaboración de los moldes, estas máquinas permiten el diseño de nuevos moldes por medio de un diseño asistido por una computadora.

La fábrica puede contar con su propia subestación dependiendo del tamaño de la misma. El área de producción será la más importante por ser el área donde habrá mayor consumo de energía. Así la instalación eléctrica en general deberá tomar en cuenta la protección del equipo para prolongar la vida del mismo, y también deberá de ser segura para garantizar la seguridad del personal que labora en la misma.

1.1.1 Equipo básico de una fábrica de envases de plástico

a) Compresores de aire: Los compresores de aire proporcionan la fuente de aire para las sopladoras. Para producción de botellas de plástico generalmente se adoptan compresores del tipo de intercambio gradual (tipo pistón), que están compuestos de cilindros de 3 ó 4 etapas para comprimir el aire a una presión de salida entre 10 a 40 barras.

Para el soplado de envases PET usualmente se requieren entre 20-40 barras de presión, pero para conducir la máquina de envases PET se requieren solamente 8 barras de presión. Por lo tanto se requieren 2 tipos de compresores de aire, uno para suministrar el aire a alta presión para el soplado de los envases y otro para el aire a baja presión para conducir la máquina.

b) Sopladoras e inyectoras de plástico y máquinas de envases PET: En las sopladoras se sopla cualquier producto plástico como botellas. Las inyectoras forman productos plásticos como por ejemplo las tapaderas, sillas plástica, cepillos plásticos, etc. Actualmente los envases PET están reemplazando a las botellas de vidrio en la industria alimenticia y de bebidas. Los envases PET tienen la ventaja de ser prácticamente indestructibles, fáciles de transportar, bajo costo y fácil producción y reciclado.

c) Torres de enfriamiento o 'chillers': Las torres de enfriamiento se utilizan para mejorar el acabado liso de los productos plásticos terminados y reducir tensiones internas. El agua fría que circula por los moldes de las sopladoras ayudan al desmoldamiento de los productos terminados. Las torres de enfriamiento también se utilizan para enfriar toda clase de aceites lubricantes y aceite de transmisiones hidráulicas para controlar con mejor exactitud la temperatura del aceite y mejorar la precisión del proceso.

d) Granulador: El granulador es una máquina para granular el plástico a un tamaño adecuado para su uso en las máquinas. Productos defectuosos pueden granularse para volver a utilizar el plástico para formar nuevos productos.

e) MDL (Sistema de secado y carga automática del material): El MDL es una máquina que seca y remueve humedad del material utilizado en las inyectoras como productos PET, y también alimenta el material a la inyectora.

f) Purificador de aire: Debido a que el polvo y el aceite en el aire comprimido afecta la calidad de los productos plásticos se recomienda un purificador de aire para limpiar el aire. El purificador de aire consiste de un enfriador de aire, secador de aire y filtros.

El purificador de aire debe instalarse entre el compresor y la máquina.

1.2 Requerimientos para el establecimiento de una fábrica de envases de plástico

Requerimientos legales:

Son los requerimientos legales que una fábrica deberá cumplir para establecerse en Guatemala. Se deberá tener una evaluación del impacto ambiental extendida por la Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA.

Requerimientos generales:

Son los que debe cumplir cualquier fábrica sin importar el tipo de productos que se desean fabricar.

Requerimientos específicos

La planta de envases de plástico deberá, en lo posible, ser diseñada por un equipo de profesionales de las diferentes disciplinas involucradas para permitir la planificación adecuada de las diferentes áreas para la manufactura de los diferentes tipos de envases plásticos.

Las distintas operaciones de la fábrica, se realizarán dentro de áreas específicamente definidas con tamaño, iluminación y ventilación adecuadas. Estas áreas podrán ser separadas o definidas para los distintos procesos que se realizan, a fin de prevenir la confusión.

Entre estas áreas están:

1. Área Administrativa: Es el área utilizada para la recepción, manejo y egreso de documentos relacionados con la producción. Tendrá equipo de oficina como computadoras, teléfonos, fotocopiadoras y cualquier otro equipo necesario para este tipo de actividades.

a) Área social: Es el área destinada para la preparación y consumo de alimentos de los trabajadores de la fábrica. Entre el equipo que encontramos en este lugar están: refrigeradora, horno microondas, cafeteras, etc.

b) Área de servicios auxiliares: Aquí se encontrara los baños para damas y caballeros, los cuales deben tener iluminación adecuada y deberán estar diseñados para que su limpieza sea sencilla. Deberán estar provistos de toallas, jabón y papel higiénico. Podrá también tener secadoras de manos. Deberá contar con iluminación suficiente y ventilación adecuada.

2. Área de bodega: Será el área utilizada para almacenar el producto terminado. Deberá contar con tarimas para almacenar el producto y para facilitar su transporte hacia los camiones para su posterior despacho.

a) Devoluciones: Aquí se almacenaran los productos devueltos a la fábrica y que se encuentran pendientes de la decisión por parte del departamento de control de calidad.

b) Almacenamiento de moldes: Es el área específica para almacenar los moldes y tornillos utilizados para el montaje de los mismos para evitar el daño o deterioro de los mismos. Deberá tener una caretila para facilitar el transporte de los moldes hacia el lugar en que se encuentran las sopladoras e inyectoras.

c) Área de mantenimiento: Será el lugar destinado para realizar las reparaciones que las maquinas y demás equipo de la fabrica puedan requerir. Entre el equipo en esta área están, torno, soldadora, barreno, esmeril, etc.

3. Área de manufactura: Es el área donde se elaboran los envases de plástico. Aquí se encontraran las sopladoras e inyectoras.

a) Área de enfriamiento: Aquí se encontraran las torres de enfriamiento utilizadas para enfriar el agua que se utiliza para enfriar los moldes en los cuales se forman los envases plásticos. También aquí podrán estar los compresores que proporcionan el aire comprimido necesario para formar los envases plásticos.

1.3 Lineamientos generales

a) Construcciones

Los edificios utilizados en la manufactura empaque o almacenamiento de los productos serán del tamaño, construcción y ubicación adecuados para facilitar la limpieza, mantenimiento y operaciones adecuadas.

Los pisos, paredes, ventanas y techos de las áreas deberán ser lisos y ser contruidos con material que no desprenda polvo, que sea impermeable y resistente a oxidación, desgaste u otro deterioro. Deben facilitar la limpieza y ser impermeables al agua y productos desinfectantes. La construcción debe impedir el acceso de roedores, insectos y otras plagas.

El flujo de materias primas y productos terminados a través de las distintas áreas, deber ser a manera que se evite el transito innecesario. El flujo fácil de personal y materiales permitirá reducir el riesgo de confusión entre los diferentes productos e impedirá la omisión de cualquier fase de fabricación y de inspección.

b) Iluminación

La iluminación deberá ser adecuada en todas las áreas. Las lámparas deberán contar con protectores de fácil limpieza y que impidan la acumulación de polvo y de otros contaminantes.

c) Ventilación

Todas las áreas dentro de la fábrica deberán contar con ventilación adecuada para evitar la acumulación de aire contaminado.

d) Tuberías, cañerías y drenajes

La fábrica deberá contar con suministro de agua suficiente que permita su adecuado funcionamiento. Básicamente el agua a utilizarse en la producción será el agua que se utiliza para el enfriamiento de los moldes. El área de servicios y de lavandería así como el área social contarán con suficiente agua potable. La red de cañerías de agua potable tendrá una distribución adecuada a las necesidades de la fábrica.

2. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA

2.1 Requerimientos básicos de una instalación eléctrica

El estudio de una instalación eléctrica requiere un entendimiento de las leyes y regulaciones vigentes. Estas regulaciones pueden ser códigos de manufactura, regulaciones de instituciones profesionales, estándares nacionales e internacionales para las instalaciones como por ejemplo el IEC, estándares nacionales e internacionales para los equipos.

El objetivo de una instalación eléctrica es prestar servicio eléctrico a una carga o un conjunto de cargas en forma adecuada, confiable y económica. Actualmente se toman en cuenta los estándares de seguridad IEC 60364 y 60479-1 para cualquier instalación eléctrica alrededor del mundo.

El voltaje en las cargas debe ser un valor adecuado para permitir el correcto funcionamiento de los equipos, dentro de un rango aceptable de fluctuación. Estos rangos de fluctuación, se pueden dividir en zonas favorables y zonas tolerables. En la zona favorable el equipo operará satisfactoriamente. La zona tolerable está por encima y por debajo de la zona favorable, y se reconoce como parte normal del rango de voltaje que puede presentarse con alguna frecuencia.

Los equipos son capaces de trabajar en esta zona de una manera más o menos aceptable. La instalación eléctrica debe diseñarse de manera que se evite en lo posible la ocurrencia de valores de voltaje que caen en esta zona.

Voltajes en el punto de utilización (IEEE)

voltaje nominal	zona favorable	zona tolerable
120	110-125	107-127
120/240	110/220-125/250	107/214-127/254
120/208	114/197-125/216	111/193-127/22
240	220-250	210-254
480	440-500	420-510

Las pérdidas de voltaje no deberán ser mayores al 5% desde la entrada del servicio hasta el punto más lejano de la instalación para que el voltaje en la carga se encuentre en la zona favorable.

Los factores a tomar en cuenta para el diseño de la instalación eléctrica son:

a) Determinación de la demanda instalada

La demanda total de potencia se puede calcular con los datos relativos a la localización y potencia de cada carga junto con los conocimientos de los modos de operación (demanda en estado estable, condiciones de arranque, operación no simultánea, etc.)

Con estos datos se establece la potencia requerida para la instalación eléctrica. Se determinara el tipo de subestación necesario para la instalación. La subestación podrá ser construida en interiores o exteriores conforme a los estándares y regulaciones relevantes.

b) Distribución de la instalación en la instalación de bajo voltaje

Toda la red de distribución se estudia como un sistema completo. Se definirán el número y características de las plantas de emergencia. El sistema de tierras se escogerá de acuerdo a las regulaciones y limitaciones de la fuente de potencia y al tipo de cargas.

El equipo de la distribución (tableros, dispositivos de distribución, conexiones del circuito) se determinan de los planos del edificio y de la localización y agrupamiento de las cargas. El tipo de premisas y su localización pueden influenciar su inmunidad a los disturbios externos.

d) Circuitos

Cada circuito se estudiara en detalle. Desde las corrientes de las cargas, el nivel de corriente de corto circuito y el tipo de dispositivo de protección. Así se determinará el tipo de conductor tomando en cuenta la naturaleza del tubo de conducción y su influencia en la capacidad de los conductores.

Antes de adoptar un tipo de conductor se deben satisfacer los siguientes requerimientos:

- La caída de voltaje cumple con el valor relevante.
- El arranque de los motores es satisfactorio.
- Se satisface la protección contra cargas eléctricas.

Se determinará la corriente de corto circuito I_{sc} y se revisará la capacidad térmica y electrodinámica del circuito.

Estos cálculos pueden indicar que sea necesario utilizar un conductor más grande del que fue escogido originalmente.

e) Protección contra sobrevoltaje

Los rayos atmosféricos directos o indirectos pueden dañar el equipo eléctrico a una distancia de varios kilómetros. Las variaciones en el voltaje de operación y en la frecuencia pueden producir las mismas consecuencias. Estos efectos deberán examinarse y se propondrán las soluciones adecuadas.

f) Mejoramiento del factor de potencia y filtración de armónicas

Es importante considerar el factor de potencia de una instalación eléctrica, ya que las empresas distribuidoras aplican penalizaciones por tener un factor de potencia por debajo del 90 por ciento, lo que implicará un sobre costo por el servicio de energía eléctrica.

La corrección del factor de potencia podrá llevarse a cabo localmente, globalmente o una combinación de ambos métodos.

La armónicas en la instalación afectan la calidad de la energía y son la causa de sobrecargas, vibraciones, envejecimiento del equipo, fallas en equipo sensible, redes de teléfonos, redes de área local, etc.

2.2 Calidad y seguridad de una instalación eléctrica

La calidad y seguridad de una instalación eléctrica se logrará solamente si:

- a) La instalación eléctrica esta conforme a los estándares y regulaciones.
- b) El equipo eléctrico cumple con los estándares.
- c) Si se cumple con la revisión periódica de la instalación recomendada por el fabricante del equipo.

2.3 Prueba inicial de la instalación

Antes que la instalación eléctrica pueda conectarse a la red de potencia se deben llevar a cabo pruebas e inspecciones visuales muy estrictas.

Estas pruebas se realizarán de acuerdo a las regulaciones existentes en el país. Los principios de estas regulaciones están basados en observar reglas de seguridad en el diseño y la realización de la instalación.

Las pruebas visuales y de inspección típicamente incluirán:

- a) Pruebas de aislamiento de todos los cables y conductores de la instalación, entre fases y entre fases y neutro.
- b) Pruebas de continuidad, conductividad y de aterrizaje de los conductores.
- c) Pruebas de resistencia de electrodos de tierra con respecto a la tierra remota.
- d) Número de tomas permitido en cada circuito.
- e) Chequeo del área transversal de los conductores de acorde a la corriente de corto circuito, tomando en cuenta los dispositivos de protección, materiales, condiciones de la instalación (en el aire, conduit, etc.)
- f) Verificación de que todas las partes metálicas expuestas estén apropiadamente aterrizadas donde sea apropiado.
- g) Revisar espacio entre baños, etc.

El objeto de todas estas pruebas es asegurar un nivel satisfactorio de calidad el cual asegurara un desempeño libre de problemas.

3. ANÁLISIS DE LAS CARGAS

3.1 Características de la potencia de las cargas instaladas

Es importante hacer un análisis de la potencia de las cargas que se van a instalar.

El análisis de la potencia aparente requerida por cada carga permitirá:

- a) Una demanda de potencia declarada que permitirá el contrato para el suministro de energía eléctrica.
- b) La determinación del transformador de alto/bajo voltaje requerido. Tomando en cuenta un posible aumento en la carga requerida.
- c) Niveles de la corriente de carga en cada tablero de distribución.

3.1.1 Motores de inducción

La demanda de corriente de un motor de inducción está dado por la siguiente fórmula:

Motor de 3 fases: $I_a = P_n \times 1000 / (\sqrt{3} \times U \times \eta \times \cos \varphi)$

Motor de 1 fase: $I_a = P_n \times 1000 / (u \times \eta \times \cos \varphi)$

Donde:

I_a = demanda de corriente en amperios

P_n = potencia nominal (en kW)

U = voltaje entre fases para motores trifásicos y voltaje entre terminales para motores monofásicos. Un motor monofásico puede conectarse fase a neutro o fase a fase.

η = eficiencia en por unidad (salida kW/ entrada kW)

$\cos\phi$ = factor de potencia (entrada kW/ entrada kVA)

El valor máximo de la corriente subtransitoria puede ser bastante elevado. Valores típicos son entre 12 y 15 veces la corriente rms nominal. Algunas veces este valor puede alcanzar 25 veces la corriente nominal.

Si la protección de sobre corriente se dispara inesperadamente durante el arranque significa que la corriente de arranque excede los valores normales. Consecuentemente se reduce la vida o se destruye el equipo. Para evitar esto se debe considerar el sobredimensionamiento de la protección.

Muchas veces es ventajoso por razones técnicas o económicas reducir la corriente suministrada a los motores de inducción. Esto se puede lograr con capacitores sin afectar la salida de potencia de los motores. La aplicación de este mecanismo se conoce como corrección del factor de potencia o mejoramiento del factor de potencia.

La potencia aparente (kVA) se puede reducir significativamente conectando capacitores en paralelo. La reducción de los kVA significa una reducción de la corriente de entrada ya que el voltaje permanece constante.

La compensación de potencia reactiva se recomienda en motores que operan durante largos períodos a potencia reducida.

El factor de potencia esta dado por $\cos\phi = \text{entrada kW} / \text{entrada kVA}$ por consiguiente la reducción de la potencia aparente mejorará el factor de potencia.

La corriente suministrada al motor después de la corrección del factor de potencia está dada por:

$$I = I_a \cos\phi / \cos\phi'$$

donde $\cos\phi$ es el factor de potencia antes de la compensación y $\cos\phi'$ es el factor de potencia después de la compensación e I_a es la corriente nominal.

3.2 Equipo de calefacción resistivo y lámparas incandescentes (convencionales o halógenas)

La corriente de un equipo de calefacción o de una lámpara incandescente se obtiene fácilmente de la potencia nominal P_n dada por el fabricante ($\cos\phi = 1$).

Las corrientes están dadas por:

caso trifásico: $I_a = P_n / (\sqrt{3} \times U)$

caso monofásico: $I_a = P_n / U$

donde U es el voltaje entre terminales del equipo.

Para un lámpara incandescente el uso de un gas halógeno permite una fuente de luz más concentrada. La salida de luz es mayor y se dobla la vida de la lámpara.

En el momento del encendido, el filamento frío produce un breve pero muy intenso aumento de la corriente.

a) Lámparas fluorescentes:

La potencia P_n (watts) indicada en las lámparas fluorescentes no incluye la potencia disipada en el balastro.

La corriente está dada por:

$$I_a = (P_n(\text{balastro}) + P_n) / (U \times \cos \varphi)$$

donde U es el voltaje aplicado a la lámpara con el balastro. Si no se da un valor para la pérdida de potencia del balastro se puede utilizar un valor del 25 por ciento de la potencia nominal P_n .

b) Lámparas fluorescentes tubulares Standard:

cuando no se indique:

$\cos \varphi = 0.6$ cuando no hay capacitor para la corrección del factor de potencia

$\cos \varphi = 0.86$ con corrección (tubos simples o dobles)

$\cos \varphi = 0.96$ para balastro electrónico

Si no se indica la pérdida de potencia del balastro se puede utilizar un valor del 25 por ciento de la potencia nominal P_n .

c) Lámparas fluorescentes compactas:

Las lámparas fluorescentes compactas tienen las mismas características en cuanto a economía y durabilidad que las lámparas convencionales. Se usan frecuentemente en corredores, pasillos, salones, etc.

d) Lámparas de descarga:

Estas lámparas dependen de la descarga luminosa eléctrica a través de un gas o vapor de un compuesto metálico, el cual está herméticamente sellado en una envoltura a una presión predeterminada. Estas lámparas tienen un tiempo de encendido largo durante el cual la corriente de arranque es mayor a la corriente nominal.

4. DETERMINACIÓN DE LA CARGA DE LA INSTALACIÓN

Para poder diseñar una instalación eléctrica es necesario determinar la demanda de potencia en el sistema de potencia.

Basar el diseño simplemente en la suma aritmética de todas las cargas existentes en la instalación es antieconómico y una mala práctica de ingeniería.

El objetivo de este capítulo es mostrar como algunos factores tomando en cuenta la diversidad (la no utilización simultánea de algunas cargas de un grupo dado) y la utilización (un motor eléctrico generalmente no se opera a su capacidad de plena carga) de las cargas existentes permitirán determinar la carga.

Además de proporcionar datos para el diseño de los circuitos individuales, los resultados proporcionarán un valor global para la instalación. Así se obtendrán los datos para los requerimientos del proveedor de potencia (red de distribución, transformador de alto/bajo voltaje, o sistema de generación).

4.1 Potencia instalada (kW)

La potencia instalada (kW) es la suma de todas las potencias de todos los equipos. En la práctica esta potencia no es la potencia que será suministrada. En los motores eléctricos por ejemplo la potencia dada se refiere a la potencia de salida en el eje de transmisión. La potencia de entrada obviamente será mayor. Así también en las lámparas fluorescentes o de descarga con balastos la potencia dada en la lámpara es menor a la potencia consumida por la lámpara y su balastro.

La demanda de potencia (kW) es necesaria para determinar la potencia de un sistema de generación o una batería.

Para el suministro de potencia de una red pública ya sea de bajo voltaje (LV) o a través de un transformador de alto/bajo voltaje (HL/LV) la potencia a considerar es la potencia aparente (kVA)

4.2 Potencia aparente (kVA)

Normalmente se asume la potencia instalada como la suma aritmética de todas las cargas individuales. Sin embargo la potencia total (kVA) estimada no es igual a la potencia (kVA) real instalada.

El consumo de potencia aparente de una carga individual se obtiene de su corriente nominal dada (corregida si es necesario como por ejemplo en el caso de un motor eléctrico) y aplicando los siguientes coeficientes:

η = eficiencia en por unidad = entrada kW/salida kW

$\cos \varphi$ = factor de potencia = kW/kVA

La demanda de potencia aparente kVA de la carga:

$$P_a = P_n / (\eta \times \cos \varphi)$$

De este valor la corriente de plena carga de la carga I_a consumida por la carga será:

$$I_a = (P_a \times 1000) / V$$

para una carga conectada de fase a neutro y

$$I_a = (P_a \times 1000) / (\sqrt{3} \times U)$$

para una carga trifásica balanceada, donde

V = voltaje de fase a neutro (volts)

U = voltaje de fase a fase (volts)

Se debe notar que los kVA de la potencia aparente no es la suma aritmética de los kVA nominales de las cargas individuales (a menos que todas las cargas tengan el mismo factor de potencia).

Sin embargo es común en la práctica hacer una simple suma cuyo resultado dará un valor de kVA que excede el valor real por un margen aceptable.

4.3 Estimación de la demanda de potencia aparente (kVA)

No todas las cargas necesariamente operarán al mismo tiempo o a plena carga. Los factores k_u y k_s permitirán determinar la potencia máxima y potencia aparente requeridas para dimensionar la instalación.

4.3.1 Factor de utilización máxima (k_u)

En condiciones normales de operación el consumo de potencia de una carga es algunas veces menor que el indicado por su potencia nominal. Esto justifica la aplicación del factor de utilización k_u en la estimación de valores reales.

Este factor debe aplicarse a cada carga en forma individual poniendo especial atención a los motores eléctricos, los cuales rara vez son operados a plena carga.

En una instalación industrial, este factor se puede estimar en un valor promedio de 0.75 para los motores. Para cargas de luz incandescentes este factor es siempre 1.0. Para cargas conectadas a los tomacorrientes este factor depende de la carga misma conectada a dicho tomacorriente.

4.3.2 Factor de simultaneidad (k_s)

Es un hecho de la experiencia común, que la operación simultánea de todas las cargas de una instalación nunca ocurre en la práctica. Siempre hay un grado de diversidad y este hecho se toma en cuenta con el factor de simultaneidad (k_s).

El factor k_s se aplica a cada grupo de cargas (ya sean de un tablero de distribución o subdistribución). La determinación de estos factores es responsabilidad del diseñador, ya que requiere un conocimiento detallado de la instalación y las condiciones en que cada circuito será utilizado.

