



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

*“CÁLCULO DE LOS ALIMENTADORES EXCLUSIVOS
DE CFE, PARA LA NUEVA RED DE 23 KV DE
DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEA, PARA CU. UNAM”*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A N :

CASTAÑEDA MARTÍNEZ MIGUEL ARMANDO
BLANCO GALICIA JHONATHAN



DIRECTOR DE TESIS: ING. ALBERTO CORTEZ MONDRAGON

MÉXICO, D. F.

OCTUBRE 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos...

Al comenzar a escribir estos agradecimientos, le doy gracias a dios por haberme permitido llegar hasta aquí, por haber puesto los medios necesarios la fuerza y la fe que se necesitan para concluir una carrera profesional, he estado lleno de bendiciones en esta vida lo cual doy gracias a dios, este trabajo es la representación de años de esfuerzo, tanto de mis seres queridos como de mi parte y es la representación de la mejor herencia que mis padres me han podido dar, por lo cual comenzare agradeciéndole a ellos.

A María Elena

Comenzare por las damas, mamá creo que nunca tendré como pagarte todo lo que has hecho por mi, durante todos estos años has sido mi fortaleza, a pesar de las largas platicas y fuertes discusiones tu me has llenado de sabiduría y entendimiento en las distintas etapas de mi vida, lo cual eternamente te agradeceré, nunca he conocido a una persona tan dedicada a sus deberes, a sus prioridades, con ese esfuerzo y compromiso con el que lo hiciste durante mi etapa de estudiante, siempre fuiste a mi lado y has estado a mi lado, desde mi primer día de kinder, hasta el día que me acompañaras a mi examen profesional, mamá te doy las gracias por ser la mejor de las amigas, por siempre impulsarme y apoyarme en mis decisiones a pesar de tu forma muy particular de pensar, por inculcarme el amor hacia mis seres queridos y el respeto, mamá gracias a ti, mujer de éxito, mujer de ejemplo, gracias por haberme amado y ayudado a concluir esta etapa tan importante de mi vida, TE AMO.

A Miguel Castañeda Castañeda

Padre, me has llenado de grandes ejemplos, tan humanos y llenos de responsabilidad, has sido mi mejor ejemplo como hombre y profesional, gracias por tu amor ilimitado, por tu apoyo y confianza, no he conocido a otro hombre con esa mezcla de sentimientos tan extraordinaria, duros, pero sensibles, enérgicos, pero tolerantes,

tenerte como padre es una de mis grandes bendiciones, espero en Dios, algún día llegar a imitar tus acciones para con mis hijos y mostrarles un poco de lo que me has enseñado a ser, gracias por haberme dado la oportunidad de vivir y de estudiar, por siempre estar a mi lado en los momentos difíciles y ser el mejor maestro no solo para la carrera si no para la vida, te admiro por muchas cosas que solo tu y yo sabemos, por que a pesar de todo saliste adelante y lograste mucho, sé que mi abuelita estaría orgullosa de mi, pero al doble de ti, al igual que mi abuelito Miguel, al igual que yo, estoy muy orgulloso de ser tu hijo, gracias por ser mi mejor amigo, TE AMO.

A Luis Eusebio

Luis el mejor de los hermanos mayores, el que me enseñó tantas cosas, crecimos juntos bajo el mismo techo, jugando, riendo, soñando, llorando, recuerdo muy bien nuestra infancia llena de felicidad y amor, la recuerdo con tanta claridad, será por que nuestros padres se esforzaron por eso, gracias hermano por darme tu cariño, tu confianza y por tu ejemplo, que gracias a Dios no fue malo, si no bueno, todos los años que vivimos juntos jamás los olvidare, nunca pudimos separarnos de una misma recamara y creo que así será en la vida en nuestros corazones, jamás nos podremos separar por que somos iguales, hermanos, carnales, nenes, producto del mismo amor, gracias por brindarme tu amor y por haberme dado la felicidad que me das con Alexa, TE AMO hermano, gracias por tu apoyo.

A Dulce Karen

Dulce la única niña, la única princesa de la casa y me alegro que hayas sido única, no me imagino otra hermana, gracias hermana por que a pesar de nuestro carácter, siempre me has querido, sin condiciones, sin peros, siempre me has brindado tu apoyo y has estado conmigo en los momentos mas tristes de mi vida, como mujer, eso es algo que siempre tendré presente, estoy muy orgulloso de ti, por lo que vas logrando, gracias por celarme, por que así sé que me quieres, por cuidarme como lo haces y por ser tan alegre y sonriente, has cambiado mis días mas de una ocasión cuando sales

riendo como loca de tu cuarto como si hubieras soñado algo hermoso lo cual te hizo despertar así, nunca olvides esa parte de tu persona y no cambies, gracias por ser la mejor hermana que alguien haya podido tener, *TE AMO*.

A Irving Orión

Irving el tiempo pasa y sé que pasara y para mi nunca dejaras de ser mi bebe, llegaste a nuestras vidas a llenarlas amor, nunca olvidare el día que llegaste a la casa, cuando lloraste por primera vez, fue una felicidad tan grande, eres una persona llena de bondad y amor, ternura y nobleza, eres el hermano que tomo los mejores valores de nuestros padres y los junto para ser la persona que eres, lo cual te hace especial de entre los cuatro, no solo has sido mi ayuda, mi fortaleza, si no también eres mis ganas de vivir, de verte crecer y salir adelante, de verte madurar, de verte casar, eres un gran hermano bebe y *TE AMO*, gracias por escucharme cada noche, por hablarme sinceramente por mas cruel y dura que suene la realidad, por ser mi amigo, no solo me has ayudado a mi en los momentos difíciles, si no también a Luis, a mamá a dulce incluso también a papá al ser su nueva media cuchara, gracias por que eres una parte especial en la familia, en la casa, gracias por ser tan amoroso y noble, nunca cambies.