4.3.2.1 Factor de simultaneidad para tableros de distribución

A continuación se dan valores de k_s para tableros de distribución que suministran a un cierto número de circuitos. Si el circuito es puramente de iluminación se toma un valor de k_s cerca de la unidad.

Factor de simultaneidad para tableros de distribución (IEC 60439)

Número de circuitos	Factor de simultaneidad (k_s)
2 y 3	0.9
4 y 5	0.8
6 a 9	0.7
10 y más	0.6

Factor de simultaneidad de acuerdo a la función del circuito:

Función del circuito	Factor de simultaneidad (ks)
iluminación	1
calefacción y aire acondicionado	1
tomacorrientes	0.1 a 0.2
motores:	
para el motor más potente	1
segundo motor más potente	0.75
para todos lo motores	0.6

4.4 Ejemplo de la aplicación de los factores ks y ku

A continuación se muestra en un ejemplo para la estimación de la demanda de kVA en todos los niveles de la instalación.

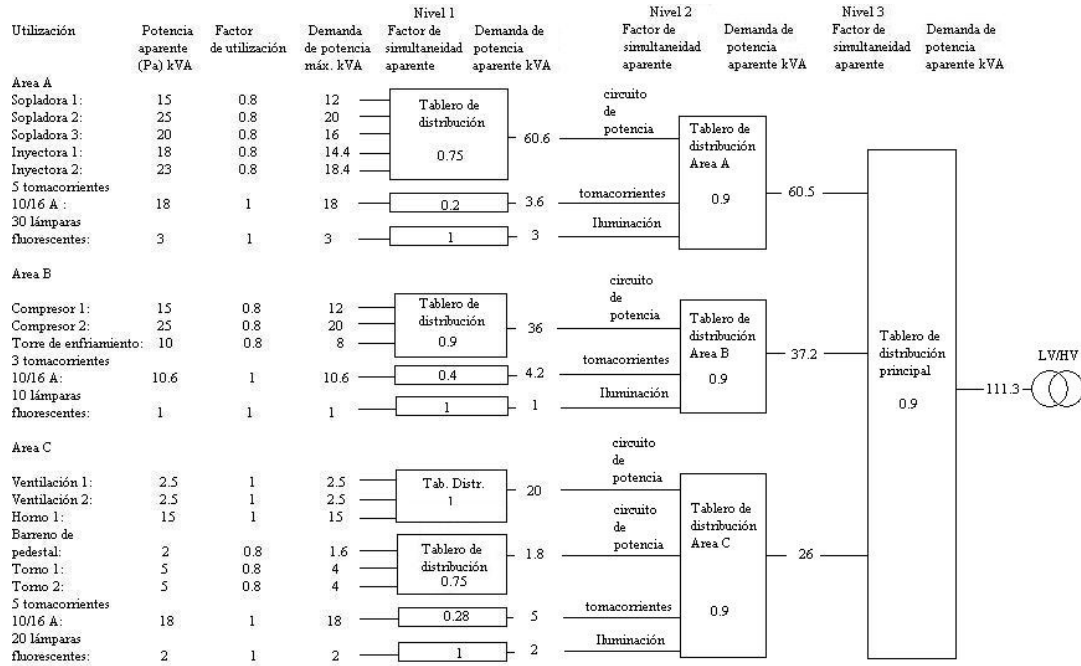
En este ejemplo la demanda total instalada de potencia aparente es de 203 kVA, que corresponde a un valor estimado en las terminales de bajo voltaje LV del transformador HV/LV de 111.3 kVA.

Para determinar el tamaño de los cables para los circuitos de distribución de la instalación, la corriente I (amperios) a través del circuito se determina a partir de la ecuación:

$$I = (kVA \times 1000) / (U \times \sqrt{3})$$

donde kVA es la potencia aparente trifásica máxima mostrada en el diagrama para el circuito en cuestión y U es el voltaje fase a fase en voltios.

Figura 1: Ejemplo para la demostración en la estimación de la demanda de una instalación



4.5 Elección del transformador

Cuando la instalación va a ser alimentada directamente por un transformador HV/LV y ya se ha determinado la máxima potencia aparente de la instalación, se puede elegir el transformador adecuado para la instalación tomando en cuenta los siguientes factores:

- a) La posibilidad de mejorar el factor de potencia de la instalación.
- b) Anticipación de ampliaciones en la instalación.
- c) Limitaciones de la instalación (por ejemplo temperatura).

La corriente nominal de plena carga (I_n) en el lado de bajo voltaje LV de un transformador está dada por:

$$I_n = (P_a \times 1000) / (U \times \sqrt{3})$$

donde:

P_a = kVA nominales del transformador

U = voltaje fase a fase sin carga en voltios (237 V ó 410V)

I_n = corriente nominal en amperios

Para un transformador monofásico:

$$I_n = (P_a \times 1000) / V$$

donde:

V = voltaje entre terminales sin carga en voltios.

Tabla I: Potencia aparente nominal estándar para transformadores HV/LV y su corriente de salida nominal

Potencia aparente (kVA)	In (A)	
	237V	410V
100	244	141
160	390	225
250	609	352
315	767	444
400	974	563
500	1218	704
630	1535	887
800	1949	1127
1000	2436	1408
1250	3045	1760
1600	3898	2253
2000	4872	2816
2500	6090	3520
3150	7673	4436

4.6 Elección del suministro de potencia

Para la fuente de potencia principal, generalmente la elección está entre una conexión en alto voltaje HV o en bajo voltaje LV a la red de energía de la empresa proveedora de electricidad.

En la práctica es necesaria la conexión en alto voltaje cuando la carga excede (o se espera que exceda) 250 kVA.

Además si la instalación puede causar disturbios en la red de energía a los consumidores vecinos por estar conectada en bajo voltaje LV, las autoridades propondrán una conexión en alto voltaje HV.

Las ventajas de una conexión en alto voltaje HV son:

- a) No se ve afectada por otros consumidores como en el caso de una conexión en bajo voltaje LV.
- b) Es libre de escoger cualquier tipo de sistema de red de tierras de bajo voltaje LV.
- c) Tiene una más amplia variedad de elección de tarifas económicas.
- d) Puede aceptar grandes incrementos de carga.

Se debe notar sin embargo que el consumidor es el dueño de la subestación HV/LV y la debe instalar el mismo. El consumidor tiene acceso solamente al lado de bajo voltaje LV de la instalación, el acceso al lado de alta tensión está reservado para el personal de la empresa proveedora de electricidad (lectura de medidores, operaciones, etc.).

El tipo y la ubicación de la subestación será en común acuerdo entre el consumidor y la empresa proveedora de electricidad.

5. LA SUBESTACIÓN

5.1 Procedimiento para el establecimiento de una subestación

Cuando se ha tomado la decisión de proveer energía eléctrica por medio de una conexión de alto voltaje existen dos métodos utilizados:

1. La empresa de distribución de energía eléctrica construye una subestación cerca del consumidor, pero los transformadores de alto/bajo voltaje se encuentran dentro de la instalación cerca del centro de carga.
2. El consumidor construye y equipa su propia subestación dentro de su propio establecimiento y la empresa proveedora hace la conexión de alto voltaje HV.

En el método 1 la empresa proveedora es dueña de la subestación, los cables de los transformadores, los transformadores y tiene acceso libre a los mismos.

Las siguientes consideraciones se refieren al procedimiento 2.

5.2 Información preeliminar

Antes de iniciar negociaciones y discusiones con la empresa proveedora se deben establecer los siguientes elementos básicos:

1. Determinación de la demanda de potencia aparente máxima:

La determinación de este parámetro se discutió en el capítulo 4, y debe tomar en consideración posibles aumentos de la carga instalada. Los factores a tomar en cuenta son el factor de utilización k_u y el factor de simultaneidad k_s .

2. Planos de diseño y elevación mostrando la ubicación de la subestación propuesta:

Los planos deben mostrar los medios de acceso a la subestación propuesta, con las dimensiones de posibles restricciones, como por ejemplo dimensiones de entradas, corredores y del techo, junto con limitaciones de peso.

Tomando en cuenta que:

El personal de la empresa proveedora debe tener acceso al equipo de alto voltaje de la subestación.

Sólo personal autorizado debe tener acceso a la subestación.

3. Grado de la continuidad del servicio:

El consumidor debe estimar las consecuencias de una falla en el suministro de energía en términos de su duración, tomando en cuenta la pérdida en la producción y la seguridad del personal y del equipo.

5.3. Estudios del proyecto

Con la información suministrada por el consumidor la empresa proveedora deberá indicar:

1. El tipo de suministro de potencia propuesto, ya sea con cables expuestos o subterráneos.
2. Detalles de la conexión del servicio, servicio monofásico, alimentadores en paralelo, etc.
3. Limite de potencia kVA y corriente de falla.
4. El voltaje nominal existente o futuro dependiendo en el desarrollo del proyecto.
5. Detalles de medición que indicarán el costo de conectarse a la red de potencia así como detalles de la tarifa.

5.4. Implementación

Antes de empezar con el trabajo de la instalación se debe obtener la aprobación oficial de la empresa proveedora. La solicitud de aprobación debe contener principalmente la siguiente información basada en los intercambios preeliminares mencionados anteriormente.

- a) Ubicación de la subestación.
- b) Diagrama unifilar de los circuitos de potencia y las conexiones, junto con propuestas de circuitos de tierra.
- c) Detalle completo del equipo a instalarse incluyendo características de desempeño.
- d) Arreglos para el mejoramiento del factor de potencia en caso de ser necesario.
- e) Arreglos para planta de emergencia en caso de ser necesaria.

Antes de energizar la instalación se deberán realizar algunas pruebas de verificación:

- a) Medición de la resistencia de los electrodos de tierra.
- b) Continuidad de todos los conductores equipotenciales de tierra y de seguridad.
- c) Inspección y prueba de todos los componentes HV.
- d) Chequeo del aislamiento de todo el equipo HV.
- e) Prueba del dieléctrico del transformador si se aplica.
- f) Inspección y prueba de la instalación LV de la subestación.

Cuando ya se hayan cumplido con todas las revisiones el personal de la empresa proveedora energizará la instalación y verificará la correcta operación del equipo de medición del consumo.

El contratista de la instalación es el responsable de la prueba de la instalación de bajo voltaje LV.

6. ASPECTOS DE PROTECCIÓN

El tema de protección en la industria de energía eléctrica es muy amplio cubriendo desde aspectos en la seguridad del personal hasta la protección contra daños a propiedades en la planta y en el equipo.

Estos diferentes aspectos se pueden clasificar en acorde a los siguientes objetivos:

- a) Protección de personal y de animales contra los peligros de sobrevoltaje y de shocks eléctricos, fuego, explosiones, gases tóxicos, etc.
- b) Protección de la planta, equipo y componentes de un sistema de potencia contra la fatiga de corrientes de cortocircuito, cargas atmosféricas (rayos) e inestabilidad en el sistema de potencia (pérdida de sincronismo, etc.).
- c) Protección del personal y del equipo de los peligros debido a la operación incorrecta de los sistemas de potencia, mediante el uso de switches mecánicos o eléctricos entrelazados. Todos los mecanismos de switcheo (incluyendo, por ejemplo, switches selectores de tap en los transformadores) tienen límites de operación definidos. Esto significa que el orden en que el equipo de switcheo puede abrirse y cerrarse con seguridad es vitalmente importante. Muy frecuentemente se utilizan llaves entrelazadas y circuitos analógicos para asegurar el cumplimiento estricto de las secuencias de operación.

6.1 Protección contra cargas eléctricas (shocks eléctricos)

La protección contra cargas eléctricas están basadas en dos peligros comunes:

- a) Contacto con un conductor activo o vivo con respecto a tierra en condiciones normales. Esto se conoce como peligro por contacto directo.
- b) Contacto con una parte conductora de un equipo que normalmente está muerto, pero que se está vivo por falla en el aislamiento del aparato. Esto se conoce como peligro por contacto indirecto.

Se debe notar que puede existir un tercer tipo de peligro contra descargas eléctricas en la proximidad de electrodos de alto o bajo voltaje o mixtos por los que circulan corrientes de falla a tierra. Este peligro se debe a los gradientes potenciales en la superficie del suelo. La corriente pasa por un pie al otro, y es extremadamente peligroso para animales de cuatro patas. Una variación de este peligro se presenta, cuando una pieza metálica aterrizada se sitúa en un área donde existe el gradiente de potencial. El tocar esta pieza metálica causaría que la corriente pase por la mano hacia los dos pies.

6.1.1 Protección contra contacto directo

La forma principal de protección contra peligros por contacto directo es contener a todas las partes vivas en encapsulados de material aislante o metálicos aterrizados.

Cuando las partes vivas están en un gabinete metálico, por ejemplo en transformadores, motores y muchos aparatos domésticos, la parte metálica se conecta al sistema de protección de tierra de la instalación.

Para equipo de bajo voltaje LV se logra la protección con el tercer pin de un tomacorriente de 3 pines. La pérdida total o parcial del aislamiento al metal puede aumentar el voltaje del gabinete metálico a un valor peligroso.

6.1.2 Protección contra contacto indirecto

Una persona que toca el gabinete metálico de un aparato con aislamiento defectuoso se dice que está haciendo contacto indirecto. Un contacto indirecto se caracteriza por el hecho de que existe un paso para la corriente a tierra a través del conductor a tierra en paralelo con la corriente de shock a través de la persona.

Para el caso de instalaciones en bajo voltaje, pruebas han demostrado que si el potencial del gabinete metálico con respecto a tierra o a cualquier material conductor es menor a 50V , no existe peligro.

Si la falla de aislamiento es entre un conductor de alto voltaje HV y el gabinete metálico generalmente no es posible limitar el aumento de voltaje a 50V o menos reduciendo la resistencia de tierra a un valor menor. La solución en este caso es crear una situación equipotencial.

6.2 Protección de transformadores y de circuitos

6.2.1 Lineamientos generales de protección

El equipo eléctrico y los circuitos en una subestación se deben proteger para evitar el daño debido a corrientes y/o voltajes anormales. Todo el equipo normalmente utilizado en instalaciones de potencia tienen tiempos de respuesta estandarizados para sobre-corrientes y sobre-voltajes. El papel del sistema de protección es asegurar que éstos tiempos de respuesta nunca se excedan. En general, esto significa que las condiciones de falla deben suprimirse lo más pronto posible para asegurar la coordinación del equipo de protección del equipo a protegerse. Esto significa que si hay una falla en una red eléctrica, generalmente varios dispositivos ven la falla al mismo tiempo, pero sólo uno debe actuar.

Estos dispositivos pueden ser:

- a) Fusibles que liberan la falla directamente o junto con un disparador mecánico, el cual abre un switch de 3 fases que libera las cargas asociadas a él.
- b) Relevadores que actúan indirectamente en la bobina del cortacircuitos.

6.2.2 Protección de transformadores

Los aumentos de voltaje que pueden ocurrir en la instalación eléctrica son:

- a) Descargas atmosféricas debido al impacto de un rayo en o cerca de una línea.
- b) Aumentos de voltaje de operación.

Un cambio repentino en las condiciones de operación establecidas en una red eléctrica causa que ocurran fenómenos transitorios. Éstos son generalmente alta frecuencia o un aumento en la onda de voltaje amortiguada.

Para ambos aumentos de voltaje, el dispositivo de protección generalmente usado es el varistor (óxido de zinc). En la mayoría de los casos, los dispositivos de protección contra sobrevoltaje no afectan los equipos de conmutación o de switcheo.

6.2.3 Influencia de las cargas en el transformador

La sobrecarga de un transformador se origina frecuentemente por la demanda coincidente de un número de cargas pequeñas, o por el aumento en la demanda de potencia aparente (kVA) debido a una expansión en la empresa . Los aumentos en la carga aumentan la temperatura de los conductores y de los materiales aislantes. Esto da como resultado una disminución en la vida de trabajo de los equipos. Los dispositivos de protección contra sobrecargas se pueden localizar en el lado primario o secundario del transformador.

La protección contra sobrecargas de los transformadores se provee actualmente mediante un relevador digital, el cual actúa para disparar el cortocircuitos en el secundario del transformador. Este tipo de relevador conocido generalmente como relevador de sobrecargas térmico, simula artificialmente la temperatura, tomando en cuenta la constante de tiempo del transformador. Algunos de ellos son capaces de tomar en cuenta los efectos de las corrientes armónicas debido a cargas no lineales (rectificadores, equipo de cómputo, controles de velocidad variable, etc.) Este tipo de relevador también es capaz de predecir el tiempo antes de dispararse y el tiempo de espera después de dispararse.

Los transformadores en aceite grandes tienen termostatos con dos posiciones, una como medio de alarma y otro para dispararse.

Los transformadores en seco usan sensores de temperatura en la parte más caliente del embobinado para alarma y para el disparo.

6.2.4 Protección contra fallas internas en los transformadores

La protección de los transformadores contra los efectos de fallas internas se provee por medio de transformadores que están equipados con tanques con toma de aire y que están equipados con un relevador mecánico. Estos relevadores pueden detectar una acumulación de gases que se originan por el arqueo de fallas en el aislamiento del embobinado o por el ingreso de aire debido a una fuga de aceite. El primer nivel de detección generalmente sólo dispara una alarma, pero si ésta situación se deteriora aún más, el segundo nivel de detección disparará el cortacircuitos.

Una cortocircuito interno de fase a fase se detecta y se libera por medio de 3 fusibles en el lado primario del transformador, o por un relevador de sobre-corriente que dispara un cortocircuito en la instalación antes del transformador.

La falla interna fase a tierra es la falla más común en los transformadores. Ésta debe detectarse por medio de un relevador de falla a tierra. La corriente de falla a tierra se puede calcular por la suma de las 3 corrientes primarias de fase (si se utiliza un transformador de 3 fases) o por la corriente principal si es un transformador monofásico.

6.3 Protección de circuitos

La protección de los circuitos después del transformador debe de hacerse según los requerimientos IEC 60364.

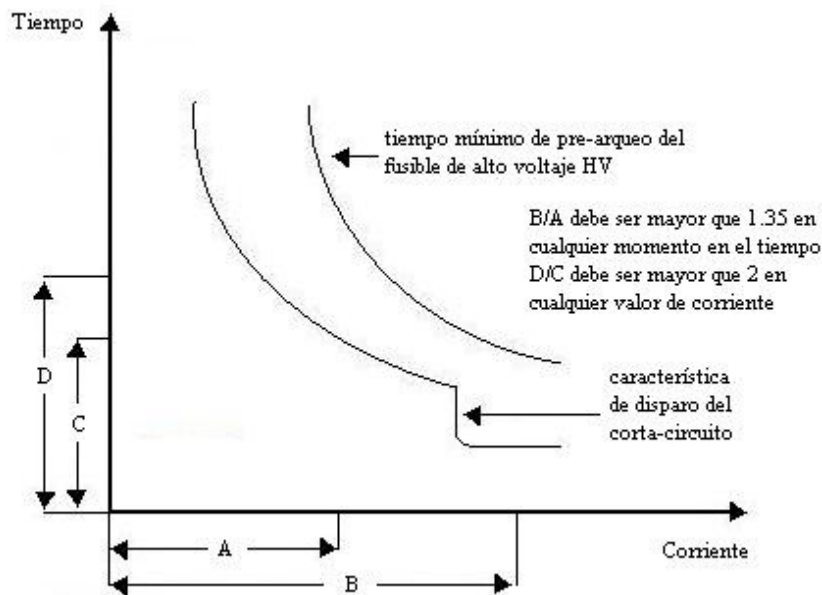
Para una subestación con equipo de medición en el lado de bajo voltaje LV se requiere una discriminación entre los fusibles o el cortacircuito de alto voltaje HV y los fusibles o el cortacircuito de bajo voltaje LV. Los fusibles de alto voltaje HV se escogerán de acuerdo a las características del transformador.

Las características de disparo del cortacircuito de bajo voltaje LV deben ser tales que, para una sobrecarga más abajo de su ubicación, éste se disparará lo suficientemente rápido para asegurar que los fusibles o el cortacircuito de alto voltaje LV no se vean afectados por la sobre-corriente a través de ellos.

Las curvas de disparo de un cortacircuito o fusible de alto voltaje HV y para los de bajo voltaje LV están dadas por gráficas de tiempo para operar contra corriente a través de los mismos. Ambas curvas tienen la forma general de tiempo/corriente inversa (con una discontinuidad abrupta en la curva CB en el valor de la corriente en el cual ocurre el disparo).

Éstas curvas se muestran en la figura 2. Para que se cumpla la discriminación todo los fusibles de la curva HV tienen que estar por encima y del lado derecho de la curva CB.

Figura 2: Discriminación entre la operación de fusibles de alto voltaje HV y el disparo del cortacircuito de bajo voltaje LV para la protección de transformadores



Para que los fusibles no sean afectados, todas las curvas del fusible de pre-arqueo deben estar a la derecha de la curva CB por un factor de 1.35 o más. Por ejemplo si en el tiempo T la curva CB pasa por un punto que corresponde a 100A la curva del fusible en el tiempo T debe pasar por un punto que corresponde a 135A o más y así sucesivamente. Todas las partes de las curvas del fusible deben estar por encima de la curva CB por un factor de 2 o más. Por ejemplo si el nivel de corriente I en la curva CB pasa por un punto que corresponde a 1.5 segundos, la curva del fusible a la misma corriente I debe pasar por un punto que corresponde a 3 segundos o más y así sucesivamente.

Los factores 1.35 y 2 están basados en tolerancias de manufactura estándar máximas para fusibles HV y cortacircuitos LV.

Para comparar ambas curvas, los valores de corriente HV se deben convertir a su valor equivalente LV y viceversa.

Para que no se vea afectado el cortacircuito HV todas las partes del fusible de pre-arqueo deben localizarse a la derecha de la curva CB por un factor de 1.35. Por ejemplo si en el tiempo T la curva LV CB pasa por un punto que corresponde a 100A la curva HV CB debe pasar en el mismo tiempo T por un punto que corresponde a 135A y así sucesivamente. Todas los puntos de la curva HV CB deben estar por encima de la curva LV CB. El tiempo de la curva LV CB debe ser menor o igual a 0.3 segundos de la curva HV CB.

Los factores 1.35 y 0.3 están basados en valores estándar máximos de tolerancia para transformadores HV, relevadores de HV y cortacircuitos de LV. Para comparar ambas curvas los valores de corriente HV deben convertirse a sus valores LV y viceversa.