A Alexa

Alexa, mi amor, mi bebe, cuando crezcas y leas esto, quiero que comprendas lo mucho que te amo, lo mucho que has dado a esta familia con tu sonrisa, con tu amor, con tu presencia, eres una bendición para todos y para tus papás que te aman, eres idéntica a tu papá, fuerte e inteligente, pronto cumplirás dos años, sabes cuando juego contigo se me olvida todo, los problemas, las preocupaciones, me llevas a otro mundo donde solo existe tu linda voz (que aunque no hablas aun, es bonita), escucharte decirme "Bu" es muy lindo de tu parte querida sobrinita, gracias por ayudarme en todo momento que estas conmigo, y gracias a ti olvido todo y haces que esa tristeza se

convierta en alegría, gracias, te adoro y siempre tendrás en mi un amigo y tío en quien confiar, no lo olvides.

A Ester Rivera y Eusebio Martínez

Abuelitos ustedes han sido parte importante en mi vida, me han inculcado la bondad con la que trabajan y las ganas que ponen para cumplir con su trabajo, su ejemplo me ha ayudado de mucho en mis años de estudiante, ese refrigerio que siempre me han brindado y nunca me han negado cuando cansado, asoleado llegaba de la escuela y a diario lo tomaba es un claro ejemplo de su bondad y amor hacia mi, siempre estaré agradecido con ambos, siempre llevare a mi lado sus consejos que para mi son los mas importantes, siempre que han hablado conmigo son consejos muy sabios y llenos de razón, nunca olvidare sus platicas y sus anécdotas que me encanta escuchar, creo que algún día estas serán contadas a mis nietos y si dios quiere a mis hijos, gracias por sus enseñanzas y amor.

A Luisa Castañeda y Miguel Castañeda

Abuelitos sé que aunque ya no están conmigo, sé que se sentirían orgullosos de mi, y de mis padres, sé que conocí a ambos a ti abuelita en vida y a ti abuelito por las incontables historias de mis padres, de mis tías y tíos sé que te conocí y siempre he pensado en ustedes pues viven en mi, llevo su sangre y es algo de lo que estoy muy orgulloso, mami jamás olvidare tus consejos y tus platicas ese "taquito" con el que siempre me recibías después de la escuela, jamás olvidare tu sazón así como jamás nadie lo podrá igualar lamentablemente, gracias por tu bondad para con nosotros, por enseñarle los valores mas bondadosos a mi padre los cuales me recuerdan mucho a ti a diario, les quiero dar las gracias a ambos por ser parte tan importante de mi vida.

A Jhonathan Blanco

Por ser el mejor amigo que alguien haya podido tener, desde el día que nos conocimos diciéndome que tenías hambre y querías una torta teníamos 15 años, hasta el día en

que haremos juntos el examen profesional, siempre amigos sinceros, leales dudo que en estos tiempos exista una amistad como la nuestra, pues en verdad que siempre has sido muy sincero y excelente amigo, gracias por compartir este trabajo conmigo a pesar de que tuvimos diferencias y discusiones, aprendí mucho de ti al estar en ese cubículo encerrados, gracias por apoyarme siempre y escucharme, por tus consejos, nunca olvidare los momentos de desastre que pasamos juntos incomparables en todas partes donde estuvimos, donde nos presentábamos dejábamos marcado algo de jheny y Juanito gracias amigo.

A mis amigos estudiantes

Tardaría otra tesis en agradecerles a cada uno de ustedes, son demasiados desde el kinder hasta la universidad, gracias a dios que los sigo viendo, aunque no en su totalidad claro, pero a los mas importantes siguen siendo mis amigos, gracias por su apoyo amigos "primareros", es increíble que aun tengamos contacto, amigos de la secundaria siempre tan alegres e impulsadores ustedes siempre confiaron en mi y sabían que lo lograría, gracias por que eso me llenaba de confianza, amigos preparatorianos, como olvidar la prepa 5 si es la mejor por mucho, esas paredes tienen una de las etapas mas felices de mi vida, los amigos de la facultad, siempre tan competitivos y tan enfocados a la carrera, siempre fueron fuente de inspiración para mi, para salir adelante, para salir mejor ejemplo claro de competencia, de carrera profesional gracias a todos y a cada uno de ustedes, por escucharme y apoyarme, por darme consejos y enseñarme, por sacar mis dudas y pasarme los exámenes, por confiar en mi y por jugar conmigo, por acompañarme en esos momentos tristes y felices, por ser sinceros gracias.

A mis profesores

Es increíble ver como es la vida de un profesor, quizás por eso me guste serlo y por eso seré profesor de esta universidad, desde el kinder hasta la universidad profesores

que han marcado mi vida, me agradaba aprenderme sus nombres y recordarlos, su forma de enseñar, esa dedicación que ponían para hacerlo, gracias por sus enseñanzas y sus consejos, los famosos trucos para que las cosas resultaran mas fáciles y rápidas, por compartir todo ese tiempo, mencionare a los que mas recuerde con cariño aunque quizás muchos de ellos nunca lean este trabajo, pero lo hare por que son pocos y los recuerdo con mucho cariño quiero dejar plasmados sus nombres en este trabajo, kinder, gracias mis norma, la mejor, primaria, gracias maestra María Elena, tan amorosa y por quien soy un excelente matemático y por haberme brindado tanto amor en el accidente mas fuerte de mi vida, siempre estará en mi corazón, maestra Lourdes, por siempre ser tan atenta, secundaria; maestra Martha Climaco, mi perfecto complemento para las matemáticas y ese examen único tan pesado, maestro Alfaro, siempre tan perfeccionista y todo un ejemplo a seguir, maestro Homero y maestro German, tan exigentes, serios pero que grandes enseñanzas me dieron para las matemáticas y la física, preparatoria, Ismael Camacho por que siempre has sido un amigo, un compañero y un excelente profesor, gracias a todos ustedes gracias por compartir sus conocimientos y ser parte de esta bendadosa profesión.