Para corrientes bajas la opción de protección puede ser fusibles o cortacircuitos. Cuando la corriente es alta la protección se logra con cortacircuitos. La protección con cortacircuitos provee un nivel de protección más sensible comparada con la que se logra con fusibles. La implementación de protección adicional (protección de falla a tierra, protección de sobrecarga térmica) se logra más fácilmente con cortacircuitos.

7. SUBESTACIÓN CON MEDICIÓN EN BAJO VOLTAJE

Una subestación con medición en bajo voltaje es una instalación eléctrica conectada a la red de potencia a un voltaje nominal de 1kV - 35kV , e incluye un transformador HV/LV que generalmente no excede 1250 kVA.

Todos los componentes de la subestación se localizan en un cuarto dentro de un edificio existente o en un lugar prefabricado afuera del edificio.

La conexión en alto voltaje HV podrá ser:

- a) Por un cable de servicio único o línea aérea.
- b) Por medio de dos interruptores rompe cargas interconectados mecánicamente con dos cables de servicio de dos alimentadores idénticos.
- c) Por dos interruptores rompe cargas de una unidad de anillo principal.

Los transformadores más utilizados son:

- a) Transformadores en aceite para subestaciones afuera del edificio.
- b) Transformadores en seco para locaciones en interiores.

La medición en bajo voltaje permite el uso de transformadores de medición pequeños a un costo moderado.

Se utiliza un corta circuitos de bajo voltaje para suministrar un tablero de distribución y para proteger al transformador contra sobrecargas y los circuitos contra fallas de corto circuito.

Existen diferentes métodos de conexión en alto voltaje HV que pueden ser uno de cuatro diferentes tipos:

1. Servicio de una sola línea.
2. Servicio de una sola línea equipada para formar un anillo principal.
3. Servicio suministrado por dos líneas.
4. Servicio de anillo principal.

Al utilizar paneles de compartimientos modulares se puede utilizar todo tipo de arreglos para el equipo de switcheo y se pueden realizar provisiones para extensiones posteriores fácilmente.

La subestaciones con paneles modulares son utilizadas en los siguientes casos:

- a) Red de anillo abierto o radial
- b) Condiciones ambientales o contaminada severas.
- c) Espacio insuficiente para paneles de switcheo 'clásicos'.

Este tipo de equipo se distingue por sus dimensiones reducidas, sus funciones integradas y por su flexibilidad de operación.

7.1. Elección del equipo de switcheo del panel de alto voltaje HV para el circuito del transformador

Existen 3 tipos de paneles de switcheo de alto voltaje HV

1. Switch rompe carga con fusibles separados en el tablero.
2. Combinación de switch rompe carga con fusibles.
3. Cortacircuitos.

Existen siete parámetros para la elección óptima del panel:

- a) La corriente primaria del transformador.
- b) El medio de aislamiento del transformador.
- c) La posición de la subestación con respecto al centro de carga.
- d) Los kVA del transformador.
- e) La distancia del transformador al equipo de switcheo.
- f) El uso de relevadores separados de protección (en lugar de bobinas de acción directa).

Los fusibles utilizados en el switch rompe cargas combinados con fusibles tienen pines de disparo que aseguran el disparo del switch de 3 polos cuando se activa uno o más de los fusibles.

7.1.1 Elección del transformador de medio voltaje/bajo voltaje MV/LV

Un transformador se caracteriza principalmente por sus parámetros eléctricos, pero también por su tecnología y sus condiciones de uso.

7.1.1.1 Características eléctricas de un transformador

Entre las características eléctricas a tomar en cuenta en un transformador están:

- a) Potencia nominal (P_n)
- b) Frecuencia
- c) Voltajes nominales en el primario y en el secundario. Para un embobinado primario capaz de operar a más de un nivel de voltaje, se deben tener los kVA correspondientes a cada nivel. El voltaje nominal del secundario es su valor de circuito abierto.
- d) Niveles de aislamiento nominales.
- e) El switch selector de tap generalmente permite hasta $\pm 2.5\%$ y $\pm 5\%$ de variación en el voltaje nominal del embobinado con mayor voltaje nominal. El transformador debe estar des-energizado antes de operar este interruptor.
- f) Las configuraciones de los embobinados están indicados en forma diagramático por símbolos estándar para delta, estrella, y embobinados interconectados en estrella (y una combinación de éstos para transformadores especiales como transformadores rectificadores de 6 o de 12 fases). Este código se lee de derecha a izquierda, la primera letra se refiere al voltaje del embobinado mayor, la segunda al segundo mayor y así sucesivamente.

Las letras mayúsculas se refieren a el embobinado con mayor voltaje:

D = delta

Y = estrella

Z = estrella interconectada (o zigzag)

N = conexión neutral hacia una terminal

Las letras minúsculas se usan para los embobinados secundarios y terciarios.

d = delta

y = estrella

z = estrella interconectada

n = conexión neutral

Un número de 0 a 11, en sentido de las agujas del reloj (el '0' se usa en lugar del '12') sigue a cada par de letras para indicar el cambio de fase (si lo hay) que ocurre durante la transformación. Todas las combinaciones de delta, estrella y zigzag producen un desfase (si no es cero) de 30 grados o un múltiplo de 30 grados. El código del reloj se describe en detalle en el IEC 60076-4.

7.1.1.2 Características con relación a la tecnología y la utilización del transformador

Entre los aspectos a tomar en cuenta están:

- a) Medio de aislamiento líquido (aceite mineral) o sólido (resina epóxica o aire).
- b) Para instalación en interiores o en exteriores.
- c) Altitud (≤ 1000 metros es estándar)
- d) Temperatura (IEC 60076-2)

Temperatura ambiente máxima: 40 ° C, temperatura del aire promedio diaria máxima: 30 ° C, temperatura del aire promedio máxima anual: 20 ° C.

Para condiciones de operación no estándar se debe tomar en cuenta la influencia de la temperatura ambiente en la corriente nominal.

7.2 Elección de la tecnología

La elección entre transformadores está entre transformador con aislamiento líquido o en seco. La elección depende de muchos factores y se debe tomar en cuenta la seguridad de las personas en la proximidad del transformador y las consideraciones económicas tomando en cuenta las ventajas de cada tipo de transformador.

7.2.1 Determinación de la potencia óptima

El sobredimensionamiento del transformador resulta en inversión excesiva y pérdidas innecesarias sin carga, pero pérdidas menores con carga.

El subdimensionamiento del transformador causa una reducción en eficiencia cuando está a plena carga (la mejor eficiencia se obtiene entre el 50 y el 70 % de plena carga).

La sobrecarga a largo plazo ocasiona el envejecimiento prematuro del aislamiento de las bobinas, y en casos extremos resulta en fallas de aislamiento y la pérdida del transformador.

Para seleccionar la potencia óptima (kVA) del transformador se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- a) Enlistar el equipo que consume potencia como se describió anteriormente.
- b) Decidir el factor de utilización (o demanda) de cada carga individual.
- c) Organizar para corrección de factor de potencia si se justifica para:
Reducir los costos por penalización en la tarifa en la demanda de potencia kVA y reducir el valor de la carga declarada ($P(\text{kVA}) = P(\text{kW})/\cos \phi$).
- e) Seleccionar entre los valores nominales de los transformadores disponibles, tomando en cuenta todas las posibles extensiones futuras de la instalación.

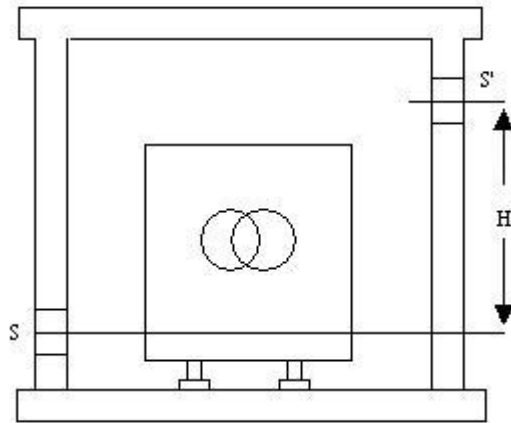
Es importante asegurar que el transformador disponga de ventilación adecuada.

7.2.1 Orificios de ventilación

La ventilación del cuarto del transformador se logra en el caso general por la circulación de aire natural. El aire caliente producido por las pérdidas del transformador se remueve por convección natural.

Un buen sistema de ventilación permite la entrada de aire frío por un orificio de área transversal S al nivel del piso y para salir del cuarto, por un orificio de área transversal S' en la pared opuesta a donde está la entrada de aire y a una altura H sobre el orificio de entrada de aire como se muestra en la figura 3.

Figura 3: Ventilación natural



Es importante notar que una restricción al paso de suficiente volumen de aire resultará en una disminución de la potencia disponible del transformador.

La fórmula para determinar el área transversal de los orificios de ventilación es

$$S = 0.18 P / \sqrt{H} \text{ con } S' = 1.1 S$$

Donde

P = suma de las pérdidas sin carga con las pérdidas con carga en kW

S = área transversal del orificio de entrada de aire en milímetros cuadrados

S' = área transversal del orificio de salida en milímetros cuadrados

H = altura (centro a centro) del orificio de salida sobre el orificio de entrada en metros

La ventilación forzada es necesaria cuando: la temperatura ambiente sobrepasa los 20°C , si el cuarto tiene mala ventilación, sobrecargas frecuentes en el transformador, etc.

El ventilador se puede controlar por un termóstato.

La circulación de aire recomendada en metros cúbicos por segundo para 20°C para un transformador en aceite es $0.081P$ y para un transformador en seco $0.05P$, donde P son las pérdidas totales en kW.

7.3 Subestación con medición en el lado de alto voltaje

De acuerdo con la complejidad de la instalación y la forma en que se divide, la subestación puede incluir:

- a) Un espacio con el tablero de alto voltaje y panel de medición junto con el transformador y tableros de distribución de bajo voltaje.
- b) Uno o varios espacios con transformadores que incluyen tableros de distribución de bajo voltaje LV suministrados por el equipo de switcheo de alto voltaje HV en una subestación principal.

La subestación podrá ser instalada ya sea dentro de un edificio o en exteriores.

La conexión en alto voltaje HV podrá ser:

- a) Por un cable de servicio único o línea aérea.
- b) Por medio de dos interruptores rompe cargas interconectados mecánicamente con dos cables de servicio de dos alimentadores idénticos.
- c) Por dos interruptores rompe cargas de una unidad de anillo principal.

Antes de la iniciar con la instalación se debe tener un acuerdo con la empresa proveedora sobre la ubicación del equipo de medición.

Un panel de medición se incorporará con el tablero de switcheo de alto voltaje HV. Los transformadores de corriente y de voltaje con la precisión de medición adecuada se pueden incluir en el corta circuitos principal o (en el caso de transformador de voltaje) pueden instalarse por separado en el panel de medición.

Si la instalación incluye un número de cuartos para los transformadores, los suministros de HV de la subestación principal pueden ser alimentadores radiales conectados directamente a los transformadores, o por alimentadores duplicados para cada cuarto, o por un anillo principal, de acuerdo al grado de alimentación deseado.

En los dos últimos casos, se requerirán unidades de 3 paneles de anillo principales en cada cuarto de transformadores.

Los generadores de emergencia serán para mantener un suministro de potencia a las cargas esenciales, en el evento de que exista una falla en el sistema de suministro de potencia.

Los capacitores se instalarán de acuerdo a las necesidades en bancos de HV en la subestación principal o en bajo voltaje LV en los cuartos de transformadores.

Existen varios tipos desconexiones para servicio con conexión en alto voltaje HV:

- a) Servicio con un línea
- b) Servicio con una línea equipada para formar un anillo principal
- c) Servicio con suministro doble
- d) Servicio con anillo principal

La medición y la protección se logra con la asociación de 2 paneles. Uno conteniendo el transformador de voltaje VT y el panel principal de corto circuito de alto voltaje HV conteniendo los transformadores de corriente CT para medición y protección.

La protección general es generalmente contra sobre corriente (sobrecarga y cortocircuito) y fallas de tierra.

7.3.1 Subestación con generadores

Si la instalación requiere la disponibilidad de un gran suministro de potencia se puede utilizar un sistema en espera de medio voltaje MV. En dicho caso la instalación debe disponer de un cambio automático, de manera de evitar una posible operación en paralelo del generador con el suministro de potencia.

El generador debe tener sus propio sistema de protección. Debido a que el generador tiene una potencia de corto circuito baja comparada con el suministro de potencia, se debe prestar especial atención en la discriminación de la protección.

El control se logra con un regulador de voltaje. Un regulador de voltaje que controla un alternador se ajusta para responder a una reducción de voltaje en sus terminales que automáticamente incrementa la corriente de excitación del alternador hasta que el voltaje se reestablece a su valor normal. Cuando se requiere que el alternador opere en paralelo con otros, el regulador de voltaje automático AVR se conecta en 'operación en paralelo', en el cual el circuito de control del AVR se modifica ligeramente para asegurar el compartimiento de kvars con las otras máquinas en paralelo.

Para conectar un generador en paralelo con el suministro de potencia se requiere la aprobación de la empresa proveedora. Generalmente el equipo (paneles y relevadores de protección) deben ser aprobados por la empresa distribuidora.

Para la protección y el control se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

a) Protección

Para estudiar la conexión del equipo de generación la empresa proveedora necesita algunos datos como:

- Potencia inyectada a la red
- Modo de conexión
- Corriente de cortocircuito del equipo generador
- Des-balance de voltaje del generador
- etc.

De acuerdo al modo de conexión se requiere protección de desacoplamiento como.

- Protección contra sobrevoltaje y subvoltaje
- Protección contra variaciones en la frecuencia
- Protección contra sobrevoltaje de secuencia cero
- Tiempo máximo de acoplamiento (para acoplamiento momentáneo)
- Potencia real inversa

Por razones de seguridad, el equipo de switcheo utilizado para el desacoplamiento debe ser provisto con las características de un desconector (por ejemplo, el aislamiento de todos los conductores activos entre el equipo de generación y el del suministro de potencia).

b) Control

Cuando generadores de una subestación operan en paralelo con el suministro de potencia, suponiendo que el voltaje del sistema de potencia se reduce por razones de operación (es común operar sistemas de HV dentro de un rango de $\pm 5\%$ del voltaje nominal o más donde los patrones de flujo de carga lo requieren) el sistema de regulación de voltaje automático AVR para mantener el voltaje en $\pm 3\%$ (por ejemplo) intentará aumentar el voltaje aumentando la corriente de excitación del alternador.

En lugar de aumentar el voltaje, el alternador simplemente operará a un factor de potencia menor que el anterior, por consiguiente aumentando su salida de corriente, y continuará así hasta que sea disparado por sus relevadores de corriente. Este es un problema muy conocido y usualmente se soluciona con un 'factor de potencia constante' en el AVR.

Al hacer la selección, el AVR ajustará automáticamente la corriente de excitación para el voltaje que exista en el sistema de potencia, y al mismo tiempo manteniendo el factor de potencia del alternador constante en el valor predeterminado (seleccionado en la unidad de control del AVR).

En el caso que el alternador se desacople de la red de potencia, el AVR debe cambiarse automáticamente al control de 'voltaje constante'.

7.4 Operación en paralelo de transformadores

La necesidad de operar dos o más transformadores en paralelo se debe principalmente a el crecimiento en la carga que excede la capacidad del transformador existente y como medida de seguridad (la posibilidad que dos transformadores fallen al mismo tiempo es muy pequeña) . También se usan transformadores en paralelo para adoptar un mismo tipo de transformador en la instalación.

La potencia kVA total cuando dos o más transformadores con los mismos kVA nominales se operan en paralelo, es igual a la suma de la potencia de cada transformador individual, siempre que los porcentajes de impedancia sean iguales y que la relación de voltaje sean iguales.

Los transformadores con kVA nominales desiguales compartirán una carga prácticamente (pero no exactamente) en proporción con su potencia nominal, siempre que sus relaciones de voltaje sean idénticos y que su por ciento de impedancia (en su propia potencia kVA nominal) sean idénticos o un valor cercano.

Se recomienda que los transformadores en los cuales su potencia nominal kVA difiera en una proporción mayor a 2:1 no sean operados en paralelo.

7.4.1 Condiciones para la operación de transformadores en paralelo

Todas las unidades en paralelo deben ser alimentadas por la misma red. El intercambio de corrientes circulantes entre los circuitos secundarios de transformadores en paralelo será pequeño siempre y cuando:

- a) El cableado secundario entre transformadores hasta el punto paralelo tenga longitud aproximada y características iguales.
- b) El fabricante del transformador está informado de la intención en el uso de los transformadores para que:
 - Las configuraciones de los embobinados (delta, estrella, estrella zigzag) de los transformadores tengan el mismo cambio de fase entre los voltajes del primario y del secundario.
 - Las impedancias de cortocircuito deben ser iguales o diferir en menos del 10 %.
 - La diferencia de los voltajes entre fases correspondientes no deben exceder 0.4 %.
 - Toda la información con respecto a condiciones de uso, ciclos de carga esperados, etc. deben proporcionarse al fabricante con la visión de optimizar las pérdidas con o sin carga.

8. CONSTITUCIÓN DE SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN DE ALTO/BAJO VOLTAJE HV/LV

Las subestaciones de alto/bajo voltaje HV/LV se construyen de acuerdo a la magnitud de la carga y el tipo de sistema de potencia en cuestión.

Las subestaciones se pueden clasificar de acuerdo con el arreglo de medición en alto o en bajo voltaje y el tipo de alimentación (líneas aéreas o cables subterráneos).

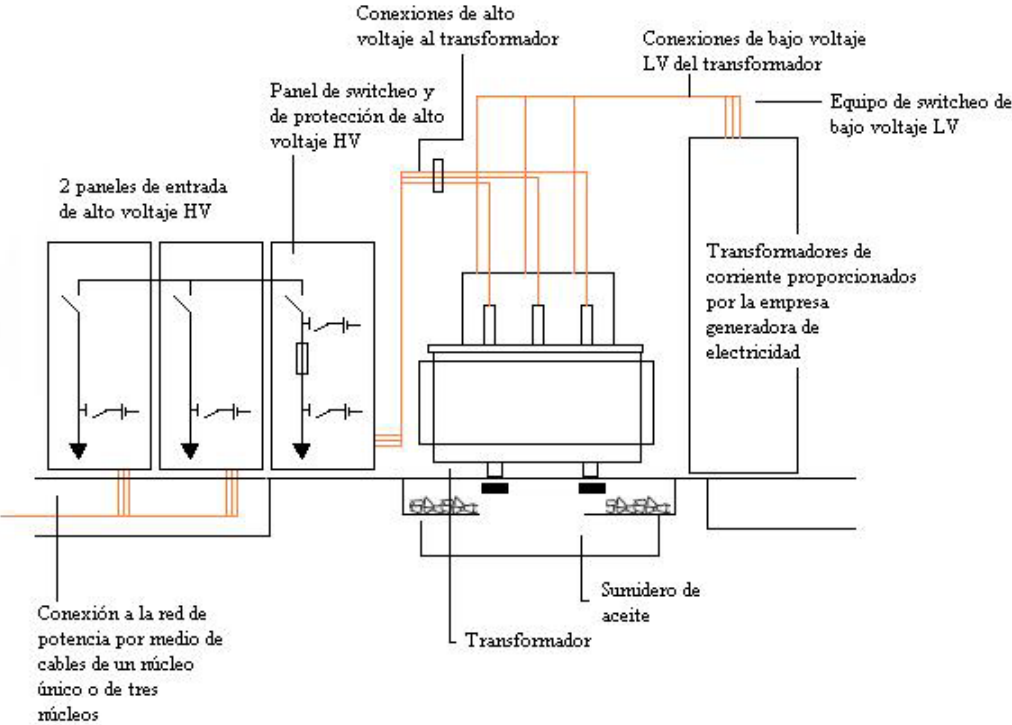
Las subestaciones pueden instalarse en interiores, ya sea en un cuarto especialmente diseñado para ello, o dentro de un edificio, o una subestación en exteriores con equipo en interiores (equipo de switcheo y transformadores), o montada al nivel del suelo con equipo especial para exteriores (equipo de switcheo y transformadores). También puede estar montada en un poste (equipo de switcheo y transformadores).

Las subestaciones prefabricadas permiten una elección simple, rápida y competitiva.

8.1 Subestación en interiores

La figura 4 muestra el arreglo típico recomendado para una subestación con medición en bajo voltaje. El uso de un transformador seco de resina no requiere el uso de un sumidero con aceite para protección contra incendios, pero se requiere de limpieza periódica.

Figura 4: Arreglo típico de paneles de switcheo para medición en bajo voltaje



8.1.1 Conexiones de servicio e interconexiones de equipo

Las conexiones en alto voltaje HV son hechas y son responsabilidad de la empresa proveedora de electricidad.

Las conexiones entre el equipo de switcheo de alto voltaje y los transformadores pueden ser:

- a) Por medio de barras de cobre cortas donde el transformador está en un panel que forma parte del tablero de alto voltaje HV.
- b) Por cables de un solo núcleo con aislamiento sintético con el posible uso de terminales de fácil conexión (enchufe) en el transformador.

Los transformadores de corriente para medición generalmente se instalan en la tapa protectora del transformador de potencia LV y la tapa sellada por la empresa proveedora de electricidad.

Alternativamente los transformadores de corriente se instalan en un compartimiento sellado en el gabinete principal de LV.

La subestación debe incluir circuitos de tierra. Un electrodo de tierra para todas las partes expuestas conductoras del equipo eléctrico que incluya mallas de protección de metal y barras reforzadas en la base de concreto de la subestación.

El suministro para los circuitos de iluminación de la subestación se puede tomar de un punto arriba o abajo del cortacircuitos de bajo voltaje LV principal. En cada caso se debe proveer protección de sobre-corriente apropiada. Se recomienda un circuito automático separado(o varios) para iluminación de emergencia. Los switches y botones de operación normalmente se sitúan adyacentes a las entradas.

Las luces de iluminación deben estar posicionadas para permitir una buena iluminación de las palancas de operación y los indicadores.

Entre los materiales y equipo para operación y seguridad se debe incluir:

- a) Equipo para la revisión segura del equipo como:
 - Alfombra o banco aislante (de hule o sintética)
 - Un dispositivo de detección de voltaje para uso en el equipo de alto voltaje HV.
 - Conectores de tierra (de acorde al tipo de equipo de switcheo).

- b) Extinguidores contra incendios de polvo o de CO₂.
- c) Señales de advertencia y alarmas de seguridad.
 - En la parte externa de todas las puertas de acceso una placa de advertencia de PELIGRO y prohibición del acceso, junto con instrucciones para primeros auxilios de víctimas de accidentes eléctricos.

8.2 Subestaciones en exteriores

8.2.1 Subestaciones con gabinetes

Normalmente se utilizan subestaciones con gabinetes contra el medio ambiente y bichos para subestaciones que requieren el uso de unidades de anillo principal o las que requieren un tablero de switcheo de varios cortacircuitos. Éstas unidades prefabricadas requieren el mínimo de trabajo civil, se montan en una simple base de concreto y se usan tanto para subestaciones urbanas como rurales.

Entre las ventajas ofrecidas por estas unidades están:

- Una optimización de materiales y seguridad, al ofrecer una gran variedad de gabinetes disponibles y conformidad con todos los estándares internacionales.
- Una reducción en el tiempo de estudio y diseño y en el costo de implementación al ofrecer una realización independiente del edificio principal, una simplificación del trabajo civil (que consiste sólo en una base reforzada de concreto) e instalación simplificada del equipo.

8.2.2 Subestaciones sin gabinetes

Este tipo de subestación está provista de equipo de protección contra el medio ambiente.

Comprenden un área cercada donde se instalan tres o más bases de concreto:

- a) Para una unidad de anillo principal, o una o más unidades de fusibles o cortacircuitos.
- b) Para uno o más transformadores.
- c) Para uno o más paneles de distribución de bajo voltaje LV.

8.3 Subestaciones montadas en postes

Éste tipo de subestación se utiliza principalmente para suministrar consumidores rurales con cables de alto voltaje HV. En éste tipo de subestación la protección del transformador de alto voltaje se provee generalmente con fusibles. Se proveen pararrayos para proteger a los transformadores y a los consumidores. La localización de la subestación debe permitir el acceso de vehículos y el personal (como elevar el transformador por ejemplo).

9. ESQUEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE BAJO VOLTAJE LV

9.1 Esquemas principales de distribución en bajo voltaje LV

En una instalación en bajo voltaje típica, los circuitos de distribución se originan en un tablero de switcheo principal (MLVS) por medio de los cuales los conductores alimentan las cargas a través de tableros de sub-distribución o de distribución final.

Normalmente se utilizan tres niveles de distribución para alimentar a las cargas en fábricas medianas o grandes:

a) Distribución del tablero de switcheo principal (MLVS):

A éste nivel, la potencia de uno o más transformadores de medio voltaje a bajo voltaje MV/LV conectados a la red de medio voltaje de la empresa proveedora de electricidad se distribuye a:

- Diferentes áreas de la fábrica: talleres de la fábrica, áreas de producción, etc.
- Cargas centralizadas de alto consumo de potencia, tales como compresores, unidades de enfriamiento de agua, aire acondicionado, etc.

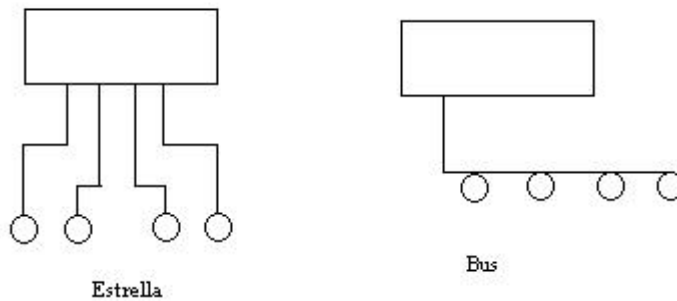
b) Sub-distribución usada para distribuir electricidad dentro de un área.

c) Distribución final, para alimentar las diferentes cargas.

Todos los esquemas de distribución son la combinación de dos topologías básicas:

- a) Topología estrella: Distribución radial o centralizada.
- b) Topología de bus o de barras: Distribución con barras, conocida también como sistema de barras truncado.

Figura 5: Las dos topologías básicas de esquemas de distribución



9.2 Selección de un esquema de distribución

Entre los requerimientos que se deben tomar en cuenta al seleccionar un esquema de distribución están:

- a) Requerimientos de la disponibilidad de energía.
- b) Tamaño de la fábrica (área y potencia total a ser distribuida).
- c) Distribución de las cargas (equipo y densidad de potencia).
- d) Requerimientos en la flexibilidad de la instalación.

a) Requerimientos de la disponibilidad de energía:

La creación de circuitos independientes a diferentes puntos de la instalación hace posible:

- Limitar las consecuencias de una falla al circuito en cuestión.
- Simplificar la localización de una falla.
- Llevar a cabo trabajos de mantenimiento o extensiones de circuitos sin interrumpir el suministro de energía a toda la instalación.

En general se requieren los siguientes grupos de circuitos:

- Circuitos de iluminación (los circuitos en los que la mayoría de fallas de aislamiento ocurre).
- Circuitos de toma corrientes.
- Circuitos de calefacción, ventilación y de aire acondicionado.
- Circuitos de potencia para motores.
- Circuitos para servicios auxiliares .
- Circuitos para sistemas de emergencia (iluminación de emergencia, sistemas de protección contra incendios e alimentadores de potencia no interrumpibles UPS para sistemas de computadoras, etc.)

b) Tamaño de la fábrica:

Las fábricas pequeñas se alimentan directamente de la red de bajo voltaje LV de la empresa de electricidad, y el tamaño y potencia de la instalación no justifica un sistema de distribución de tres niveles. Los esquemas en fábricas pequeñas normalmente involucra sólo uno o dos niveles.

Las fábricas medianas normalmente se conectan a la red de medio voltaje MV de la empresa de electricidad. Uno o más transformadores con sus tableros de switcheo alimentan toda la fábrica.

Las fábricas grandes generalmente se conectan a la red de alto voltaje HV de la empresa proveedora de electricidad. Un sistema de distribución de medio voltaje MV alimenta las subestaciones MV/LV localizadas en diferentes puntos de la fábrica.

c) Distribución de las cargas:

Se deben tomar en cuenta dos tipos de cargas dependiendo de su ubicación en la fábrica:

- Cargas concentradas, que generalmente corresponden a utilidades usadas por toda la fábrica y que requieren alta potencia (por ejemplo, sistemas de aire acondicionado, compresores de aire, sistemas de enfriamiento de agua, etc.)
- Cargas distribuidas que pueden tratarse en grupos correspondiendo a un área homogénea (talleres, área de producción, etc.) y que se pueden caracterizar por dos parámetros: densidad de potencia (VA/m^2) y densidad de equipo (en número de dispositivos en 10 o 100 m^2).

d) Requerimientos en la flexibilidad de la instalación

La flexibilidad de la instalación es muy importante especialmente en instalaciones industriales. Esta necesidad concierne principalmente las cargas distribuidas y está presente en cada nivel de distribución:

- Nivel del tablero de bajo voltaje: Flexibilidad en el diseño, permitiendo a la potencia eléctrica ser distribuida a los diferentes puntos de la fábrica sin conocimiento detallado de las necesidades al nivel de sub-distribución.
- Nivel de sub-distribución: Flexibilidad para la instalación y la operación.
- Nivel de distribución final: Flexibilidad en la utilización.

10. ESQUEMAS DE CONEXIONES A TIERRA

10.1 Definiciones

Los estándares internacionales (IEC 60364) definen claramente los elementos para conexiones a tierra. Los siguientes términos son utilizados comúnmente en la industria:

- Electrodo a tierra: Un conductor o grupo de conductores que proveen una conexión eléctrica a Tierra.
- Tierra: La masa conductora de la Tierra, cuyo potencial eléctrico en cualquier punto es tomado como cero.
- Electrodo eléctricamente independientes: Electrodo a tierra que están localizados a una distancia entre sí tal que la corriente máxima que puede fluir a través de uno de ellos no afecta significativamente el potencial del otro.
- Resistencia de electrodo a tierra: La resistencia de contacto entre un electrodo a tierra y la Tierra.
- Conductor a tierra: Un conductor de protección que conecta la terminal principal a tierra de una instalación con un electrodo a tierra o a cualquier otro método de tierras.
- Parte conductora expuesta: Una parte conductora del equipo que se puede tocar y que no es una parte viva, pero que puede serlo en condiciones de falla.
- Conductor protector: Un conductor usado para protección contra descargas eléctricas y utilizado para conectar cualquiera de las siguientes partes:
 - a) Partes conductoras expuestas.
 - b) Partes conductoras externas.
 - c) La terminal principal.

d) Electrodo(s) a tierra.

- Parte conductora externa: Una parte conductora capaz de producir un potencial, generalmente un potencial a tierra, y que no forma parte de la instalación eléctrica. Por ejemplo, pisos o paredes no aislantes, armazón metálica de edificios, conduits metálicos y tuberías de agua, gas, calefacción, aire comprimido, etc.

- Conductor de unión: Un conductor protector que provee una unión equipotencial.

- Terminal principal a tierra: Una terminal o barra para la conexión de conductores protectores, incluyendo la unión equipotencial de conductores y conductores a tierra, para proveer los medios a tierra.

10.2 Conexiones a tierra

10.2.1 El sistema de unión equipotencial principal

La unión se lleva a cabo por medio de conductores protectores, y el propósito es asegurar que si en un conductor externo (como una tubería de gas, aire comprimido etc.) se eleva el potencial debido a una falla externa al edificio, no ocurra una diferencia de potencial entre conductores externos dentro de la instalación. La unión debe ser lo más cerca posible al punto (o puntos) de entrada al edificio y ser conectada a la terminal principal a tierra.

10.2.2 Conexiones equipotenciales suplementarias

Las conexiones suplementarias tienen como propósito conectar todas las partes conductoras expuestas, y todas las partes conductoras externas accesibles simultáneamente, cuando no se han logrado los medios correctos para protección. Por ejemplo si los conductores de unión presentan una resistencia alta.

10.2.3 Conexión de partes conductoras expuestas a los electrodos a tierra

La conexión se hace por medio de conductores protectores con el objeto de proveer un paso de baja resistencia para las corrientes de falla fluyendo a tierra.

10.3 Definición de esquemas de tierra estandarizados

Existen tres opciones independientes para el diseñador de una instalación eléctrica para sistemas de tierra:

- a) El tipo de conexión del sistema eléctrico (que generalmente es el conductor neutral) y de las partes expuestas a el(los) electrodo(s) a tierra.
- b) Un conductor protector separado o un conductor protector junto con el conductor neutral como un solo conductor.
- c) El uso de protección de fallas a tierra de equipo de switcheo con protección de sobre corrientes que libera solamente corrientes de falla altas o el uso de relevadores adicionales capaces de detectar y liberar pequeñas corrientes de aislamiento a tierra.

Cada una de éstas opciones tiene sus ventajas y desventajas:

- a) La conexión de las partes conductoras expuestas y del conductor neutral al conductor a tierra principal resulta en la equipotencialidad y sobrevoltajes menores, pero incrementa las corrientes de falla a tierra.

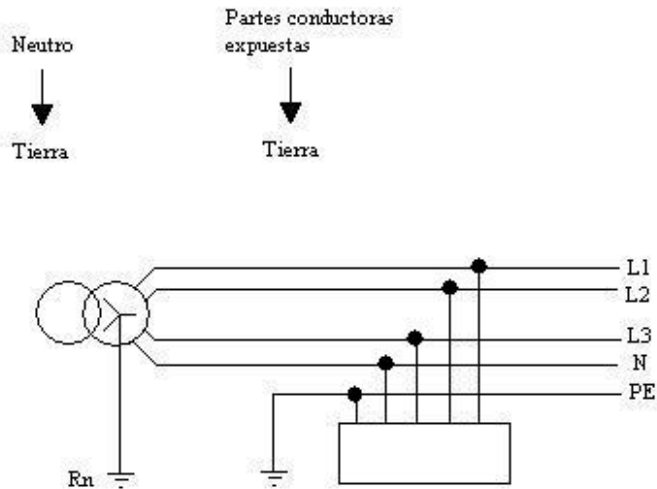
- b) Un conductor protector separado es costoso inclusive si tiene área transversal pequeña, pero es menos probable de ser contaminado por caídas de voltaje y armónicas que un conductor neutral. También se evitan corrientes de fuga en partes conductoras externas.

- c) La instalación de relevadores protectores contra corrientes residuales o dispositivos de monitoreo de aislamiento es mucho más sensible y permite en la mayoría de los casos liberar la falla antes que ocurra daño mayor (motores, fuego, electrocución). La protección también es independiente con respecto a cambios en la instalación existente.

10.4 Sistema TT (neutro aterrizado)

Un punto de la fuente se conecta directamente a tierra. Todos los conductores expuestos y externos se conectan a un electrodo separado en la instalación. Éste electrodo puede o no ser eléctricamente independiente del electrodo de la fuente. Las dos zonas de influencia pueden traslaparse sin afectar la operación del equipo de protección.

Figura 6: Sistema TT



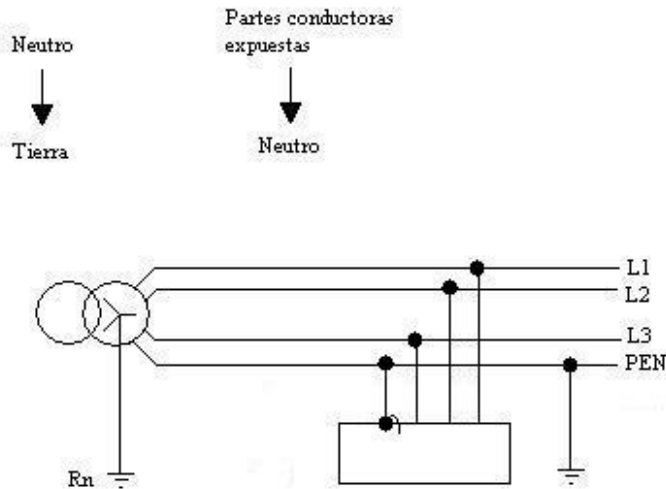
10.5 Sistema TN (partes conductoras expuestas conectadas al neutro)

La fuente está aterrizada como en el caso del sistema TT. Todas las partes conductoras expuestas y externas se conectan al conductor neutro de la instalación. Hay varias versiones del sistema TN:

10.6 Sistema TN-C

El conductor neutro también es usado como un conductor protector, y se le refiere como conductor PEN (protección tierra neutro). Este sistema no se permite para conductores de menos de 10 mm² o para equipo portátil.

Figura 7: Sistema TN-C



El sistema TN-C requiere un ambiente equipotencial efectivo dentro de la instalación con electrodos a tierra dispersados y separados tan regularmente como sea posible ya que el conductor PEN es tanto el neutro y al mismo tiempo lleva corrientes de desbalance de fase como también corrientes armónicas de tercer orden (y sus múltiplos). Por lo tanto el conductor PEN debe ser conectado a un número de electrodos a tierra de la instalación.

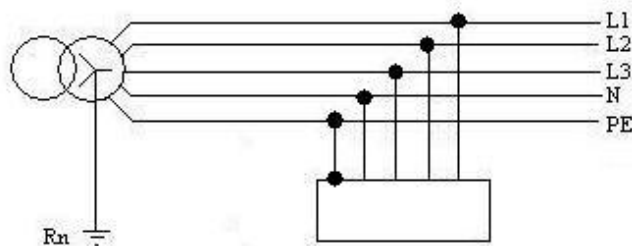
En el sistema TN-C la función del conductor protector tiene prioridad sobre la función neutro. Un conductor PEN siempre debe ser conectado a la terminal a tierra de la carga y se usa un cable para conectar ésta terminal a la terminal neutro.

10.7 Sistema TN-S

El sistema TN-S (5 cables) es obligatorio para circuitos con área transversal menor a 10 mm^2 para equipo portátil.

El conductor de neutro y el conductor protector son separados. En sistemas de cables subterráneos donde existe un revestimiento tubular de plomo para los cables, el conductor protector es generalmente el revestimiento tubular.

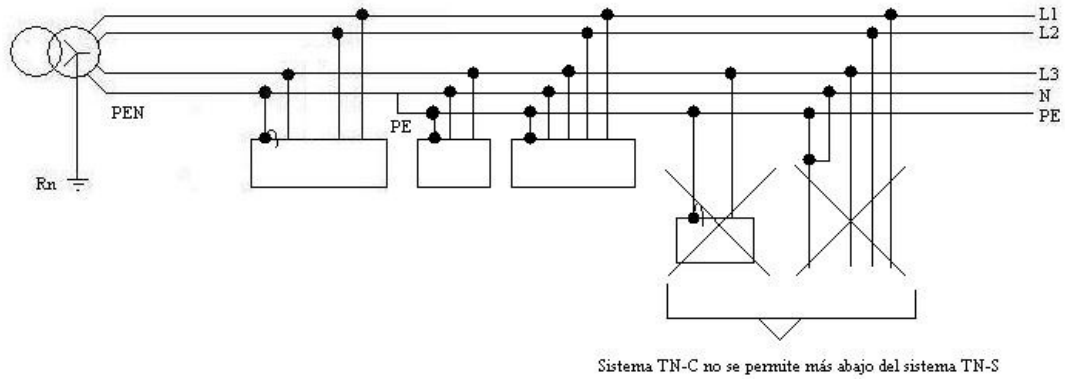
Figura 8: Sistema TN-S



10.8 Sistema TN-C-S

Los sistemas TN-C y TN-S se pueden usar en la misma instalación. En el sistema TN-C-S, el sistema TN-C (4 cables) no debe usarse en puntos más abajo del sistema TN-S (5 cables), ya que cualquier interrupción accidental en el neutro en un punto más arriba originará una interrupción en el conductor protector en un punto más abajo, y por consiguiente un peligro.

Figura 9: Sistema TN-C-S

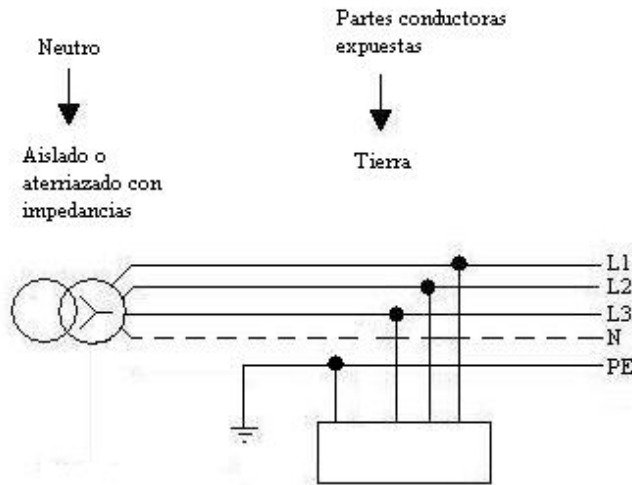


10.9 Sistema IT (neutro aislado)

En el sistema IT no se hace ninguna conexión intencional entre el punto neutro de la fuente y tierra. Las partes conductoras externas y expuestas de la instalación se conectan a un electrodo a tierra.

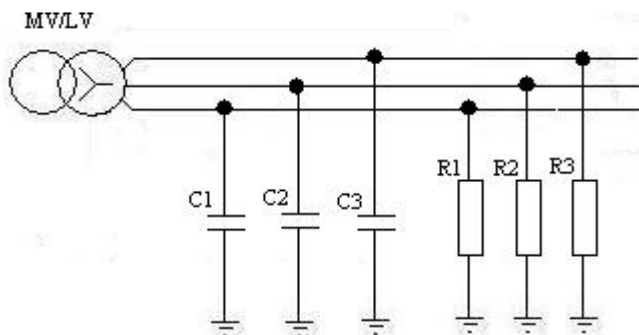
En la práctica todos los circuitos tienen una impedancia de fuga a tierra, ya que ningún aislamiento es perfecto. La impedancia de fuga a tierra está compuesta por una parte resistiva en paralelo con una parte capacitiva.

Figura 10: Sistema IT



Ejemplo: En un sistema de bajo voltaje LV de 3 fases y 3 cables, 1 km de cable tendrá una impedancia de fuga debido a C1, C2, C3 y a R1, R2, R3 equivalente a una impedancia neutro a tierra $Z_{ct} = 3000 - 4000 \Omega$, sin contar las capacitancia de filtrado de dispositivos electrónicos.

Figura 11: Sistema IT (neutro aislado)



10.9.1 Sistema IT (neutro con impedancia a tierra)

Se conecta una impedancia Z_s (alrededor de 1000-2000 Ω) permanentemente entre el punto neutral del embobinado del transformador LV y tierra. Todas las partes conductoras expuestas y externas se conectan a un electrodo a tierra. La razón de este sistema de tierra es arreglar el potencial de una pequeña red con respecto a tierra (Z_s es pequeña comparada con la impedancia de fuga) y para reducir el nivel de sobrevoltaje con respecto a tierra. Sin embargo tiene el ligero efecto de incrementar el nivel de la primera corriente de falla.

10.10 Características de los sistemas TT, TN e IT

Cuando las partes conductoras expuestas están aterrizadas en varios puntos, se debe instalar un RCD (dispositivo de corriente residual) para cada grupo de circuitos conectados a un electrodo dado.

a) Sistema TT

Características principales:

- El sistema TT es la solución más simple para diseñar e instalar. Se usa en instalaciones que son alimentadas por la red de bajo voltaje de la empresa de electricidad.
- No requiere monitoreo continuo durante la operación (una revisión en los RCD's puede ser necesaria).

- La protección se asegura con dispositivos especiales, los dispositivos de corriente residual (RCD) previenen el peligro de fuego cuando se ajustan a una corriente $\leq 500\text{mA}$.
- Cada falla de aislamiento resulta en la interrupción en el suministro de potencia, sin embargo la falla se limita al circuito en cuestión instalando RCD's en serie (RCD selectivos) o en paralelo (circuito selectivo).
- Las cargas o partes de la instalación que durante la operación normal causan corrientes de fuga altas requieren medidas especiales para evitar disparos en falso. Por ejemplo alimentar las cargas con un transformador separado o usar RCD's específicos.

b) Sistema TN

Características principales:

- Requiere la instalación de electrodos a tierra a intervalos regulares en la instalación.
- Requiere que el chequeo inicial del disparo efectivo de la primera falla de aislamiento debe llevarse a cabo por cálculos durante la fase de diseño, seguido por mediciones obligatorias para confirmar el disparo durante el servicio.
- Que cada extensión modificada se lleve a cabo por un electricista calificado.
- Puede resultar, en casos de falla de aislamiento, en daños mayores en los embobinados de máquinas rotatorias.
- En lugares con riesgo alto de incendio, puede representar un peligro mayor debido a las corrientes de falla mayores.