A Alberto Cortez Mondragón

Por haberme dado una de las mas grandes enseñanzas que he recibido, por dedicarse con ese tiempo y entusiasmo a este trabajo, lo admiro por que a pesar de ser muy joven es todo un profesional dedicado a sus responsabilidades y es un gran amigo, gracias por haber sido parte de este trabajo con ese compromiso, gracias por esas platicas y por esos consejos, que me han ayudado mas de lo que yo mismo creí, gracias por tu tiempo Alberto, gracias.

A los Ingenieros Francisco Cuadros, Rubén Lemus, Hermilo Robles, Cesar Enrique y Lilitiana Linares

Por haberme dado la oportunidad de laborar con ustedes, por sus enseñanzas y por su tiempo a pesar de estar siempre tan ocupados en sus responsabilidades, los admiro mucho por su dedicación y por sus grandes conocimientos que poseen, así como la forma de aplicarlos en el campo de la ingeniería, son un ejemplo a seguir con un gran equipo de trabajo y siempre estaré agradecido por la oportunidad y la experiencia que me están brindando, gracias.

A mis sinodales

Por ser tan excelentes profesionales y haber compartido sus conocimientos conmigo tanto en las aulas como en la elaboración de esta tesis, por su apoyo y consejos, y por qué gracias a ustedes se hizo la realización de este trabajo tan importante para mí.

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Porque desde que soy parte de ella en el 2004, he estado lleno de oportunidades, sin barreras sin expresiones y por haberme dado la oportunidad a puertas abiertas de formar parte de la máxima casa de estudios y ser egresado de la misma, con mucho orgullo y amor.

A la Facultad de Ingeniería

A mi querida facultad, le doy las gracias por haberme dado la oportunidad de brindarme los conocimientos que poseo y por haberme dado siempre ese apoyo y experiencia para madurar.

A mis padres, Miguel y Maria Elena,

por su gran amor y apoyo.....

Agradecimientos

Hoy, tengo la oportunidad de darle gracias a todas las personas que me han apoyado para lograr una meta más en mi vida. Y principalmente a dios, ya que sin él nada de esto sería posible.

Quiero darle gracias a mis padres, porque por que durante toda mi vida han estado a mi lado sin importar las circunstancias, y por qué cada desvelo en su trabajo ha sido una motivación más para salir adelante.

Gracias mamá, por enseñarme a ser perseverante, a nunca dejar las cosas a medias, a esforzarme por ser mejor cada día y por inculcarme tu carácter firme y seguro.

Gracias papá por haberme enseñado a hacer las cosas bien, por ayudarme a entender muchas cosas relacionadas con el inicio de esta carrera, por haberme dado la motivación para estudiarla y por haber sido un pilar en mi formación como ingeniero.

¡Les puedo decir que a ustedes dos que les debo todo!

Quiero agradecerles a mis dos hermanos Roberto e Irvin

A Roberto, por ser una persona admirable como estudiante y un ejemplo a seguir como profesionalista, por haberme apoyado cuando lo he necesitado y por ser un gran hermano.

A Irvin, por ser un gran amigo, y aunque sé que es menor que yo, y que apenas está emprendiendo su formación como ingeniero, sé que puede lograr grandes cosas y lo está demostrando; él sabe que siempre puede dar más de sí mismo y que no hay imposibles.

Quiero agradecer de manera muy especial a mi esposa Ivonne, por acompañarme durante toda mi carrera, por darme buenos consejos, por ser una mujer que me motiva con sus ganas de salir adelante y superarse, por todo su cariño, comprensión y apoyo incondicional, ¡gracias!

Esta tesis se la quiero dedicar a una sola persona...

A mi hija

Por qué llego a cambiar mi vida, a hacerme un mejor ser humano. Quiero dedicársela porque sé que crecerá y que algún día leerá esto, y quiero que sepa que la motivación más grande que tengo en este mundo para superarme, es ella. Quiero que sepa que para lograr las metas que uno se propone hay que luchar y para levantarse de los tropiezos hay que tener la fuerza que se consigue con el trabajo, día con día.

Gracias Miguel, por tu amistad de varios años y por tu colaboración en esta tesis. Creo que aprendimos demasiado en este trabajo y no me refiero al tema en sí, sino a muchas circunstancias que se dan al trabajar en equipo, fue grato el compartir esta experiencia contigo amigo.

Quiero agradecerle sinceramente al Ingeniero Alberto Cortez Mondragón por su dedicación en la elaboración de esta tesis, por su tiempo y paciencia, y por haber compartido de su experiencia y conocimientos.