Además en el sistema TN-C:

- Requiere el uso de conductores fijos y rígidos.
- Es menos costoso por la eliminación de un conductor y un polo del dispositivo.

Esta prohibido en los casos en que hay alto riesgo de incendio y para equipo de computación (presencia de corrientes armónicas en el neutro).

y en el sistema TN-S :

- Se puede usar con conductores flexibles y conduits pequeños.
- Debido a la separación del neutro y el conductor protector, provee un sistema de tierra limpio (sistemas de cómputo y lugares con riesgos especiales).

c) Sistema IT

Características principales:

- Ofrece la mejor continuidad de servicio durante la operación.
- Se usa generalmente en instalaciones con un transformador privado ML/LV o LV/LV .
- Requiere personal para el monitoreo y el mantenimiento.
- Requiere un alto nivel de aislamiento en la red (implica dividir la red si es muy grande y el uso de transformadores de separación de circuitos para alimentar cargas con fugas de corriente altos).
- Se debe asegurar la protección del conductor neutro.

- Se debe revisar el disparo efectivo para dos fallas simultáneas por medio de cálculos en la fase de diseño, seguido por mediciones obligatorias en cada grupo de partes conductoras interconectadas expuestas.

10.11 Criterios de selección para los sistemas TT, TN e IT

En términos de protección a personas, los tres arreglos de protección a tierra (SEA) son equivalentes si se siguen las reglas de instalación y de operación. Por consiguiente, la elección no depende en la seguridad. Es al combinar los requerimientos en términos de regulaciones, continuidad del servicio, condiciones de operación y tipo de red y de cargas que se puede determinar el mejor sistema.

Tabla II: Características de los sistemas de tierra

	TT	TN-S	TN-C	IT1	IT2	Comentarios
Características eléctricas:						
Corriente de falla	-	--	--	+	--	Sólo el sistema IT ofrece corrientes de primera falla pequeñas
Voltaje de falla	-	-	-	+	-	En el sistema IT el voltaje de toque es muy pequeño para la primera falla pero alto para el segundo
Voltaje de toque	+/-	--	-	-	+	En el sistema TT el voltaje de toque es pequeño si el Sistema es equipotencial, si no es alto
Protección:						
Protección de personas						
contra contacto directo	+	+	+	+	+	Todos los sistemas SEA son equivalentes si se siguen las reglas
Protección de personas con sistemas generadores de emergencia						
	+	-	-	+	-	Los sistemas donde se asegura la protección con RCD's no son sensibles a un cambio en la impedancia interna de la fuente
Protección contra incendio						
(con RCD)	+	+	no	+	+	El sistema TN-C está prohibido donde existe riesgo de incendio
Sobrevoltajes:						
Sobrevoltajes continuos	+	+	+	-	+	El sobrevoltaje fase a tierra es continuo en el sistema IT si hay una falla del primer aislamiento
Sobrevoltaje transitorio	+	-	-	+	-	Los sistemas con altas corrientes de falla pueden causar sobrevoltajes transitorios
Sobrevoltaje con falla en el transformador (primario/ secundario)						
	-	+	+	+	+	En el sistema TT hay un desbalance de voltaje entre los diferentes electrodos a tierra. Los otros sistemas están interconectados a un único electrodo a tierra

	TT	TN-S	TN-C	IT1	IT2	
Compatibilidad electromagnética:						
Inmunidad a rayos cercanos	-	+	+	+	+	En el sistema TT pueden haber desbalances de voltaje entre los electrodos a tierra.
Inmunidad a rayos en las líneas de HV	-	-	-	-	-	Todos los SEA son equivalentes cuando la línea de alto voltaje recibe impacto directo de un rayo.
Emisión continua de un campo electromagnético	+	+	-	+	+	La conexión de la protección tierra neutro (PEN) a las estructuras metálicas es conducente a la generación continua de campos electromagnéticos
Continuidad del servicio:						
Interrupción de la primera falla	-	-	-	+	+	Sólo el sistema IT evita el disparo de la primera falla de aislamiento
Caída de voltaje durante la falla de aislamiento	+	-	-	+	-	Los sistemas TN-S, TN-C e IT generan altas corrientes de falla que pueden causar caídas de voltaje de fase
Instalación:						
Dispositivos especiales	-	+	+	-	-	El sistema TT requiere el uso de RCD's .
Número de electrodos a tierra	-	+	+	-/+	-/+	El sistema TT requiere dos electrodos distintivos. El sistema IT ofrece la opción entre uno o dos electrodos.
Numero de cables reducción en el número de cables	-	-	+	-	-	Sólo el sistema TN-C ofrece, en algunos casos, una reducción en el número de cables
Mantenimiento:						
Costo de reparaciones	-	--	--	-	--	El costo de reparaciones depende del daño causado por la amplitud de las corrientes de falla.
Daños de la instalación	+	-	-	++	-	Los sistemas con altas corrientes de falla requieren una revisión en la instalación después de liberar la falla

Tipo de red:	TT recomendado	TN-S	TN-C posible	IT1	IT2 no recomendado
Red grande con electrodos a tierra de alta calidad para partes conductoras expuestas (10 Ω máx)			TT, TN, IT (1) o mixto		
Red grande con electrodos a tierra de baja calidad para partes conductoras expuestas	TN		TN-S		IT (1) , TN-C
Área con disturbios (tormentas)	TN		TT		IT (2)
Red con corrientes altas de fuga (≥500 mA)	TN(4)		IT(4) TT (3) (4)		
Red con líneas exteriores aéreas	TT (5)		TN (5) (6)		IT (6)
Sistema de generación de emergencia en espera	IT		TT		TN(7)
Tipo de cargas:					
Cargas sensibles a corrientes de falla altas (motores,etc.)	IT		TT		TN (8)
Cargas con bajos niveles de aislamiento (hornos eléctricos, máquinas de soldar, elementos de calefacción,etc.)	TN (9)		TT (9)		IT
Numerosas cargas fase neutro (barreno, etc.)	TT (10)				IT (10)
	TN-S				TN - C (10)
Cargas con alto riesgo (grúas, transportador)	TN (11)		TT (11)		IT (11)
Auxiliares numerosos (herramientas)	TN-S		TN-C		TT (12)
			IT (12)*		
Misceláneos					
Suministro por medio de transformador conectado en estrella-estrella (13)	TT		IT sin neutro		IT (13) sin neutro
Lugares con peligro de incendio	IT (15)		TN-S (15)		TN-C (14)
			TT (15)		
Incrementos en el nivel de potencia en un sistema de LV que requiere el uso de un transformador privado	TT (16)				
Instalaciones con modificaciones frecuentes	TT (17)				TN (18) , IT (18)
Instalaciones donde la continuidad de circuitos a tierra es incierta (instalaciones antiguas)	TT (19)		TN-S		TN-C IT (19)
Equipo electrónico (PLC, computadoras)	TN-S		TT		TN-C
Red de monitoreo de control de máquinas, sensores de PLC y actuadores	IT (20)		TN-S		
			TT		

- (1) Cuando el sistema de arreglo de tierra (SEA) no está impuesto por regulaciones, se selecciona de acuerdo al nivel de características de operación (continuidad del servicio que es obligatorio por razones de seguridad o el deseo de incrementar la productividad, etc.) La probabilidad de una falla de aislamiento se incrementa con la longitud de la red, no importando el tipo de SEA. Es recomendado dividir la red, lo que facilita la localización de fallas y hace posible implementar el sistema recomendado en la tabla de acuerdo a cada tipo de aplicación.
- (2) El peligro de arqueo en el limitador de picos hace que el neutro se vuelva un neutro aterrizado. Estos peligros son altos para regiones donde ocurren muchas tormentas eléctricas o en instalaciones con cables de alto voltaje aéreos. Si se selecciona el sistema IT para asegurar un mejor nivel en la continuidad del servicio, el diseñador del sistema debe calcular las condiciones de disparo para una segunda falla.
- (3) Posibilidad de disparos en falso de RCD's.
- (4) No importa el tipo de SEA, la solución es aislar la sección con la falla si ésta se puede identificar fácilmente.
- (5) Existe la posibilidad que las fallas de fase a tierra afecten la equipotencialidad.
- (6) El aislamiento es inseguro debido a la humedad y el polvo conductor.
- (7) El sistema TN no se recomienda debido a la posibilidad de daño al generador en caso de una falla interna. Cuando un grupo de generadores suministran equipo de seguridad, el sistema no debe dispararse en la primera falla.
- (8) La corriente de fase a tierra puede ser muchas veces mayor a la corriente nominal I_n , con el peligro de dañar o acelerar el envejecimiento de los embobinados de los motores o de destruir circuitos magnéticos.
- (9) Para combinar continuidad del servicio con seguridad es recomendable separar éstas cargas, sin importar el tipo de SEA, del resto de la instalación (transformadores con conexión de neutro local).

- (10) Cuando la calidad del equipo de carga no es una prioridad de diseño, hay una posibilidad que la resistencia de aislamiento caiga rápidamente. El sistema TT con RCD's es la mejor opción para evitar problemas.
- (11) La movilidad de este tipo de cargas causa fallas frecuentes. Se recomienda alimentar este tipo de circuitos con transformadores con una conexión de neutro local.
- (12) Requiere el uso de transformadores con un sistema TN local para evitar peligros de operación y disparos en falso durante la primer falla (TT) o una falla doble (IT)
- (12)* Con un rompe cargas doble en el circuito de control.
- (13) Limitación excesiva de la corriente de fase a neutro debido al alto de la impedancia de secuencia 0 (al menos 4 a 5 veces la impedancia directa). El sistema debe reemplazarse por un arreglo estrella-delta.
- (14) La corrientes de falla elevadas hacen al sistema TN peligroso. El sistema TN-C está prohibido.
- (15) No importando el tipo de SEA, el RCD se debe ajustar para $\Delta n \leq 500$ mA.
- (16) Una instalación suministrada en bajo voltaje LV debe usar el sistema TT. Utilizar este tipo de SEA significará un menor número de modificaciones en la red existente.
- (17) Posible sin personal de mantenimiento altamente calificado.
- (18) Este tipo de instalación requiere especial atención para mantener la seguridad. La ausencia de medidas de prevención en el sistema TN significa que se requerirá personal altamente calificado para asegurar la seguridad.
- (19) El peligro de rompimiento en los conductores (alimentación, protección) puede causar la pérdida de equipotencialidad para partes conductoras expuestas. Un sistema TT o un sistema TN-S con RCD's de 30mA es recomendado y a veces obligatorio. El sistema IT se puede usar en casos específicos.
- (20) Esta solución evita los disparos en falso para fugas a tierra inesperadas.

10.12 Implementación del sistema de tierras

Después de consultar las regulaciones que apliquen al sistema de tierras se pueden usar las tablas anteriores como una ayuda para determinar en las divisiones o posible aislamiento galvánico de las secciones apropiadas de la instalación propuesta.

10.12.1 División de la fuente

Esta técnica concierne el uso de varios transformadores en lugar de usar un transformador grande. De esta manera, una carga que es una fuente de disturbios en la red (motores grandes, hornos, etc.) se pueden alimentar por su propio transformador. Por consiguiente se mejora la calidad y continuidad del servicio en la instalación. El costo del equipo de switcheo se reduce (corriente de cortocircuito menor). La efectividad-costo de transformadores separados se debe determinar en cada caso por separado.

10.12.2 Islas en la red

La creación de 'islas' separadas galvánicamente por medio de transformadores LV/LV hace posible optimizar la elección de métodos de tierra que reúnan requerimientos específicos.

10.12.3 Conclusión

La optimización en el desempeño de toda la instalación gobierna la elección del sistema de tierras. Tomando en cuenta: inversión inicial y gastos operacionales futuros, que son difíciles de avaluar, y que pueden surgir por insuficiencia en la calidad del equipo, seguridad, continuidad del servicio, etc.

Una estructura ideal comprenderá de fuentes de potencia normales, fuentes de suministro de potencia de reserva, y los arreglos de tierra adecuados.

La calidad de un electrodo a tierra (resistencia lo más baja posible) depende esencialmente de dos factores: método de instalación y tipo de tierra o suelo.

Existen 3 tipos de métodos de instalación:

a) Anillo enterrado

Ésta solución es altamente recomendada, especialmente para edificaciones nuevas. El electrodo se debe enterrar en el perímetro de las excavaciones realizadas para los cimientos. Es importante que el conductor desnudo esté en contacto con la tierra (y no puesto en la grava). Al menos 4 conductores espaciados en un arreglo vertical del electrodo se deben proveer para las conexiones de la instalación y donde sea posible las barras de refuerzo del concreto deben conectarse al electrodo.

El conductor que forma el electrodo a tierra debe estar al menos 50 cm debajo de la base de concreto de los cimientos. Los electrodos y los conductores verticales que suben al nivel del suelo no deben estar nunca en contacto con el concreto de los cimientos.

Para edificaciones existentes el conductor del electrodo debe enterrarse afuera de la pared exterior de la edificación a una profundidad de al menos 1 m. Como una regla general, todas las conexiones verticales de un electrodo al nivel del suelo deben estar aisladas para un voltaje nominal de 600-1000V.

Los conductores pueden ser:

- Cobre: Cable sin aislamiento ($\geq 25 \text{ mm}^2$) o tira múltiple ($\geq 25 \text{ mm}^2$ y $\geq 2 \text{ mm}^2$ de espesor).
- Aluminio con cubierta de plomo: Cable ($\geq 35 \text{ mm}^2$).
- Cable galvanizado de acero: Cable sin aislamiento ($\geq 95 \text{ mm}^2$) o tira múltiple ($\geq 100 \text{ mm}^2$ y $\geq 3 \text{ mm}^2$ de espesor).

La resistencia R en ohmios del electrodo aproximada:

$$R = 2 \rho / L$$

donde

L = longitud de los conductores en metros

ρ = resistividad del suelo en ohmios-metros.

b) Electrodo de barra

Generalmente se usan electrodos de barra para edificaciones existentes y para mejorar (reducir la resistencia) de electrodos existentes.

Éstas barras pueden ser:

- Cobre o cobre blindado con acero. Estas últimas son generalmente de uno o dos metros de longitud y están provistas de puntas enroscadas para permitir que lleguen a profundidades considerables como en lugares con alta resistividad del suelo.
- Tubo de acero galvanizado $\geq 25 \text{ mm}^2$ de diámetro o barra con $\geq 15 \text{ mm}^2$ de diámetro, $\geq 2 \text{ m}$ de longitud en cada caso.

Es muy frecuente utilizar más de una barra, en cuyo caso el espaciamiento entre las mismas deber ser mayor que la profundidad de las barras por un factor de 2 a 3.

La resistencia total (en suelo homogéneo) es igual a la resistencia de una barra dividida por el número de barras en cuestión. La resistencia aproximada en ohmios si la distancia entre barras $< 4L$ es:

$$R = \rho / (n L)$$

Donde:

L = longitud de barras en metros

ρ = resistividad del suelo en ohmios-metros

n = número de barras

c) Placas verticales

Muchas veces se usan placas rectangulares, donde cada lado debe ser ≥ 5 metros como electrodos a tierra. Se entierran en un plano vertical de tal manera que el centro de la placa esté a una profundidad de 1 metro debajo de la superficie del suelo.

Las placas pueden ser de cobre de 2mm de espesor o de acero galvanizado de 3 mm de espesor. La resistencia en ohmios está dada aproximadamente por:

$$R = 0.8\rho/L$$

L = perímetro de la placa en metros

ρ = resistividad del suelo en ohmios-metros

11. TABLEROS DE DISTRIBUCIÓN

11.1 El sistema de instalación

Un tablero de distribución es el punto donde la entrada de la fuente de potencia se divide en circuitos separados, donde cada uno de éstos circuitos está controlado por los fusibles o equipo de switcheo del tablero. Un tablero de distribución se divide en un número de unidades funcionales, cada uno compuesto de elementos mecánicos y eléctricos para cumplir con alguna función. Consecuentemente el tipo de tablero de distribución debe estar perfectamente adaptado para su aplicación. Su diseño y construcción debe cumplir con los estándares que apliquen y prácticas de trabajo.

Los tableros de distribución ofrecen dos tipos de protección:

- Protección de equipo de switcheo, instrumentos de indicación, fusibles, etc. contra impactos mecánicos, vibraciones y otras influencias externas que pueden interferir con la operación (polvo, humedad, plagas, etc.)
- La protección de vidas humanas contra la posibilidad de contacto directo o indirecto con componentes eléctricos.

11.2 Tipos de tableros de distribución

Los tableros de distribución varían de acuerdo al tipo de aplicación y el diseño adoptado (principalmente en las barras).

Los tipos principales de tableros de distribución son:

- Tablero principal de bajo voltaje LV (MLVS).
- Centros de control de motores (MCC).
- Tableros de sub-distribución.
- Tableros de distribución final.

Los tableros de distribución de aplicaciones específicas (calefacción,, elevadores, procesos industriales) pueden localizarse adyacentes al tablero principal de bajo voltaje LV o cerca de la aplicación en cuestión.

Los tableros de sub-distribución y de distribución final generalmente se distribuyen a lo largo de la instalación.

Existen dos tipos de tableros de distribución:

a) Tableros de distribución tradicionales:

El equipo de switcheo y los fusibles o relevadores se localizan normalmente en el chasis en la parte posterior del tablero y los instrumentos de indicación (lámparas, indicadores, botones, etc.) están montados en la parte de enfrente del tablero.

El posicionamiento de los componentes en el tablero requiere un estudio cuidadoso, tomando en consideración las dimensiones de cada componente, las conexiones a realizarse al mismo, y los espacios necesarios para asegurar una operación segura y libre de problemas.

b) Tableros de distribución funcionales:

Generalmente utilizados para aplicaciones especiales, estos tableros de distribución están compuestos de módulos funcionales que incluyen dispositivos de switcheo junto con accesorios estandarizados para el montaje y las conexiones. Asegurando así una operación confiable y una gran capacidad para cambios de último minuto y cambios futuros.

Los tableros de distribución funcionales se usan mucho en todo los niveles de bajo voltaje de distribución debido a sus múltiples ventajas:

- Modularidad del sistema, que hace posible integrar numerosas funciones en un solo tablero, incluyendo, protección, control, dirección técnica y monitoreo de las instalaciones eléctricas. El diseño modular también simplifica la operación y mantenimiento de los tableros de distribución.
- El diseño del tablero de distribución es más rápido ya que simplemente involucra agregar módulos funcionales.
- Los componentes prefabricados se pueden montar más fácilmente.

11.3 Cables y vías para los cables

11.3.1 Definiciones

- Conductor: Un conductor está compuesto de un núcleo metálico único con o sin aislamiento.
- Cable: Un cable está compuesto de un número de conductores separados eléctricamente, pero unidos mecánicamente.
- Cable carril: El término cable carril se refiere a conductores y/o cables juntos con medios para protección y soporte. Por ejemplo: canaletas, ductos, etc.

11.3.2 Identificación de conductores

La identificación de conductores debe respetar tres reglas básicas:

- Regla 1: El color doble amarillo y verde está reservado estrictamente para los conductores de protección PE y PEN.
- Regla 2: Cuando un circuito comprende un conductor neutro, éste debe ser azul claro o marcado '1' para circuitos con más de cinco conductores. Cuando el circuito no tiene un conductor neutro, el conductor azul claro puede usarse como un conductor de fase si es parte de un cable con más de un conductor.
- Regla 3: Los conductores de fase pueden ser de cualquier color excepto: verde, amarillo y verde, amarillo y azul claro (ver regla 2).

Si un circuito incluye un conductor de protección y si el cable disponible no contiene un conductor verde y amarillo, el conductor de protección puede ser:

- Un conductor verde amarillo separado.
- Un conductor negro si el circuito tiene un conductor neutro.

En éstos dos casos, el conductor usado debe estar marcado con bandas verdes y amarillas o por marcas en los extremos o en todas las partes visibles del conductor.

11.3.3 Métodos de distribución e instalación

La distribución se lleva a cabo por medio de cable carriles que llevan conductores aislados o cables que incluyen un sistema para el montaje y la protección mecánica.

Los métodos de instalación dependen de el tipo de conductor o cable y el sistema de montaje o cable carril.

Los métodos de instalación enlistados en el estándar IEC 60364-5-52 tienen un impacto en la corriente permisible que los conductores o cables pueden llevar en los cable carriles.

12. LA PROTECCIÓN DE CIRCUITOS

Después de realizar un análisis de la potencia requerida de la instalación, se lleva a cabo un estudio del cableado y su protección eléctrica, empezando por el origen de la instalación, a través de las etapas intermedias, hasta los circuitos finales.

El cableado y su protección en cada nivel debe satisfacer varias condiciones al mismo tiempo para asegurar una instalación segura y confiable. Debe poder llevar la corriente de plena carga y las sobre-corrientes normales de corto tiempo. También no debe causar caídas de voltaje que puedan resultar en el desempeño inferior de ciertas cargas, como por ejemplo un período de aceleración muy largo al arrancar un motor.

Los dispositivos de protección (fusibles y corta circuitos) deben proteger los cables y barras para todos los niveles de sobre corrientes, incluyendo corrientes de corto circuito.

El área transversal de los conductores debe determinarse tras hacer un estudio de la corriente requerida por las cargas. Algunos estándares pueden recomendar un área transversal mínima por razones de resistencia mecánica.

12.1 Procedimiento para la selección de los cables y equipo de protección para un circuito

Para determinar el área transversal de un circuito se deben seguir los siguientes pasos:

- Determinar la demanda de potencia:

kVA requeridos por la instalación. Con esto se determina la corriente de carga máxima I_b .

- Selección de los conductores:

Selección del tipo de conductor y aislamiento. Selección del método de instalación. Tomar en cuenta factores de corrección por condiciones ambientales. Determinación del área transversal usando tablas, tomando en cuenta la capacidad de corriente.

- Verificación de la caída de voltaje máxima:

Condiciones en estado estable. Condiciones durante arranque de motores.

- Cálculo de corrientes de cortocircuito: Potencia de cortocircuito. Valores máximos. Valores mínimos en los extremos de los conductores.