También agradezco a mis sinodales de titulación

ING. ROBERTO AUGUSTO ESPINOSA Y LARA

ING. GUILLERMO LÓPEZ MONROY

M.I. BERNARDO FRONTANA DE LA CRUZ

ING. JUAN MANUEL ROJAS GOMEZ

Por sus atenciones prestadas en mi proceso de titulación,

De manera muy afectuosa quiero agradecer al Departamento de Ingeniería Eléctrica de Potencia; a Rosy, Neri, Ing. Espinoza, Ing. Alberto, Ing. Monroy, Esther y Checo. Por su apoyo y amistad.

*A mis hija, Jimena
por su gran amor*

Introducción
Objetivos
ANTECEDENTES

Tema	Pagina
AN.1.- Antecedentes históricos de la electricidad	1
AN.2.- Desarrollo del gran proyecto de Ciudad Universitaria.	2
AN.2.1.- Edificación de Ciudad Universitaria	3
1) Zona escolar	5
2) Zona para práctica de deportes	6
3) Estadio de olímpico universitario	7
4) Servicios Generales	8
AN.3.- Antecedentes del sistema eléctrico de Ciudad Universitaria.	9

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO

Tema	Pagina
1.1.- Calidad del servicio eléctrico.	14
1.1.1.- Continuidad del servicio.	14
1.1.2.- Regulación del voltaje	18
1.1.3.- Control de la frecuencia.	19
1.2.- Cargabilidad.	20
1.2.1.- Limitaciones para la Transferencia de Potencia Real	20
1.2.1.1.- Capacidad Térmica	20
1.2.1.2.- Caída de tensión	21
1.2.1.3.- Estabilidad Angular.	22
1.3.- Líneas eléctricas subterráneas	25

ÍNDICE

1.3.1.- Metales conductores	25
1.3.2.- Características del cobre y el aluminio.	28
1.4.- Cable eléctrico en líneas subterráneas	29
1.4.1.- Componentes de los cables en líneas subterráneas.	30
A) Conductor	30
B) Aislamiento y tipo de aislamiento	33
B.1) Características de los aislamientos.	38
B.2) Defectos y consecuencias en los aislamientos.	43
C) Cubierta semiconductora	46
D) Blindaje o pantalla	48
E) Cubierta o forro	52
1.5.- Ventajas de un sistema subterráneo	53

CAPITULO 2

AMPACIDAD

Tema	Pagina
INTRODUCCIÓN	55
2.1.- Transmisión del calor generado por la conducción de corriente a través de un cable de media tensión.	57
2.1.1.- Efecto Joule y cálculo generalizado de la capacidad de conducción de corriente a través de un cable subterráneo.	60
2.2- Resistencia del conductor	62
2.2.1.- Resistencia del conductor por corriente directa	62

ÍNDICE

2.2.2.- Resistencia del conductor por corriente alterna.	67
2.2.3.- Efecto superficial o piel.	68
2.2.4.- Efecto de proximidad.	70
2.2.5.- Calculo de la resistencia en corriente alterna por tablas.	72
2.3.- Cálculo de pérdidas en cables subterráneos.	76
2.3.1.- Pérdidas en pantallas o cubiertas metálicas	76
2.3.1.1.- Cables monoconductores en formación triangular equidistante o sistema de dos cables (bifásico)	77
2.3.1.2.- Cables monoconductores en formación plana equidistante.	81
2.3.1.3.- Cables monoconductores con las pantallas aterrizadas en un solo punto.	82
2.3.1.4.- Cables monoconductores con las pantallas aterrizadas en dos o más puntos.	84
2.3.2.- Pérdidas en los ductos metálicos	84
2.3.3.- Cálculo de pérdidas en el dieléctrico	85
2.4.- Calculo de resistencias térmicas.	86
2.4.1.- Resistencia térmica del aislamiento	87
2.4.2.- Resistencia térmica de la cubierta	89
2.4.3.- Resistencia térmica del medio dentro del ducto.	90
2.4.4.- Resistencia térmica del ducto.	91
2.4.5.- Resistencia térmica externa de cables subterráneos	92
2.4.6.1.- Ductos cables, o grupos de cables directamente enterrados.	94
2.4.6.2.- Banco de ductos, o rellenos térmicos	96
2.5.- Capacidad de conducción de corriente como parte de un criterio en la instalación de un sistema eléctrico.	97

CAPITULO 3

CAIDA DE TENSION

Tema	Pagina
INTRODUCCIÓN	99
3.1.- Parámetros eléctricos básicos involucrados en la caída de tensión	100
3.1.1.- Parámetros de corriente alterna	101
3.2.- Ley de Ohm	102
3.3.- Concepto y parámetros de la impedancia	103
3.4.- Impedancia de las líneas de distribución en media tensión	114
3.5.- Parámetros de una línea de distribución de energía eléctrica.	116
3.5.1.- Resistencia eléctrica.	116
3.5.2.- Reactancia inductiva e inductancia.	118
3.5.2.1.- Radio medio geométrico.	120
3.5.2.2.- Inducción de Cables en Paralelo	121
3.5.3.- Calculo de la inductancia total, para diversas disposiciones de los cables en un circuito trifásico.	123
3.5.4.- Calculo de la impedancia para dos circuitos en dos bancos de ductos.	125
3.5.5.- Corrección de la resistencia y de la reactancia inductiva debido al efecto que producen las corrientes que circulan por la pantalla metálica.	127
3.6.- Reactancia Capacitiva y Capacitancia	130
3.7.- Caída de tensión (fase a tierra y entre fases) en circuitos trifásicos balanceados.	133