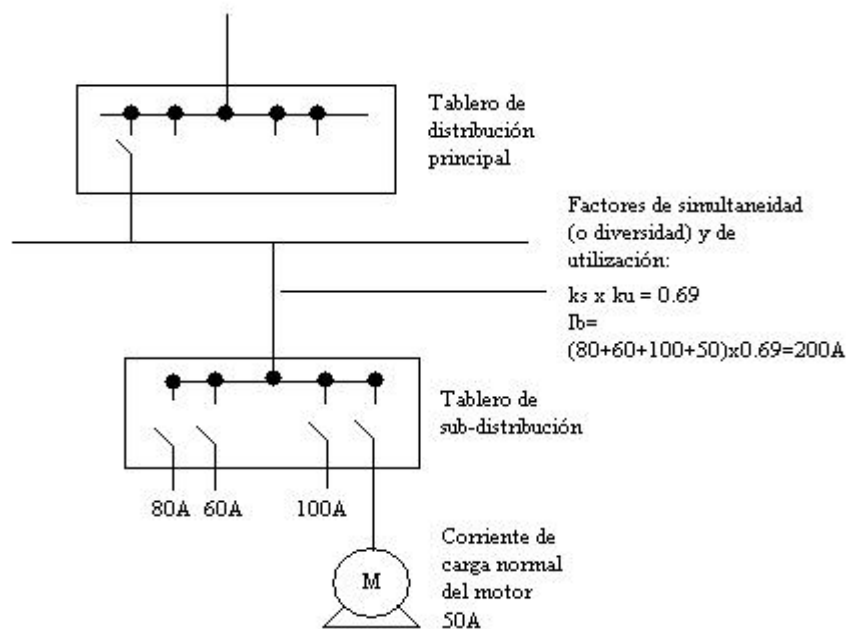
- Selección de dispositivos de protección:

Corriente nominal. Capacidad de disparo. Implementación en cascada. Revisar discriminación de la protección.

La corriente máxima de carga I_b corresponde a la potencia kVA nominal de la carga. En el caso de arranque de motores o en ciertas cargas, se deben tomar en cuenta los efectos térmicos acumulativos de las sobre corrientes. Tanto los cables como los relevadores térmicos se ven afectados.

En todos los circuitos más arriba del punto en cuestión, ésta corriente corresponde a los kVA que serán suministrados, tomando en cuenta factores de simultaneidad y de utilización, k_s y k_u respectivamente.

Figura 12: Ejemplo para el cálculo de la corriente máxima de carga I_b



La corriente I_z es la corriente permisible máxima. Es el valor máximo de la corriente que el cableado del circuito puede llevar sin reducir su esperanza de vida normal. La corriente depende para un área transversal de conductores dado en varios parámetros como:

- Constitución del cable y el cable carril (conductores de aluminio o de cobre, aislamiento, número de conductores activos, etc.)
- Temperatura ambiente.
- Método de instalación.
- Influencia de circuitos vecinos.

Una sobre-corriente ocurre cuando el valor de la corriente excede el valor de la corriente de carga máximo I_b para la carga en cuestión. Ésta corriente debe ser cortada con una rapidez que depende de su magnitud para prevenir daño al cableado o a la carga.

Las sobre-corrientes de corta duración pueden ocurrir durante la operación normal. Se pueden distinguir 2 tipos de sobre-corrientes:

- Sobrecargas: Éstas sobre-corrientes pueden ocurrir en circuitos eléctricos ‘sanos’, por ejemplo debido a un número de cargas de corta duración que ocurren coincidentalmente: cargas de arranque de motores, etc. Si estas condiciones persisten después de un período de tiempo dado (dependiendo de los relevadores de protección y fusibles) el circuito será cortado automáticamente.
- Corrientes de cortocircuito: Éstas corrientes resultan por fallas en el aislamiento entre conductores vivos o entre conductores vivos y tierra.

12.2 Protección contra sobre corrientes

Un dispositivo de protección en un circuito debe actuar para cortar la corriente en un tiempo menor que el dado por la característica I^2t del cableado del circuito, pero permitiendo que fluya la corriente máxima de plena carga I_b indefinidamente.

Las características de conductores con aislamiento cuando llevan corrientes de cortocircuito pueden, por períodos de hasta 5 segundos seguidos de la inicialización de la corriente de cortocircuito pueden determinarse por la fórmula:

$I^2t = k^2S^2$ que muestra que el calor generado es proporcional al área transversal del conductor.

Donde:

t = duración de la corriente de cortocircuito (en segundos)

S = área transversal del conductor con aislamiento (en mm²)

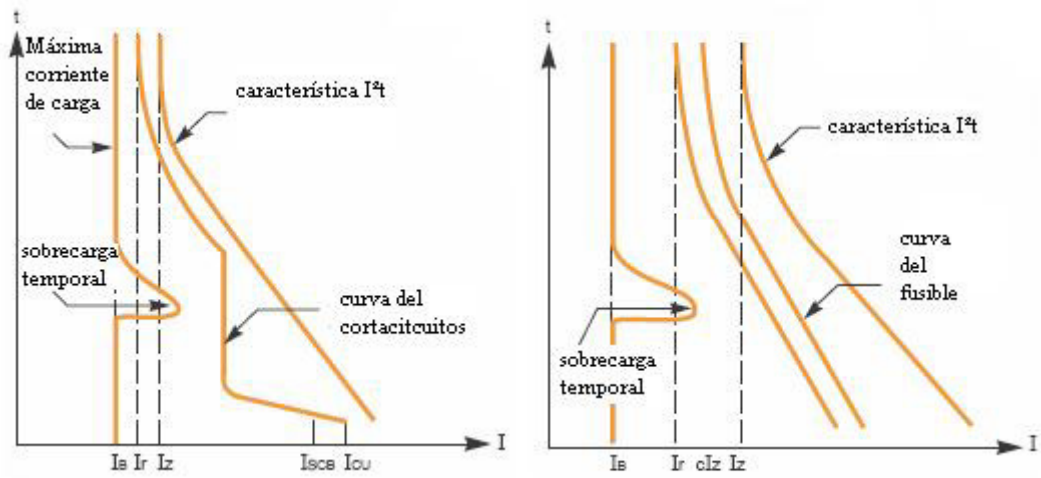
I = corriente de cortocircuito (A r.m.s.)

k = constante de aislamiento del conductor

El factor k² está dado por

Aislamiento	conductor cobre (Cu)	conductor aluminio (Al)
PVC	13,225	5,776
XLPE	20,449	8,836

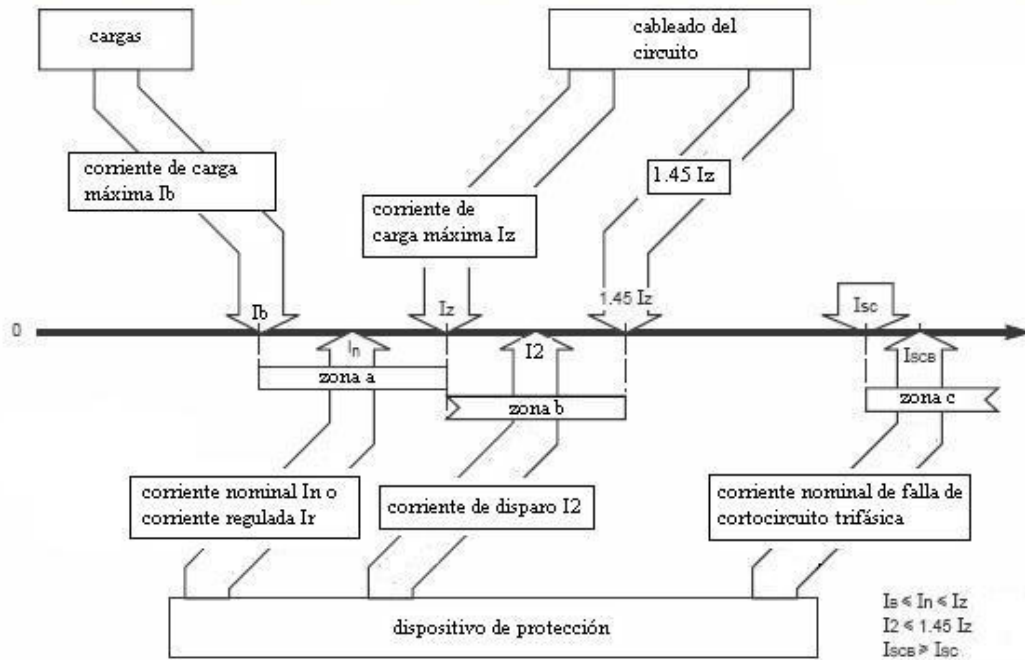
Figura 13: Protección por medio de corta circuitos y fusibles



a) protección por medio de corta circuitos

b) protección con fusibles

Figura 14: Niveles de corriente para determinar el corta circuitos o las características de los fusibles



Donde:

I_{sc} : corriente de cortocircuito

I_{scb} : corriente nominal de cortocircuito del cortacircuitos

I_r : corriente regulada nominal. Por ejemplo un cortacircuito de 50amperios puede regularse para un rango de protección, nivel de disparo de sobre corriente nominal, similar a uno de 30 amperios.

I_2 es la corriente (denotada I_f) que operará el fusible en el tiempo convencional.

Un dispositivo de protección (corta circuitos o fusible) funciona correctamente si:

- Su corriente nominal o seleccionada I_n es mayor que la corriente máxima de carga I_b pero menor que la corriente máxima permisible I_z del circuito; $I_b \leq I_n \leq I_z$, correspondiendo a la zona a de la figura 14.
- EL valor de su corriente de disparo convencional I_2 es menor que $1.45 I_z$ que corresponde a la zona b de la figura 14.
- La corriente de falla trifásica nominal de cortocircuito es mayor que la corriente de cortocircuito trifásica existente en su punto de instalación que corresponde a la zona c de la figura 14.

Criterio para corta circuitos : $I_b \leq I_n \leq I_z$, $I_{scb} \geq I_{sc}$

- La corriente I_2 es siempre menor que $1.45 I_n$ (o $1.45 I_r$)

Si el cortacircuito no protege contra sobrecargas, es necesario asegurar que en el tiempo en que es menor la corriente de cortocircuito, el dispositivo de sobre corriente que protege el circuito opere correctamente.

Criterio para fusibles: $I_b I_n \leq I_z/k_3$, $I_{scf} \geq I_{sc}$

Se debe tomar en cuenta la condición $I_2 \leq 1.45 I_z$, donde I_2 es la corriente del fusible (rompimiento del fusible), igual a $k_2 \times I_n$ (k_2 varía entre 1.6 a 1.9) dependiendo del tipo de fusible en cuestión.

Se introduce un nuevo factor k_3 ($k_3 = k_2/1.45$) de manera que $I_2 \leq 1.45 I_z$ sea válido si $I_n \leq I_z/k_3$.

La corriente de cortocircuito de disparo del fusible I_{scf} debe exceder la corriente de cortocircuito trifásica en el punto de la instalación del fusible, también un dispositivo de protección es necesario en el origen de cada circuito donde ocurre una reducción del nivel máximo de corriente permisible.

13. DETERMINACIÓN DE LA CAÍDA DE VOLTAJE EN CONDUCTORES

Cuando un conductor lleva la corriente de carga hay una caída de voltaje entre el origen del circuito y las terminales de la carga. El correcto funcionamiento de una carga (un motor, un circuito de iluminación, etc.) depende en que el voltaje en sus terminales se mantenga en un valor cercano a su voltaje nominal. Es necesario determinar los conductores del circuito de manera que a corriente máxima de la carga, se mantenga el voltaje en las terminales de la carga dentro de los límites requeridos para el desempeño óptimo de la carga.

La caída máxima de voltaje en conductores típica permitida es:

- Para una instalación de bajo voltaje conectada a la red de bajo voltaje de la empresa proveedora de electricidad es 3 % para circuitos de iluminación y 5 % para otros usos (calefacción y potencia).
- Para una subestación HV/LV alimentada por la red de HV de la empresa proveedora es 6 % para circuitos de iluminación y 8 % para otros usos.

Éstos límites para la caída de voltaje son para operación en estado estable y no aplican para el arranque de motores, uso simultáneo de varias cargas, etc. Cuando la caída de voltaje excede los valores dados anteriormente, se deben usar conductores de mayor calibre para corregir la situación.

El valor de 8% aunque es permitido, puede llevar a problemas para cargas como motores ya que generalmente el desempeño satisfactorio de un motor requiere un voltaje entre $\pm 5\%$ de su valor nominal en operación en estado estable.

La corriente de arranque de un motor puede ser entre 5 y 7 veces su valor a plena carga (o inclusive mayor). Si una caída de voltaje de 8 % ocurre a corriente de plena carga, entonces una caída de 40 % o más ocurrirá durante el arranque. En dicho caso el motor puede:

- Permanecer estacionario debido al torque insuficiente para sobreponer el torque de la carga con el consecuente calentamiento del motor y un eventual disparo de la protección. - Acelerar muy despacio, para que la corriente de carga (con una disminución del voltaje en otros equipos) continúe después del período normal de arranque.

Una caída de voltaje del 8 % representa una continua pérdida de potencia, que para cargas continuas, representará un gasto significativo de la energía. Por ésta razón es recomendable que el valor máximo de 8 % en condiciones de operación estable no debe alcanzarse en circuitos que son sensibles a problemas de voltaje.

13.1 Cálculo de la caída de voltaje en condiciones de carga estable

La caída de voltaje en conductores se puede determinar por las fórmulas:

monofásico fase/fase: $\Delta U = 2I_b(R\cos\phi + X\sin\phi)L$; en % : $100\Delta U / U_n$

monofásico fase/neutro: $\Delta U = 2I_b(R\cos\phi + X\sin\phi)L$; en % : $100\Delta U / V_n$

balanceado trifásico (con o sin neutro): $\Delta U = \sqrt{3}I_b(R\cos\phi + X\sin\phi)L$;

en % : $100\Delta U / U_n$

Donde:

Ib: corriente de plena carga en amperios

L: longitud del cable en kilómetros

R: resistencia del conductor en Ω/km

S: área transversal del conductor en mm^2

X: reactancia inductiva del conductor en Ω/km

Un: voltaje fase a fase

Vn: voltaje fase a neutro

$R = (22.5 \Omega \text{ mm}^2/\text{km})/S$ para conductores de cobre

$R = (36 \Omega \text{ mm}^2/\text{km})/S$ para conductores de aluminio

R es despreciable para conductores de más de 500 mm^2

X es despreciable para conductores con menos de 50 mm^2 . En el caso de no tener información de la reactancia inductiva, tomar X como $0.08 \Omega/\text{km}$.

φ : ángulo de fase entre el voltaje y la corriente en el circuito en consideración.

Para una lámpara incandescente $\cos\varphi = 1$

Para motores:

En el arranque $\cos\varphi = 0.35$, en servicio normal $\cos\varphi = 0.8$.

13.1.1 Cálculo simplificado para determinar la caída de voltaje en conductores

Se pueden evitar los cálculos usando la tabla III que tiene una aproximación adecuada para determinar la caída de voltaje fase a fase por kilómetro de cable por amperios, en términos del tipo de circuito ya sea con motores o de iluminación y el tipo de cable, una fase o tres fases.

La caída de voltaje está dada entonces por:

$$K \times I_b \times L$$

Donde:

K: está dada por la tabla

I_b: corriente de plena carga en amperios

L: longitud del cable en km

La columna $\cos\phi = 0.35$ puede usarse para calcular la caída de voltaje en el arranque de un motor.

Tabla III: Caída de voltaje fase a fase ΔU para un circuito en voltios por amperios por kilómetro

Área transversal del cable		Circuito monofásico			Circuito trifásico balanceado		
		Potencia del motor		Iluminación	Potencia del motor		Iluminación
		Servicio normal	Arranque		Servicio normal	Arranque	
Cu	Al	$\cos\phi=0.8$	$\cos\phi=0.35$	$\cos\phi=1$	$\cos\phi=0.8$	$\cos\phi=0.35$	$\cos\phi=1$
1.5		24	10.6	30	20	9.4	25
2.5		14.4	6.4	18	12	5.7	15
4		9.1	4.1	11.2	8	3.6	9.5
6	10	6.1	2.9	7.5	5.3	2.5	6.2
10	16	3.7	1.7	4.5	3.2	1.5	3.6
16	25	2.36	1.15	2.8	2.05	1	2.4
25	35	1.5	0.75	1.8	1.3	0.65	1.5
35	50	1.15	0.6	1.29	1	0.52	1.1
50	70	0.86	0.47	0.95	0.75	0.41	0.77
70	120	0.64	0.37	0.64	0.56	0.32	0.55
95	150	0.48	0.30	0.47	0.42	0.26	0.4
120	185	0.39	0.26	0.37	0.34	0.23	0.31
150	240	0.33	0.24	0.30	0.29	0.21	0.27
185	300	0.29	0.22	0.24	0.25	0.19	0.2
240	400	0.24	0.2	0.19	0.21	0.17	0.16
300	500	0.21	0.19	0.15	0.18	0.16	0.13

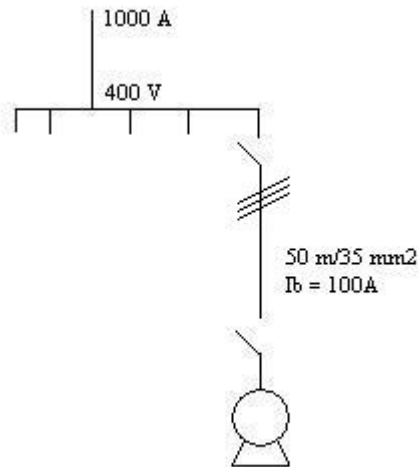
Ejemplo1:

Un circuito trifásico con cable de cobre de 35 mm² de 50 metros de largo alimenta un motor de 400V con:

100 amperios con $\cos\phi = 0.8$ a carga permanente normal

500 amperios con $\cos\phi = 0.35$ durante el arranque

Figura 15 : Ejemplo 1 para el cálculo de la caída de voltaje



La caída de voltaje en el origen del motor bajo condiciones normales con el tablero de distribución de la figura 15 que distribuye un total de 1000 amperios es de 10 V fase a fase. La caída de voltaje en condiciones normales $\Delta U \% = 100\Delta U/U_n$. La tabla muestra que 1V/A/km de manera que:

$$\Delta U \text{ para el cable} = 1 \times 100 \times 0.05 = 5V$$

$$\Delta U \text{ total} = 10 + 5 = 15 V$$

$$15/400 \times 100 = 3.75 \%$$

Este valor es menor que el valor recomendado de 8 % y es satisfactorio.

La caída de voltaje durante el arranque

$$\Delta U \text{ del cable} = 0.52 \times 500 \times 0.05 = 13 V$$

Debido a la corriente adicional tomada por el motor durante el arranque, la caída de voltaje en el tablero de distribución será mayor a 10 V.

Suponiendo que el aumento de corriente en el tablero durante el arranque es $900 + 500 = 1400A$, entonces la caída de voltaje en el tablero de distribución se incrementará: $(10 \times 1400)/1000 = 14 V$

$$\Delta U \text{ del tablero de distribución} = 14 V$$

$$\Delta U \text{ del cable del motor} = 13 V$$

$$\Delta U \text{ total} = 13 + 14 = 27 V$$

$$27/400 \times 100 = 6.75 \%$$

que es un valor satisfactorio en el arranque de motores.

Ejemplo 2:

Un línea de 70 mm², trifásica, 4 cables de cobre y una longitud de 50 m lleva una corriente de 150 amperios. La línea alimenta, entre otras cargas, 3 circuitos de iluminación monofásicos, cada uno de 2.5 mm² de cobre y 20 metros de largo con 20 amperios cada uno. Se asume que las corrientes en el cable de 70 mm² están balanceadas y que los 3 circuitos de iluminación están conectados a él en el mismo punto.

Solución:

Caída de voltaje en la línea de 4 cables:

$$\Delta U\% = 100\Delta U/U_n$$

La tabla muestra 0.55 V/A/km

$$\Delta U \text{ de la línea} = 0.55 \times 150 \times 0.05 = 4.125 \text{ V fase a fase}$$

para fase a neutro:

$$4 \times 125/\sqrt{3} = 2.38 \text{ V}$$

Caída de voltaje en cualquiera de los circuitos de iluminación:

La tabla muestra 18 V/A/km

$$\Delta U \text{ para un circuito monofásico} = 18 \times 20 \times 0.02 \text{ V} = 7.2 \text{ V}$$

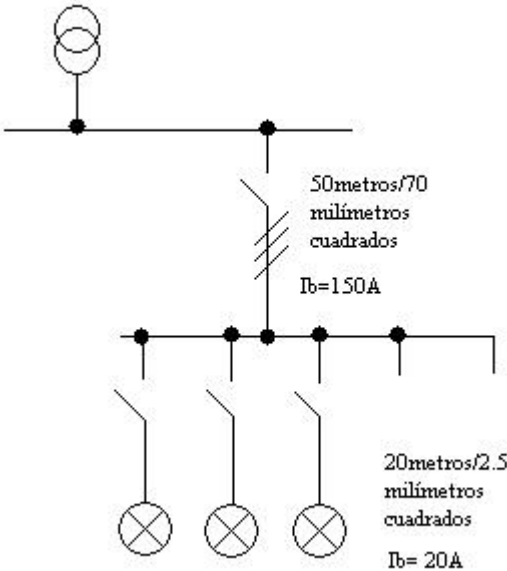
La caída de voltaje total será:

$$2.38 + 7.2 = 9.6 \text{ V}$$

$$9.6\text{V}/230\text{V} \times 100 = 4.2\%$$

Este valor es satisfactorio ya que es menor que el valor recomendado de 6%.

Figura 16: Ejemplo 2 para el cálculo de la caída de voltaje



14. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

Un conocimiento de las corrientes simétricas de cortocircuito (I_{sc}) en puntos estratégicos de la instalación es necesario para determinar el equipo de switcheo (corriente de falla), cables (resistencia térmica), dispositivos de protección (valor seleccionado para el disparo), etc.

Se examinará una corriente de cortocircuito trifásica de cero impedancia alimentada por un transformador de distribución típico HV/LV. Este tipo de falla es la más severa y la más simple de calcular. Los cálculos simplificados dan un resultado satisfactorio con buena exactitud, en la mayoría de los casos, con el objetivo del diseño de una instalación.