CAPITULO 4

PROPUESTA

Tema	Pagina
INTRODUCCIÓN	137
4.1.- Recopilación de información.	138
4.2.- Información a partir de la fuente de No. 1 inciso a)	142
4.2.1.- Resultados de la fuente No. 1 inciso a)	143
4.3.- Información a partir de la fuente de No.1 inciso b)	144
4.3.1.- Obtención de los datos para calcular el factor de coincidencia.	144
4.3.2.- Factor de diversidad. F_{div}	148
4.3.3.- Factor de Coincidencia. F_{coin}	149
4.3.4.- Ejemplos del cálculo de factor de coincidencia	150
4.3.5.- Cálculo para el factor de coincidencia de las Subestaciones Generales (topología actual de la red).	154
4.3.5.1.- Resultado de la fuente No.1 inciso b) (topología actual de la red)	154
4.3.6.- Cálculo para el factor de coincidencia de las Subestaciones Generales (basado en la topología de la nueva red).	155
4.3.6.1.- Resultado de la fuente No.1 inciso b) (topología de la nueva red)	156
4.4.- Información a partir de la fuente No. 2	156
4.4.1.- Resultados de la fuente No. 2	159
4.5.- Elección de datos a utilizar en el diseño de los alimentadores de las Subestaciones Generales	160
4.6.- Criterio por Ampacidad.	163
4.7.- Criterio por caída de tensión.	165
4.8.- Características de los alimentadores	167
4.9.- Verificación de los alimentadores por Corto Circuito	168
4.10.- Sobrecarga	170

APÉNDICE A

CORTO CIRCUITO

Tema	Página
INTRODUCCIÓN	172
A.1.- Elementos que contribuyen a aumentar la corriente de corto circuito	173
A.2.- Valores en por unidad de un sistema eléctrico de potencia.	175
A.2.1.- Conversión de impedancias y reactancias en por unidad a nuevas bases	178
A.2.2.- Ventajas de las cantidades en por unidad.	182
A.3.- Calculo de fallas en sistemas trifásicos de potencia	183
A.3.1.- Método de componentes simétricas en sistemas trifásicos desequilibrados.	183
A.3.2.- Componentes simétricas de un sistema trifásico desequilibrado	186
a) Sistema de secuencia positiva	187
b) Sistema de secuencia negativa	188
c) Sistema de secuencia cero	189
A.3.2.1.- Obtención de las componentes simétricas de secuencia positiva, negativa y cero a partir de los tres fasores desequilibrados	191
A.3.2.2 Impedancia de secuencia positiva, negativa y cero de circuitos trifásicos simétricos.	193
A.3.3.- Fallas en los sistemas eléctricos	195
A.3.3.1.- Falla monofásica a tierra a través de una impedancia	195
A.3.3.2.- Falla monofásica a tierra	197
A.3.3.3.- Falla bifásica a tierra a través de una impedancia	198
A.3.3.4.- Falla bifásica a través de una impedancia	201
A.3.3.5.- Falla bifásica a tierra	204
A.3.3.6.- Falla bifásica	207
A.3.3.7.- Falla trifásica	209

APÉNDICE B

SUBESTACIONES GENERALES 1 y 2

Tema	Pagina
Tablas de demandas de Subestaciones Generales 1 y 2 (SG-1 y SG-2)	212

APÉNDICE C

SUBESTACIONES GENERALES 4 y 5

Tema	Pagina
Tablas de demandas de Subestaciones Generales 4 y 5 (SG-4 y SG-5)	240

APÉNDICE D

TENSIÓN DE JALADO

Tema	Pagina
D.1.- Radio mínimo de curvatura durante y después de la instalación.	248
D.2.- Tensión máxima del jalado en el conductor	249
D.3.- Tensión máxima del jalado con calcetín	250
D.4.- Principio básico de jalado de cable en ducto.	252
D.5.- Factor de corrección del peso o de la fuerza normal.	253
D.6.- Presión lateral.	254

D.7.- Valores del coeficiente de fricción dinámicos recomendados para tramos rectos y curvas con presiones laterales menores a 223 kg/m para lubricantes a base de agua y jabón	256
D.8.- Formula para calcular la tensión de jalado en tramo recto horizontal.	258
D.9.- Formula para calcular la tensión de jalado en curva horizontal.	259
D.10.- Formula para calcular la tensión de jalado en tramo recto inclinado hacia arriba.	260
D.11.- Formula para calcular la tensión de jalado en tramo recto inclinado hacia abajo.	261
D.12.- Formula para calcular la tensión de jalado en curva vertical convexa hacia arriba.	262
D.13.- Formula para calcular la tensión de jalado en curva vertical convexa hacia abajo.	263
D.14.- Formula para calcular la tensión de jalado en curva vertical cóncava hacia arriba.	264
D.15.- Formula para calcular la tensión de jalado en curva vertical cóncava hacia abajo.	265
D.16.- Curvas verticales incompletas.	266
D.17.- Plano de la ubicación de registros de los alimentadores de las subestaciones generales 1, 2 y 4 en base a la tensión de jalado.	268
D.18.- Detalles del paso a desnivel encontrado en la trayectoria de los alimentadores de las subestaciones generales.	269
D.19.- Características de los registros propuestos para la instalación de los alimentadores.	270

APÉNDICE E

SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN

Tema	Pagina
E.1.- Subestaciones de distribución de 230 /23 kV con transformadores trifásicos de 60 [MVA].	271
E.1.2.- Capacidad de transformación instalada y firme	271
E.1.3.- Carga conectada	271
E.2.- Regulación de tensión en subestaciones de distribución	273

APÉNDICE F

LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN

Tema	Pagina
F.1.- Líneas aéreas	275
F.2.- Tipo de conductores en líneas aéreas	278