La impedancia del sistema de alto voltaje HV se asume pequeña de manera que

$$I_{sc} = (I_n \times 100) / U_{sc}$$

donde

$$I_n = P \times 10^3 / (U_{20} \times \sqrt{3})$$

P = kVA nominal del transformador

U_{20} = voltaje fase a fase en el secundario con circuito abierto

I_n = corriente nominal en amperios

I_{sc} = corriente de cortocircuito en amperios

U_{sc} = impedancia de cortocircuito del transformador en %

Valores típicos de U_{sc} para transformadores son:

kVA del transformador:	U _{sc} en %	
	en aceite	tipo seco
50 - 750	4	6
800 - 3200	6	6

Ejemplo:

Transformador de 400 kVA con 420 V sin carga, $U_{sc} = 4\%$

Solución:

$$I_n = 400 \times 10^3 / (420 \times \sqrt{3}) = 550 \text{ A}$$

$$I_{sc} = 550 \times 100/4 = 13.7 \text{ kA}$$

La corriente de cortocircuito trifásica en cualquier punto dentro de una instalación de bajo voltaje LV está dada por:

$$I_{sc} = U_{20} / (\sqrt{3} \times Z_T)$$

donde

U_{20} = voltaje fase a fase con el secundario abierto del transformador

Z_T = impedancia total por fase de la instalación arriba de la localización de la falla (en Ω)

14.1 Métodos para calcular la impedancia total Z_T

Cada componente de una instalación (red de alto voltaje, transformador, cables, cortacircuitos, barras, etc.) tienen una impedancia Z , que comprende un elemento de resistencia (R) y una reactancia inductiva (X). Las reactancias capacitivas no son importantes para cálculos de cortocircuito.

Los parámetros Z, R, X se expresan en ohmios y están relacionados entre sí por un triángulo equilátero.

El método consiste en dividir la red en secciones convenientes, y calcular R y X para cada sección. Cuando las secciones están conectadas en serie, se suma aritméticamente cada una de las secciones, las resistencias se suman para obtener una RT y las reactancias para obtener una XT. La impedancia total se obtiene de :

$$ZT = \sqrt{(RT^2 + XT^2)}$$

Las secciones conectadas en paralelo pueden combinarse para obtener una resistencia o reactancia equivalente. Sean R1 y R2 dos resistencias conectadas en paralelo, entonces la resistencia equivalente R3 está dada por:

$$R3 = (R1 \times R2)/(R1 + R2)$$

o para las reactancias:

$$X3 = (X1 \times X2)/(X1 + X2)$$

El nivel de la corriente da falla de cortocircuito trifásica Psc en kVA o MVA está dada por la empresa proveedora de electricidad, de la cual se puede obtener una impedancia equivalente.

Valores de Ra y Xa típicos para redes de potencia:

Psc	U0(V)	Ra (mΩ)	Xa (mΩ)
250 MVA	420	0.07	0.7
500 MVA	420	0.035	0.351

Para obtener la impedancia equivalente se usa la fórmula:

$$Z_s = (U_0)^2 / P_{sc}$$

donde

Z_s = impedancia de la red de alto voltaje

U_0 = voltaje de bajo voltaje fase a fase sin carga en voltios

P_{sc} = nivel de falla de corriente de cortocircuito de alto voltaje en kVA

La resistencia R_a de alto voltaje HV es pequeña comparada con la correspondiente X_a , y se toma X_a como el valor de Z_a . Si se requieren cálculos más precisos se puede tomar X_a como 0.995 Z_a y R_a igual a 0.1 X_a .

La impedancia Z_{tr} de un transformador visto desde las terminales de bajo voltaje LV está dada por la fórmula:

$$Z_{tr} = (U_{20})^2 \times U_{sc} / (P_n \times 100)$$

donde:

U_{20} = voltaje fase a fase de circuito abierto del secundario en voltios

P_n = potencia kVA nominal del transformador

U_{sc} = voltaje de impedancia en cortocircuito del transformador expresado en %

La resistencia R_{tr} de los embobinados del transformador se puede deducir de las pérdidas totales

$$P_{cu} = 3I_n^2 \times R_{tr}$$

de manera que

$$R_{tr} = P_{cu} \times 10^3 / 3I_n^2 \text{ en mili ohmios}$$

donde

P_{cu} = pérdidas totales en watts

I_n = corriente nominal en amperios

R_{tr} = resistencia de una fase del transformador en mili ohmios (el embobinado de LV y su correspondiente embobinado de HV para una fase de bajo voltaje están incluidos en este valor de resistencia). R_{tr} se puede ignorar y usarse $X = Z$ para transformadores de distribución.

Se debe tomar en cuenta la impedancia de los cortacircuitos arriba de la localización de la falla. Se puede usar el valor de $0.15 \text{ m}\Omega$ para cada cortacircuitos e ignorarse la resistencia.

La resistencia de las barras es generalmente despreciable de manera que la impedancia es prácticamente reactiva, y se puede usar $0.15 \text{ m}\Omega/\text{metro}^2$ para la longitud de las barras de bajo voltaje.

Para los conductores de los circuitos se puede usar la fórmula:

$$R_c = \rho \times L/S$$

donde

ρ = constante de resistencia del material conductor a temperatura normal de operación
siendo su valor

22.5 m Ω mm²/m para el cobre

36 m Ω mm²/m para el aluminio

L = longitud del conductor en metros

S = área transversal del conductor

Las reactancias de los cables se pueden obtener de los fabricantes. Para cables de menos de 50 mm² se puede ignorar la reactancia. Si no se tiene información se puede usar un valor de 0.096 m Ω /m (para sistemas de 60 Hz).

Un motor actuará (por un período corto) como un generador en el instante de un cortocircuito, y alimentará corriente a la falla. En general se puede ignorar la contribución del motor a la falla, pero para motores grandes o varios motores pequeños se puede estimar la contribución total por medio de la fórmula:

$$I_{scm} = 3.5 I_n \text{ (o } m3.5I_n \text{ para } m \text{ motores similares operando concurrentemente).}$$

Los motores en cuestión serán trifásicos solamente ya que la contribución de motores monofásicos es insignificante.

15. FACTOR DE POTENCIA Y HARMÓNICAS

15.1 Mejoramiento del factor de potencia y filtración de armónicas

Todas las máquinas y dispositivos inductivos (electromagnéticos) que operan en sistemas de corriente alterna (AC) convierten energía eléctrica en trabajo mecánico y calor. Esta energía se mide en medidores de Kwh., y se le refiere como energía activa. Para que se realice ésta conversión, se deben establecer campos magnéticos en las máquinas, y éstos campos están asociados con otra forma de energía suministrada por el sistema de potencia, conocida como energía reactiva.

La razón de esto es que un circuito inductivo cíclicamente absorbe energía del sistema (cuando crecen los campos magnéticos) y reinyecta esa energía al sistema (durante el decrecimiento de los campos magnéticos) dos veces por cada ciclo en la frecuencia del sistema de potencia.

En elementos capacitivos en paralelo en un sistema de potencia ocurre un fenómeno similar, tal como en la capacitancia de los cables o bancos de capacitores de potencia, etc. En este caso la energía se almacena electrostáticamente. El ciclo de carga y descarga de circuitos capacitivos reacciona en los generadores del sistema en la misma manera que para los dispositivos inductivos, pero el flujo de corriente de un circuito capacitivo está en oposición exacta de fase al de un circuito inductivo. Esta característica es la base en que dependen los esquemas de mejoramiento del factor de potencia.

La energía reactiva no toma potencia del sistema, pero causa pérdidas en sistemas de transmisión y distribución por el calentamiento de los conductores.

La potencia (kW) asociada con la energía activa se representa por la letra P. La potencia reactiva (kvar) se representa por la letra Q. La potencia inductiva reactiva es convencionalmente positiva (+Q) mientras la potencia reactiva capacitiva se representa por (-Q). La potencia aparente S (kVA) es una combinación de P y Q.

Todos los equipos y dispositivos AC que incluyen partes electromagnéticas o que dependen de embobinados acoplados magnéticamente, requieren de algún grado de corriente reactiva para crear el flujo magnético. El tipo de equipos más comunes con esta característica son los transformadores, reactores, motores y lámparas de descarga (con balastos magnéticos).

La proporción de potencia reactiva (kvar) con respecto a la potencia activa (kW) cuando un equipo está a plena carga varía de acuerdo al equipo en cuestión: 65-75% para motores asíncronos y 5-10% para transformadores.

15.2 Factor de potencia

El factor de potencia de una carga que puede ser sólo un elemento que consume potencia, o un grupo de elementos (como toda la instalación) está dada por la relación P/S o kW/kVA en cualquier tiempo dado. El valor del factor de potencia varía entre 0 y 1. Si las corrientes y voltajes son señales perfectamente senoidales, el factor de potencia es $\cos\phi$.

Un factor de potencia cercano a la unidad indica que la energía reactiva es pequeña comparada a la energía activa, mientras que un valor bajo indica lo contrario.

Diagrama del vector de potencia:

- Potencia activa P (en kW)

monofásico (fase a neutro): $P = VI \cos\phi$

monofásico (fase a fase): $P = UI \cos\phi$

trifásico (3 cables ó 3 cables + neutro): $P = \sqrt{3} UI \cos\phi$

- Potencia reactiva (kVAR)

monofásico (fase a neutro): $P = VI \sin\phi$

monofásico (fase a fase): $Q = UI \sin\phi$

trifásico (3 cables ó 3 cables + neutro): $P = \sqrt{3} UI \sin\phi$

- potencia aparente S (kVA)

monofásico (fase a neutro): $S = VI$

monofásico (fase a fase): $S = UI$

trifásico (3 cables ó 3 cables + neutro): $P = \sqrt{3} UI$

donde:

V = voltaje entre fase y neutro

U = voltaje entre fases

I = corriente en la línea

ϕ = ángulo de fase entre los vectores V e I

El mejoramiento del factor de potencia reduce las pérdidas (P, kW) en los cables. Las pérdidas en los cables son proporcionales al cuadrado de la corriente. La reducción de la corriente por un 10 % por ejemplo, reducirá las pérdidas en casi un 20 %.

El mejoramiento del factor de potencia también reduce o inclusive cancela la corriente inductiva reactiva en los conductores, por consiguiente reduciendo o eliminando la caída de voltaje.

Al mejorar el factor de potencia de una carga alimentada por un transformador, la corriente a través del transformador se reducirá, permitiendo así agregar más carga. En la práctica puede ser más económico mejorar el factor de potencia que reemplazar el transformador por una unidad más grande.

15.3 Principios para mejorar el factor de potencia

Una carga inductiva con un factor de potencia bajo requiere que los generadores y sistemas de transmisión y distribución pasen corriente reactiva (atrasada 90 grados el voltaje del sistema) con las pérdidas de potencia y exagerada caída de voltaje asociadas. Si se agrega un banco de capacitores en paralelo a la carga, su corriente inductiva (capacitiva) tomará el mismo camino por el sistema de potencia que el de la corriente reactiva de la carga. Esta corriente capacitiva I_c (que se adelanta al voltaje del sistema por 90 grados) está en oposición de fase directa a la corriente inductiva de la carga I_l , y las dos componentes circulando por el mismo camino se cancelarán a si mismas. Si el banco de capacitores es suficientemente grande $I_c = I_l$, y no habrá flujo de corriente reactiva en el sistema.

Ejemplo:

Un motor consume 100kW a un factor de potencia de 0.75 ($\tan\phi = 0.88$). Para mejorar el factor de potencia a 0.93 ($\tan\phi = 0.4$) la potencia reactiva del banco de capacitores debe ser $Q_c = 100(0.88 - 0.4) = 48\text{kvar}$.

La compensación para mejorar el factor de potencia se puede lograr por medio de un capacitor de un valor fijo, o por equipo que provee regulación automática, o bancos que permiten ajustes continuos de acuerdo a los requerimientos en los cambios de la carga de la instalación.

15.3.1 Capacitores fijos

Este arreglo emplea uno o varios capacitores para formar un nivel de compensación fijo. El control puede ser manual por cortacircuito o switch para cortar la carga, semiautomático por medio de un contactor o por medio de una conexión directa al equipo y conectada con el mismo.

Los capacitores se conectan en:

- Las terminales de dispositivos inductivos (motores y transformadores)
- Las barras que alimentan un número de motores pequeños o equipos inductivos, para los cuales la compensación individual sería muy costosa.

Este arreglo también se usa en los casos en que el nivel de la carga es razonablemente constante.

15.3.2 Bancos de capacitores automáticos

Este tipo de equipo provee compensación automática, manteniendo el factor de potencia en los límites alrededor del valor seleccionado. Este equipo se aplica en los puntos de la instalación en los que las variaciones de potencia activa y/o potencia reactiva son muy grandes. Por ejemplo en las barras de un tablero de distribución general o en las terminales de un cable de alimentación con mucha carga.

El banco de capacitores está dividido en un número de secciones, cada uno de las cuales está controlada por un contactor. El cierre de un contactor conecta su sección en paralelo con las otras secciones en servicio. Por consiguiente se puede aumentar o disminuir el tamaño del banco en pasos, por el cierre y apertura de los contactores.

Un relevador de control monitorea el factor de potencia de los circuitos controlados y está ajustado para abrir o cerrar los contactores apropiados para mantener un factor de potencia razonablemente constante en el sistema (con la tolerancia impuesta por el tamaño de cada paso de la compensación). El transformador de corriente para el relevador de monitoreo debe conectarse en una fase del cable que alimenta los circuitos que están siendo controlados.

15.4 Harmónicas en sistemas de potencia

Los equipos que utilizan componentes electrónicos de potencia (controladores variables de la velocidad de motores, tiristores rectificadores , etc.) han incrementado los efectos de armónicas en sistemas de potencia. Las armónicas son causadas por las impedancias magnetizadas no lineales de los transformadores, reactores, balastos de lámparas fluorescentes, etc.

Las armónicas en sistemas trifásicos balanceados, son generalmente de números impares: 3ra, 5ta, 7ma, 9na ..., y su magnitud decrece mientras el orden de la armónica crece. Se pueden utilizar algunos métodos para reducir armónicas específicas a valores despreciables, pero la eliminación total es imposible.

Los capacitores son especialmente sensibles a componentes de armónicas del voltaje de alimentación debido al hecho que la reactancia capacitiva decrece al aumentar la frecuencia. En la práctica, esto significa que un porcentaje relativamente pequeño del voltaje armónico puede causar que una corriente significativa fluya en el circuito capacitivo.

La presencia de componentes armónicas causa una distorsión en la onda (normalmente senoidal) de voltaje o de corriente. Mientras mayor sea la componente armónica mayor será la distorsión.

Si la frecuencia natural de la combinación del banco de capacitores y la reactancia del sistema de potencia está cerca a una armónica particular, entonces ocurrirá una resonancia parcial, con valores de voltajes y corrientes amplificados en la frecuencia de la armónica en cuestión. En este caso particular, la elevada corriente causará el sobrecalentamiento del capacitor con la degradación del dieléctrico que resultará en su eventual falla.

Existen varias soluciones posibles para este problema:

- Filtro de armónicas conectados en shunt, o reactores supresores de armónicas
- Filtros activos de potencia
- Filtros híbridos

Las armónicas que fluyen en redes de distribución afectan negativamente la calidad de la potencia eléctrica. Esto puede tener un número de efectos negativos como:

- Sobrecargas en redes de distribución debido al incremento de la corriente rms.
- Sobrecargas en conductores del neutro debido al incremento acumulativo por la creación de armónicas de tercer orden creadas por cargas monofásicas.
- Sobrecargas, vibraciones y envejecimiento prematuro de generadores, así como de transformadores y de motores.
- Sobrecargas y envejecimiento prematuro de los capacitores para mejorar el factor de potencia.
- Disturbios en el voltaje de alimentación que pueden afectar a cargas sensibles.
- Disturbios en redes de comunicación y en líneas telefónicas.

Las armónicas también tienen impactos económicos como:

- Envejecimiento prematuro del equipo que significa que tendrá que ser reemplazado antes de lo previsto.
- Las sobrecargas en la red de distribución pueden requerir niveles de suscripción de potencia mayores y pérdidas mayores.
- La distorsión de las ondas de corriente provoca disparos en falso que pueden detener la producción.

15.4.1 Origen de las armónicas

Los equipos y sistemas que causan armónicas estn presentes en todos los sectores, industrial, comercial y residencial. Las armónicas son causadas por cargas no lineales (cargas que usan corriente con una forma de onda que no es igual que la del voltaje de alimentaci3n).

Ejemplos de cargas no lineales son:

- Equipo industrial (equipo de soldadura, hornos de arqueo, hornos de inducci3n, rectificadores).
- Controladores de velocidad variable para motores asíncronos o motores de corriente directa DC.
- UPS
- Equipo de oficina (fotocopiadora, computadoras, máquinas de fax, etc.)
- Algunos equipos con saturaci3n magnética (transformadores).

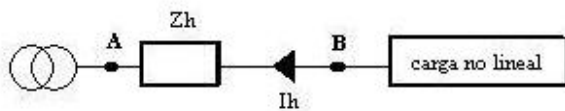
Las cargas no lineales usan corrientes armónicas que fluyen en la red de distribuci3n. Los voltajes armónicos son causados por el flujo de corrientes armónicas a través de las impedancias de los circuitos de alimentaci3n.

La reactancia de un conductor se incrementa como una funci3n de la frecuencia de la corriente que fluye a través del conductor. Para cada corriente armónica (orden h) hay una impedancia Z_h en el circuito de alimentaci3n.

Cuando la corriente armónica de orden h fluye a través de la impedancia Z_h , crea un voltaje armónico U_h , donde $U_h = Z_h \times I_h$ (ley de ohm). El voltaje en el punto B de la figura es por consiguiente distorsionado. Todos los equipos alimentados por el punto B reciben un voltaje distorsionado.

Para una corriente armónica dada, la distorsión es proporcional a la impedancia en la red de distribución.

Figura 17: Diagrama unifilar mostrando la impedancia del circuito de alimentación para una armónica de orden h



Las cargas no lineales se pueden considerar como inyectando corrientes armónicas en el sistema de distribución hacia la fuente. La figura 18 muestra el flujo de corriente a 60 Hz en la instalación y la figura 19 muestra la corriente armónica orden h .

Figura 18: Instalación que alimenta una carga no lineal donde sólo se toma en cuenta el fenómeno con la frecuencia de 60 Hz (frecuencia fundamental)

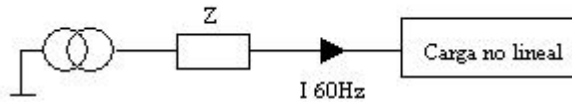
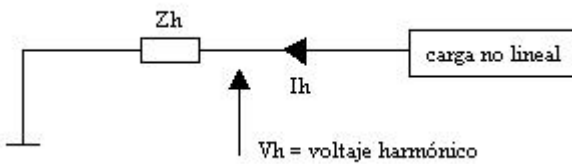


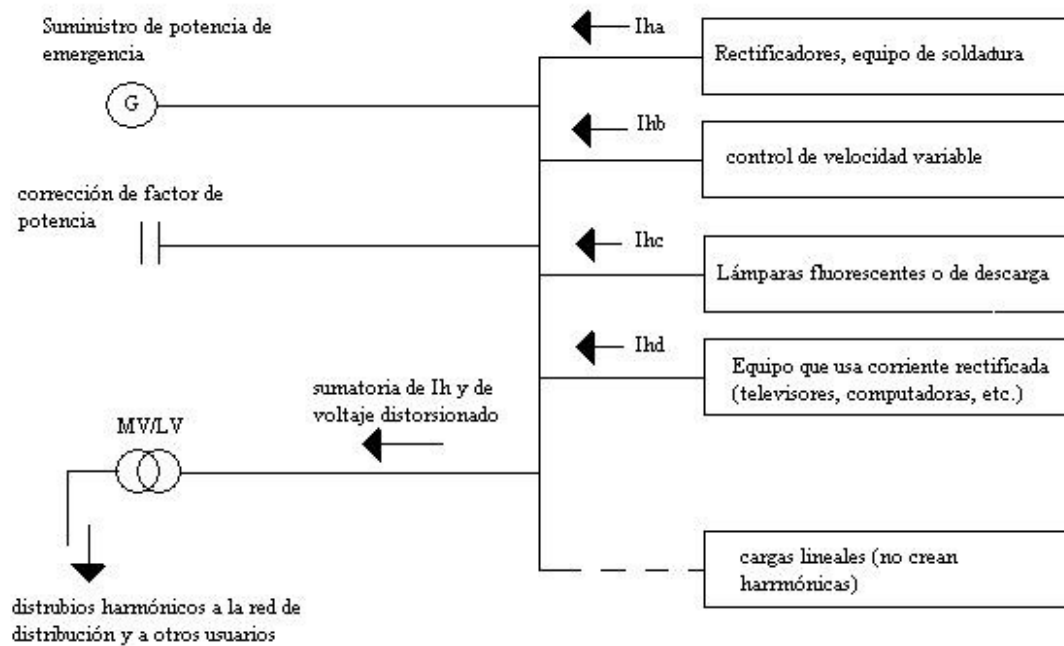
Figura 19: Misma instalación en la que sólo se muestra el efecto de la armónica de orden h



La alimentación de cargas no lineales crea un flujo de corriente I 60 Hz mostrado en la figura 18 al cual se le agrega cada una de las corrientes armónicas I_h (figura 19), que corresponde a cada orden armónico h .

Considerando que las cargas no lineales reinyectan corriente armónica a la red de distribución, es posible crear un diagrama mostrando las corrientes armónicas en la red como en la figura 20.

Figura 20: Flujo de corrientes armónicas en una red de distribución



15.4.2 Filtros pasivos

La presencia de armónicas en el voltaje de alimentación resulta en niveles de corriente elevados en los capacitores. Se logra un arreglo para esto al diseñar para un valor r.m.s. de corriente igual a 1.3 veces la corriente nominal. Todos los elementos en serie tales como conexiones, fusibles, etc. asociados con los capacitores están sobredimensionados entre 1.3 y 1.5 veces la corriente nominal.

Los capacitores son elementos reactivos lineales y consecuentemente no generan armónicas. La instalación de capacitores en un sistema de potencia (en el que las impedancias son predominantemente inductivas) puede, sin embargo, resultar en una resonancia total o parcial en una de las frecuencias de las armónicas.

El orden de la armónica h_o de la frecuencia natural de resonancia entre la inductancia del sistema y el banco de capacitores está dado por:

$$h_o = \sqrt{(S_{sc}/Q)}$$

donde

S_{sc} = el nivel de cortocircuito del sistema kVA en el punto de conexión del capacitor

Q = kvar nominales del banco de capacitores

h_o = orden de la armónica de la frecuencia natural; $f_o/60$ para un sistema de 60 Hz.

Por ejemplo $h_o = \sqrt{(S_{sc}/Q)}$ puede dar un valor para $h_o = 2.93$, que muestra que la frecuencia natural de la combinación de la inductancia sistema/capacitor está cerca a la frecuencia de la 3er armónica del sistema.

De $h_o = f_o/60$ se puede ver que $f_o = 60$ y $h_o = 60 \times 2.93 = 175.8$ Hz.

Mientras más cerca esté una frecuencia natural a las armónicas presentes en el sistema, mayor será el efecto indeseado. En el ejemplo anterior ocurrirán efectos resonantes fuertes con la componente de la 3er armónica de una onda distorsionada.

En dichos casos se toman medidas para cambiar la frecuencia natural a un valor que no resonará con ninguna de las armónicas presentes. Esto se logra por la adición de un inductor supresor de armónicas conectado en serie con el banco de capacitores.

Para sistemas de 60 Hz los reactores se ajustan para que la frecuencia de la combinación del banco de capacitores y los reactores sea de 228 Hz. Este valor corresponde aproximadamente para un valor de ω de 3.8 para un sistema de 60 Hz, que es un valor aproximadamente entre la 3er y la 5ta armónica.

En este arreglo, la presencia del reactor incrementa la frecuencia de la corriente fundamental (60 Hz) por un porcentaje pequeño (7-8%) y por consiguiente el voltaje del capacitor en la misma proporción. Esto se toma en cuenta, por ejemplo, usando capacitores diseñados para 440 V en un sistema de 400 V.

15.4.3 Filtros activos

Los filtros activos están basados en tecnología de potencia electrónica. Normalmente se instalan en paralelo con la carga no lineal. Los filtros activos analizan las armónicas producidas por la carga y entonces inyectan la misma corriente armónica a la carga con la fase apropiada. Como resultado las corrientes armónicas son totalmente neutralizadas en el punto en consideración. Una ventaja de los filtros activos es que continúan garantizando compensación de armónicas aún cuando se realicen cambios en la instalación. Los filtros activos permiten la auto-configuración de cargas armónicas sin importar su orden o magnitud, eliminación de riesgos de sobrecarga y la conexión a cualquier punto de la red eléctrica. Los filtros activos también pueden proveer mejoramiento del factor de potencia.

15.4.4 Filtros híbridos

Este tipo de filtro combina las ventajas de los filtros activos y los filtros pasivos. Se puede filtrar una frecuencia por un filtro pasivo y todas las demás frecuencias se filtran por un filtro activo.

15.5 Indicadores de distorsión armónica

Hay un número de indicadores usados para cuantificar y evaluar la distorsión armónica en formas de onda de corriente y de voltaje. Los más importantes son:

- Factor de potencia
- Factor de picos
- Potencia de distorsión
- Espectro armónico
- Valores de distorsión armónica

Estos indicadores son necesarios para determinar cualquier acción correctiva.

15.5.1 Factor de potencia

El factor de potencia PF es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente S.

$$PF = P/S$$

existe confusión entre electricistas con:

$$\cos \varphi = P1/S1$$

donde

P1 = potencia activa de la fundamental

S1 = potencia aparente de la fundamental

El término $\cos\varphi$ concierne exclusivamente la frecuencia fundamental y por consiguiente difiere del factor de potencia PF cuando hay armónicas en la instalación.

15.5.2 Factor de picos

El factor de picos es la relación entre el pico de la onda de corriente o voltaje (I_m o U_m) y su valor rms.

- Para una onda senoidal, el factor de picos es $\sqrt{2}$
- Para una onda no senoidal el factor de picos puede ser mayor o menor que $\sqrt{2}$.

El valor típico para el factor de picos para la corriente en cargas no lineales es mucho mayor que $\sqrt{2}$. Generalmente es un valor entre 1.5 y 2, y puede alcanzar 5 en casos críticos. Un factor de picos altos significa sobre-corrientes transitorias altas que, cuando son detectadas por dispositivos de protección, pueden causar disparos en falso.

15.5.3 Valores de potencia y armónicas

- Potencia activa:

La potencia activa de una señal que contiene armónicas, es la suma de las potencias activas que resultan de las corrientes y los voltajes del mismo orden.

- Potencia reactiva:

La potencia reactiva se define exclusivamente en términos de la fundamental:

$$Q_1 = U_1 \times I_1 \times \sin\phi$$

Cuando hay armónicas presentes, la potencia de distorsión D se define como:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

donde S es la potencia aparente.

15.5.4 Espectro armónico y distorsi3n arm3nica

Cada dispositivo que causa arm3nicas causa una forma particular de corrientes arm3nicas (amplitud y desplazamiento de fase).

Estos valores, principalmente la amplitud de la arm3nica, son esenciales para el an3lisis.

- Distorsi3n arm3nica individual:

La distorsi3n arm3nica individual, se define como el porcentaje de arm3nicas de orden h con respecto a la fundamental.

$$u_n(\%) = 100 \times U_h/U_1$$

o

$$i_n(\%) = 100 \times I_h/I_1$$

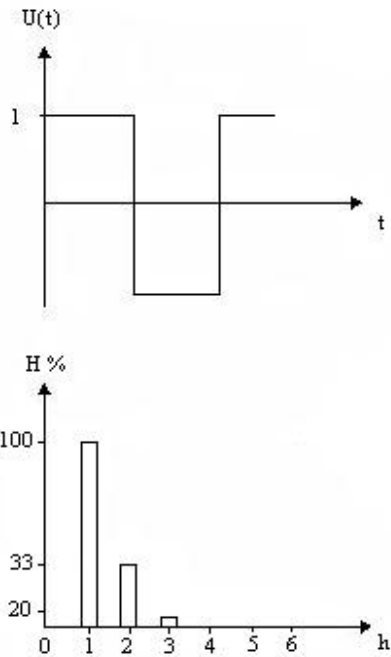
- Espectro arm3nico:

Al representar la amplitud de cada orden arm3nico con respecto a su frecuencia es posible obtener una gr3fica llamada espectro arm3nico.

La figura 21 muestra un ejemplo del espectro arm3nico para una onda rectangular.

Figura 21: Espectro armónico para una señal rectangular para un voltaje

U(t)



- Valor rms:

El valor rms del voltaje y de la corriente se puede calcular como una funci3n del valor rms de las varias 3rdenes arm3nicas.

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

y

$$U_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2}$$

15.5.5 Distorsión armónica total (THD)

El término THD significa distorsión armónica total, y se utiliza para definir el nivel de contenido armónico en señales alternas.

Para una señal Y, THD se define como:

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (Y_h)^2} / Y_1$$

Este valor puede ser mayor que 1. El THD es un medio para expresar como un número único la distorsión que afecta una corriente o un voltaje en un punto de la instalación. El THD generalmente se expresa como un porcentaje.

Para corrientes armónicas la ecuación es:

$$\text{THDi} = \sqrt{((I_{rms}/I_1)^2 - 1)}$$

Para voltajes armónicos la ecuación es:

$$\text{THDu} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2} / U_1$$

15.5.6 Utilidad de los diferentes indicadores

a) El THDu caracteriza la distorsión de la onda de voltaje. La siguiente es una lista de valores THDu y su correspondiente fenómeno en la instalación:

- THDu menor al 5%: situación normal, sin riesgo de mal funcionamiento.
- THDu entre 5 y 8 %: polución harmónica significativa, es posible que hayan fallas de funcionamiento.
- THD mayor al 8%: polución harmónica alta, se requiere un análisis de la instalación y equipos de atenuación.

b) El THDi caracteriza la distorsión de la onda de corriente. La siguiente es una lista de valores THDi y su correspondiente fenómeno en la instalación.

- THDi menor que el 10%: situación normal, sin riesgo de mal funcionamiento.
- THDi entre 10 y 50%: polución harmónica significativa, con un riesgo de aumento en la temperatura y la consiguiente necesidad de sobredimensionar cables y fuentes.
- THDi mayor que el 50%: polución harmónica alta, se requiere un análisis de la instalación y equipos de atenuación.

c) Factor de potencia PF

Usado para evaluar la necesidad de sobredimensionar la fuente de potencia de la instalación.

d) Factor de picos

Usado para caracterizar la aptitud de un generador (o UPS) para suministrar corrientes instantáneas altas. Por ejemplo, el equipo de cómputo consume corriente altamente distorsionada para el cual el factor de picos puede alcanzar valores entre 3 y 5.

e) Espectro

Descomponer la señal en frecuencias (espectro), proporciona una representación de señales eléctricas distinta, y se puede usar para evaluar su distorsión.

15.6 Equipo utilizado para medir los indicadores

Los métodos de observación y de medición son:

- Observaciones por medio de un osciloscopio: Se puede obtener una indicación inicial en la distorsión que afecta una señal observando la corriente o el voltaje en un osciloscopio. Cuando la forma de onda diverge de una senoidal, indica claramente la presencia de armónicas. Se pueden observar los picos de corriente y de voltaje. Este método, sin embargo no ofrece cuantificación precisa de los componentes armónicos.
- Analizadores espectrales analógicos: Están formados por filtros pasa-bandas acoplados con un voltímetro rms. Ofrecen desempeño mediocre y no ofrecen información del desplazamiento de fase.

- Analizadores espectrales digitales: Los microprocesadores en los analizadores digitales calculan los valores de los indicadores armónicos (factor de potencia, factor de picos, potencia de distorsión, THD). También tienen funciones complementarias como correcciones, estadísticas de detección, análisis de las mediciones, etc. Los analizadores multi-canales proporcionan en tiempo real la descomposición simultánea espectral de las ondas de corriente y voltaje.

Las señales analógicas son convertidas en una serie de valores numéricos. Usando estos datos, un algoritmo que implementa la transformada de Fourier rápida (FFT) calcula las amplitudes y las fases de las armónicas sobre un número de ventanas de tiempo.

La mayoría de analizadores digitales miden armónicas hasta el orden 20 o 25 cuando calculan el THD.

El procesamiento de los valores sucesivos utilizando la transformada de Fourier (FFT) (atenuación, clasificación, estadísticas) pueden llevarse a cabo por el equipo de medición o por programas externos.

15.7 Procedimiento para el análisis armónico de la red de distribución

Las mediciones se llevan a cabo en la instalación preventivamente para obtener una idea general en el estado de la red de distribución. Así se podrá determinar el origen de un disturbio y determinar las acciones para eliminarlo.

Las corrientes y los voltajes se estudian en la fuente de alimentación, en las barras del tablero de distribución principal, y en cada circuito de salida en el tablero de distribución principal (o en las barras de medio voltaje MV).

Para las mediciones, es necesario conocer las condiciones de operación precisas de la instalación y particularmente el estado de los bancos de capacitores (si están o no en operación, y el número de etapas desconectadas).

Los equipos de medición sirven para mostrar los efectos instantáneos y a largo plazo de las armónicas. El análisis requiere valores desde unos segundos hasta varios minutos en un período de observación de varios días. Los valores requeridos deben incluir las amplitudes de las armónicas de voltajes y de corrientes, el contenido armónico individual de cada orden armónico de la corriente y el voltaje y el THD para la corriente y el voltaje.

15.8 Soluciones para atenuar armónicas

Hay tres diferentes soluciones para atenuar las armónicas:

- Modificaciones en la instalación
- Dispositivos especiales en el sistema de alimentación
- Filtrado

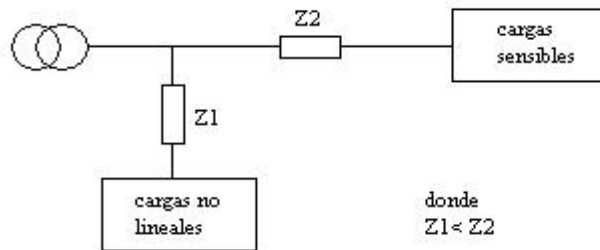
15.8.1 Soluciones básicas

Para limitar la propagación de armónicas en la red de distribución, existen diferentes soluciones disponibles y se deben tomar en cuenta particularmente cuando se diseña una nueva instalación.

a) Posicionar las cargas no lineales lo más cerca posible a la fuente:

Los disturbios por armónicas se incrementan al decrecer la potencia de cortocircuito. Aparte de las consideraciones económicas, es preferible conectar las cargas no lineales lo más cerca a la fuente como sea posible. (ver Figura 22)

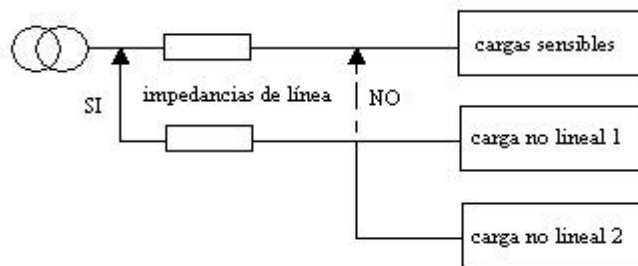
Figura 22: Posicionamiento de las cargas no lineales lo más cerca a la fuente posible



b) Agrupar las cargas no lineales:

Cuando se prepara el diagrama unifilar, los equipos no lineales deben separarse de los demás (Figura 23). Los dos grupos de equipos deben alimentarse por dos grupos separados de barras.

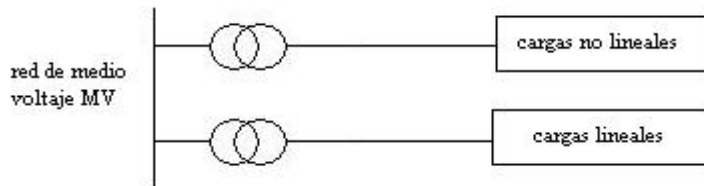
Figura 23: Agrupando las cargas no lineales y una conexión lo más cerca a la fuente como sea posible



c) Crear fuentes separadas

Como una forma de limitar las armónicas, se puede obtener una mejoría adicional creando una fuente por medio de un transformador separado (Figura 24). La desventaja es el incremento en el costo de la instalación.

Figura 24: Alimentar cargas lineales por medio de transformadores separados



d) Transformadores con conexiones especiales:

Las diferentes conexiones en los transformadores pueden eliminar ciertos órdenes de armónicas:

- Una conexión Dyd suprime la 5ta y 7ma armónicas
- Una conexión Dy suprime la 3ra armónica
- Una conexión DZ suprime la 5ta armónica

e) Instalación de reactores:

Cuando hay controladores de velocidad variable, es posible atenuar la corriente instalando reactores de línea. Al incrementar la impedancia del circuito de alimentación, se limita la corriente armónica.

La instalación de reactores supresores de armónicas en bancos de capacitores incrementa la impedancia de la combinación reactores/capacitores para órdenes de armónicas mayores. Esto evita la resonancia y protege los capacitores.

f) Seleccionar el arreglo de sistema de tierras apropiado:

- Sistema TNC

En el sistema TNC, un único conductor protector (PEN) provee la protección en el evento de una falla a tierra y el flujo de corrientes desbalanceadas.

En condiciones de estado estable, las corrientes armónicas fluyen en el PEN. Esto tiene como resultado una impedancia que da como resultado una pequeña diferencia de potencial (unos cuantos voltios) entre equipos que puede causar fallas en el funcionamiento de equipo electrónico.

El sistema TNC debe por consiguiente estar reservado para la alimentación de circuitos de potencia a la cabeza de la instalación y no debe usarse para alimentar cargas sensibles.

- Sistema TNS

El sistema TNS se recomienda cuando hay presencia de armónicas. El conductor neutro y el conductor protector PE están completamente separados y por consiguiente el potencial a través de la red de distribución es más uniforme.

15.8.2 Filtración de armónicas

En los casos donde las acciones preventivas son insuficientes, es necesario equipar la instalación con sistemas de filtración. Hay tres tipos de filtros: pasivos, activos e híbridos.

1. Filtros pasivos:

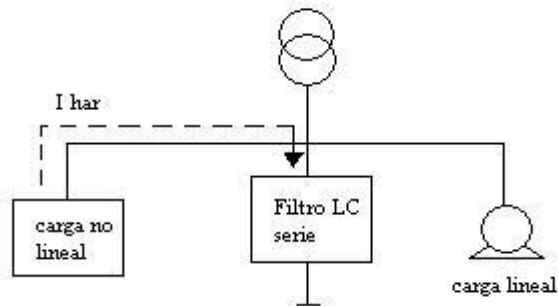
Aplicaciones típicas:

- Instalaciones industriales con un grupo de cargas no lineales con más de 200kVA (controladores de velocidad variable, UPS's, rectificadores, etc.)
- Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia.
- Instalaciones donde la distorsión de voltaje debe ser reducida para evitar afectar cargas sensibles.
- Instalaciones donde se debe evitar la distorsión de la corriente para evitar sobrecargas.

Se instala un circuito inductancia capacitancia (LC) sincronizado a cada orden de armónica que se desea filtrar en paralelo con la carga no lineal (Figura 25). Este circuito absorbe las armónicas, evitando así su circulación en la red de distribución.

Generalmente el filtro pasivo está sincronizado a un orden armónico cercano al orden que se desea eliminar. Se pueden usar varias ramas conectadas en paralelo si se requiere una significativa reducción en el número de ordenes armónicos.

Figura 25: Principio de operación de un filtro pasivo



2. Filtros activos (acondicionadores activos armónicos):

Aplicaciones típicas:

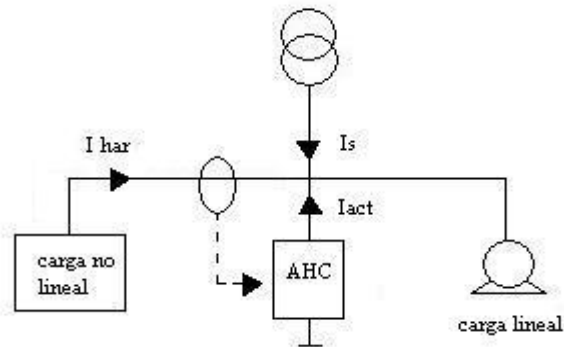
- Instalaciones comerciales con un grupo de cargas no lineales que representan menos de 200kVA (controladores de velocidad variable, UPS's, equipo de oficina, etc.)
- Instalaciones donde se debe evitar la distorsión de la corriente para evitar sobrecargas.

Estos sistemas que comprenden dispositivos electrónicos de potencia se instalan en serie o en paralelo con la carga no lineal y compensan la corriente o el voltaje armónico de la carga.

La figura 26 muestra un acondicionador armónico activo (AHC) conectado en paralelo que compensa la corriente armónica ($I_{har} = -I_{act}$).

El AHC inyecta en fase opuesta las armónicas de la carga no lineal de manera que la corriente I_s permanezca senoidal.

Figura 26: Principio de operación de un filtro activo



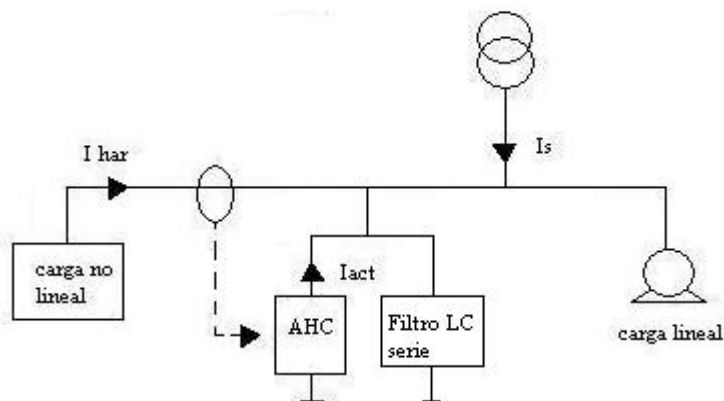
3. Filtros híbridos:

Aplicaciones típicas:

- Instalaciones industriales con un grupo de cargas no lineales con más de 200kVA (controladores de velocidad variable, UPS's, rectificadores, etc.)
- Instalaciones que requieren corrección del factor de potencia.
- Instalaciones donde la distorsión de voltaje debe ser reducida para evitar afectar cargas sensibles.
- Instalaciones donde se debe evitar la distorsión de la corriente para evitar sobrecargas.
- Instalaciones donde se requieren límites estrictos en la emisión de armónicas.

Se combinan filtros activos y pasivos en un sistema único. Este filtro ofrece las ventajas de ambos filtros y cubre un amplio rango de niveles de potencia y de desempeño.

Figura 27: Principio de operación de un filtro híbrido



15.8.3 Criterios de selección

- Filtros pasivos:

Los filtros pasivos ofrecen tanto corrección de factor de potencia como alta capacidad de filtración de corriente. También reducen los voltajes armónicos en instalaciones donde el voltaje de alimentación está distorsionado. Si el nivel de potencia reactiva proporcionado es alto, es recomendable desconectar el filtro pasivo en tiempos en que el porcentaje de carga es bajo. Los estudios preliminares para un filtro deben tomar en cuenta la posible presencia de un banco de capacitores para mejorar el factor de potencia que puede ser necesario eliminar.

- Acondicionadores harmónicos activos:

Los acondicionadores harmónicos activos filtran harmónicas sobre un amplio rango de frecuencias y se adaptan a cualquier tipo de carga. Por el otro lado, las potencias nominales de los mismos son bajas.

- Filtros híbridos:

Los filtros híbridos combinan el desempeño de los filtros activos y los pasivos.

CONCLUSIONES

1. La instalación eléctrica para una fábrica de envases de plástico debe diseñarse tomando en cuenta las características de los equipos en cada una de las áreas de la fábrica.
2. Debe observarse la seguridad, tanto de las personas como de los equipos en el desarrollo del diseño de la instalación.
3. Se deben observar los niveles de iluminación en cada área para que en ella se puedan realizar adecuadamente las labores.
4. Es necesario montar un sistema de iluminación de emergencia en caso de interrupciones en el servicio eléctrico.
5. Durante el desarrollo del proyecto se deben observar normas y reglamentos para que la instalación sea confiable y segura.

RECOMENDACIONES

1. Asesorarse con profesionales y/o empresas especializadas en las diferentes áreas para lograr satisfactoriamente los objetivos del proyecto.
2. Tomar en cuenta las necesidades de cada área de la fábrica para definir sus características y requisitos.
3. Emplear materiales y equipos de buena calidad en toda la instalación.
4. Conocer normas locales e internacionales que afectan la instalación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Harper, Enriquez. Guía para el diseño de instalaciones eléctricas, residenciales, industriales y comerciales. 2da. edición. Editorial Limusa S.A. de C.V. 2005. 459pp
2. Koeningsberger, Rodolfo. Instalaciones Eléctricas. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. 1982. 155pp
3. National Electric Code 2002. Edit. National Fire Protection Association.
4. Manual de mantenimiento industrial. 2da edición. Edit. Xalco S.A. 1990. 1250pp