APÉNDICE G

COMPONENTES DE UNA RED ELÉCTRICA SUBTERRÁNEA

Tema	Pagina
G.1.- Equipos y elementos que componen una red eléctrica subterránea	282
G.1.2.- Subestación Eléctrica	282

ÍNDICE

- Clasificación de acuerdo a la construcción	282
- Clasificación de las SE por nivel de tensión que manejan	283
- Clasificación de las SE por su instalación	284
- Equipos existentes en una SE	284

APÉNDICE H

LEY DE OHM TÉRMICA

Tema	Pagina
H.1.- Principios fundamentales	286
H.1.2.- Ley de ohm térmica	286

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

Tema	Pagina
Conclusiones y recomendaciones generales	290
Notas de página	292

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Tema	Pagina
Bibliografía y referencias	293

UNIDADES

MAGNITUD	UNIDAD	SÍMBOLO
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	Kg
Tiempo	Segundo	s
Corriente eléctrica	Ampere	A
	mili Ampere	mA
Temperatura termodinámica	Grados Celsius	°C
Superficie	Metro cuadrado	m ²
Volumen	Metro cúbico	m ³
Velocidad	Metro por segundo	m/s
Aceleración	Metro por segundo al cuadrado	m/s ²
Densidad	Kilogramo por metro cúbico	Kg/m ³
Intensidad de campo eléctrico	Ampere por metro	A/m
Densidad de corriente	Ampere por metro cuadrado	A/m ²
Frecuencia	Hertz	Hz
Fuerza	Newton	N
Potencia, flujo magnético	Watt	W
	Kilo-Watt	kW
Potencia aparente	Volt-Ampere	VA
Potencia Reactiva	Kilovolt-Ampere Reactivos	kVAR
Carga eléctrica, cantidad de electricidad	Coulomb	C
Diferencia de potencial, tensión eléctrica, potencial eléctrico, fuerza electromotriz	Volt	V
	Kilo-Volt	kV
Capacitancia	Farad	F
Resistencia eléctrica	Ohm	Ω
	Mega-Ohm	M Ω
Conductancia eléctrica	Siemens	S
Flujo magnético	Weber	Wb
Inducción magnética	Tesla	T
Inductancia	Henry	H
Fuerza de campo eléctrico	Volt por metro	V/m
Densidad de carga eléctrica	Coulomb por metro cubico	C/m ³
Densidad de flujo eléctrico	Coulomb por metro cuadrado	C/m ²
Conductividad	Siemens por metro	S/m
Rigidez Dieléctrica	Kilo-Volt por metro	Kv/m
Constante de aislamiento	Mega-ohm por kilometro	M Ω /m
Resistencia por unidad de longitud	Ohm por metro	Ω /m
Trabajo, energía, cantidad de calor	Joule	J
Resistencia Térmica	Grados Celsius-metro por Watt	°C/W
Calor por unidad de longitud	Watt por metro	W/m

TERMINO	DESCRIPCION
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
C.U.	Ciudad Universitaria
FI	Facultad de Ingeniería
DIEP	Departamento de Ingeniería Eléctrica de Potencia
MUCA	Museo de arte
DGOYC	Dirección General de Obras y Conservación
SG	Subestación General
SD	Subestación Derivada
SF6	Hexafluoruro de azufre
SE	Subestación Eléctrica
MT	Media Tensión
C.C.	Corto Circuito
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
XLPE	Polietileno de cadena cruzada
EPR	Etileno Propileno
IACS	Asociación Internacional de Clasificación de Materiales
ACSR	Conductor de aluminio y acero reforzado
AWG	Calibre de cables Americano
Cu	Cobre
c.a.	Corriente alterna
c.d.	Corriente directa
PVC	Poli cloruro de vinilo
F.C.	Factor de Crecimiento
KCM	Circular mil, Indica el calibre de conductor
ME	Margen de Estabilidad Angular
{B-X}	Referencia de bibliografía, ver bibliografía
[X]	Referencia de notas de pagina, ver notas de pagina

Ver {B-9}

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de distribución han sido siempre parte fundamental para cualquier sistema eléctrico de potencia, recientemente en nuestro país se ha llegado a un punto de vista en común, el estudio previo y cuidado en el diseño de redes eléctricas de distribución es de sumo cuidado, la ingeniería de distribución requiere las bases fundamentales de ingeniería eléctrica, ingeniería económica, así como de diversas ramas para su implementación óptima. Los sistemas de distribución aun no han adoptado una definición en específico, no obstante, se acepta que es el conjunto de instalaciones desde 120 V hasta tensiones de 34.5 kV, pudiendo ser estas cargas industriales, comerciales, urbanas, residenciales, etc.

Los sistemas de distribución se desarrollan en distintas estructuras, estas dependen de los parámetros que intervengan en la planeación de la misma red, tales como:

-  Densidad de carga
-  Tipo de cargas (residencial, comercial, industrial, mixta)
-  Localización geográfica de la carga
-  Área de expansión de la carga
-  Continuidad del servicio

Los sistemas de distribución pueden adoptar distintas topologías las cuales tendrán un impacto decisivo en la continuidad del sistema, no obstante las estructuras de media tensión tienen sus propias topologías, estas pueden ser:

-  Estructura radial: Aérea, mixta y subterránea.
-  Estructura en anillos: Abierto, cerrado.
-  Estructura en mallas
-  Estructura en doble derivación
-  Estructura en derivación múltiple
-  Estructura de alimentadores selectivos.

La seguridad en el suministro de energía eléctrica a un usuario, cualquiera que sea el uso que se le vaya a dar, siempre es importante que se defina la manera de alimentar la carga, cada uno de los sistemas tendrá un costo relativo a la importancia y la naturaleza de la carga por alimentar.

El conocimiento de las distintas características eléctricas en un sistema de distribución y como ya se menciona la aplicación de los conceptos fundamentales de la teoría de la electricidad es el centro de importancia para diseñar y operar un sistema, por lo tanto es necesario que como Ingeniero de distribución tenga estos conocimientos claros de las características de la carga del sistema que se va a alimentar para diseñarlo y operarlo en forma optima. Desafortunadamente, aun cuando el ingeniero es el que planea un sistema de distribución, por lo cual tiene la libertad en la selección de muchos factores que intervienen en el diseño del sistema, no la tiene en un factor de suma importancia, la carga, siendo esta la parte mas importante y decisiva por una parte para el diseño y por otra para la operación del sistema.

El estudio de las cargas así como de sus características, no recae solamente en el uso de diversos aparatos conectados a ella para conformar la carga de un consumidor individual, sino también involucra el grupo de consumidores que integran la carga de una zona.

Actualmente en Ciudad Universitaria la carga, se ha ido incrementando considerablemente lo cual ha llevado a hacer un cambio importante en el sistema eléctrico, la red de distribución subterránea que esta implementada de 23kV/6.6kV, ahora se implementara a 23 kV incrementando la potencia de transmisión mejorando así el servicio y la calidad de la energía, no obstante es importante que el alimentador principal también se cambie y se mejoren sus condiciones, implementado un nuevo sistema, con variantes modernas que permitan la optimización de la red en general.

En esta tesis aborda el cálculo de los conductores principales a Ciudad Universitaria, de la subestación eléctrica Odón de Buen, a las Subestaciones

Generales 1, 2 y 4, para su correcta distribución de estas a todas las subestaciones derivadas que conforman la red eléctrica subterránea, en base a todos los parámetros y conceptos mencionados y las características de estudio que estos involucran, lo cual nos permitirá tener confiabilidad en nuestro sistema de distribución.

En el Capítulo I, Marco Teórico se tocan dos puntos importantes en el diseño de instalaciones eléctricas subterráneas, por un lado la calidad de la energía con los parámetros que se involucran para lograr este aspecto tan importante en la transmisión de energía eléctrica y por el otro introducir teóricamente a los sistemas de distribución subterráneos, así como describir de manera general al cable de media tensión utilizado en este tipo de instalaciones, tomando para distintos casos puntos de comparación buscando optimizar la selección confiable de nuestro conductor en base a las características de diseño, para finalmente recalcar cuales son las ventajas de un sistema subterráneo y el por que se propone.

En el Capítulo II, Ampacidad, se comienzan a estudiar los criterios que nos permitirán seleccionar el conductor principal de alimentación para Ciudad Universitaria, siendo este el primero, con un desglose detallado y explicativo se define la formula general para calcular la capacidad de conducción de corriente en un cable (Ampacidad), para posteriormente hacer los cálculos pertinentes.

En el Capítulo III, Caída de Tensión, este se considera el segundo criterio a tomar, basándose en la formula generalizada de caída de tensión para media tensión, la cual involucra de manera importante la longitud del conductor, entre otros parámetros que se calculan por orden en el desglose del capítulo.

Finalmente en el Capítulo IV, Propuesta, se plantea el diseño de los alimentadores tomando los puntos mas importantes de el presente trabajo, que se utilizan para definir el conductor de media tensión subterráneo y los aspectos mas importantes de la instalación no obstante en los apéndices se encuentra información clave para los cálculos y la obtención de parámetros que en conjunto nos permitirán llegar a la propuesta presentada.

OBJETIVOS

Esta tesis tiene como objetivo determinar los alimentadores principales de suministro de energía eléctrica a Ciudad Universitaria, provenientes de la subestación eléctrica Odón de Buen a las Subestaciones Generales 1 , 2 Y 4 de Ciudad Universitaria, a partir de los criterios de Ampacidad, Caída de Tensión y Corto Circuito, buscando garantizar la calidad del servicio en esta, se tomaran en cuenta como base los conceptos de sistemas de distribución subterráneos, teóricos y prácticos, haciendo uso de la búsqueda de información, para tener un punto de comparación de distintas formas y topologías de los sistemas de distribución y en base a esto determinar la instalación y operación optimas de acuerdo a las características mismas del sistema.



ANTECEDENTES



AN.1.- Antecedentes históricos de la electricidad

Desde la antigüedad el hombre se ha dedicado a estudiar los grandes fenómenos que lo rodean, cuestionándose, encontrando el origen y el ¿Por qué? de estos, siendo la electricidad uno de ellos. Así alrededor del año 600 antes de cristo, Tales de Mileto [Ver Figura AN.1] descubre la electricidad estática, dando comienzo al estudio y tratado de la electricidad. Distintos físicos, matemáticos y estudiosos dieron pie a las bases de lo que hoy conocemos como energía eléctrica.



Figura AN.1.- Thales de Mileto (630-550 AC)

La electricidad es una forma de energía que no se puede almacenar, solo se puede generar, usar y manifestar por los efectos que produce, esta palabra deriva del griego elektron que significa ámbar. La historia de la electricidad se fue estructurando a partir del estudio y uso humano de la misma y del descubrimiento de sus leyes que la rigen, así como los fenómenos físicos que en ella intervienen, sin dejar de lado la invención de los instrumentos que se utilizan para su manipulación y uso práctico.



Figura AN.2.- En 1752, Benjamín Franklin (1706-1790) demostró la naturaleza eléctrica de los rayos.

A la electricidad se le considera como parte importante del desarrollo humano [Ver Figura AN.2], ya que su relación con la vida cotidiana, ha permitido su evolución intelectual y tecnológica. Por lo cual ha surgido un gran interés de dominar y conocer la energía eléctrica para su aprovechamiento y el bienestar de las personas.

AN.2.- Desarrollo del gran proyecto de Ciudad Universitaria

La iniciativa de construir una nueva sede Universitaria se remonta a 1929, cuando dos estudiantes de arquitectura presentan como tesis, un proyecto llamado “Ciudad Universitaria”. La zona que escogieron como base para llevar a cabo su propuesta fue al sur de la Ciudad de México. No obstante fue hasta 1945, cuando por decreto se formula y aprueba una ley “Función y construcción de Ciudad Universitaria”. Para la realización de los diseños en conjunto, se llevó a cabo un concurso de ideas en la Escuela Nacional de Arquitectura, los ganadores fueron Mario Pani [Ver Figura AN.3] y Enrique Del Moral [Ver Figura AN.4], (más tarde se une a ellos Mauricio M. Campos, que durante el proceso fallece), motivo por el cual ellos fueron quienes dirigieron la construcción diseñada en los planos antes mencionados.

De la misma manera decidieron que cada edificio sería un proyecto individual, así que seleccionaron arquitectos para cada edificación.

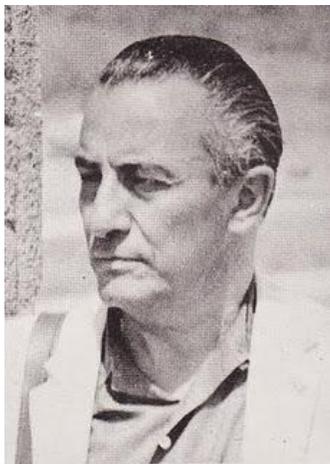


Figura AN.3.- Mario Pani



Figura AN.4.- Enrique del Moral

AN.2.1.- Edificación de Ciudad Universitaria

En 1949 comienza la construcción, no se tenía el presupuesto para comenzar las obras, así que la Universidad recurre al presidente Miguel Alemán, mismo que desplegaba un gran interés por la centralización de la Universidad y por la construcción de la misma; se comienza entonces una etapa de construcción, se reorganiza el Patronato Universitario, nombrando presidente a Carlos Novoa, entonces director del Banco de México, y como vocales a Eduardo Suárez y David Thierry. La posición de estos personajes permitió mayor acercamiento con el presidente, quien procuró dotar a la Universidad de los fondos necesarios para continuar la construcción, fue así como gracias a la labor de estos personajes se inicia lo que hoy conocemos como la Ciudad Universitaria.

La Dirección del Proyecto de Conjunto, a cargo de Carlos Lazo y Mario Pani, se crea para encargarse de la construcción del proyecto maestro, de los proyectos en detalle de los espacios libres entre los edificios, ubicación de las facultades y la distribución de aulas, laboratorios, baños, jardines, pasos, caminos, circulación vial etc; coordinando los trabajos de los arquitectos encargados de proyectarlos y construirlos hasta lograr la unidad.

La idea fue lograr una fácil comunicación entre escuelas, entre estudiantes, profesores e investigadores; teniendo como fin una llamada “Comunidad Universitaria” que hasta hoy en día se mantiene con orgullo y agrado de ver como sus integrantes se apoyan mutuamente en muchos aspectos, de la misma manera planearon un Museo de Arte (hoy MUCA) con el fin de dar a conocer el arte en México de todos los tiempos y para las exposiciones universitarias; así como posteriormente el museo de las ciencias, hoy llamado UNIVERSUM (años después, pero formaba parte del proyecto inicial).

Así sucesivamente tal como el museo del arte y el UNIVERSUM [Ver Figura AN.5], se fueron creando edificios para distintos fines, y fue como nacieron, auditorios, museos, salas, el estadio olímpico universitario, etc.



Figura AN.5.- UNIVERSUM, Museo de las ciencias

La intervención del arquitecto Lazo en la construcción del Campus central de la Ciudad Universitaria fue brillante, gracias a su gran experiencia y dedicación en el proyecto. Rodeado de un magnífico grupo de colaboradores, supo crear una verdadera mística de superación y eficiencia entre todos los que intervinieron en las obras, arquitectos, ingenieros y obreros, de tal manera que éstas se realizaron con calidad, orden y una desusada rapidez. Esto permitió que las obras se terminaran en menos de tres años y que el 20 de noviembre de 1952 pudiera hacerse la "Conclusión de construcción de la Ciudad Universitaria" en solemne ceremonia en la que el presidente Alemán, días antes de terminar su gobierno, pudo ver concluida una obra en la que había puesto gran interés y empeño.

En 1953 Nabor Carrillo se convierte en rector de la Universidad. Los principales problemas a los que se enfrentó fue la terminación de algunos edificios junto

con la infraestructura de apoyo, transporte, vivienda y la ampliación del presupuesto para la mudanza de las escuelas universitarias.

Finalmente el lunes 22 de marzo de 1954, en una ceremonia en la Sala del Consejo Universitario en la Torre de Rectoría, el presidente Ruiz Cortines inauguró los primeros cursos que se impartirían en Ciudad Universitaria, con este acto hizo entrega a los universitarios de la Ciudad Universitaria.

La fundación de la Ciudad Universitaria representó un parte aguas dentro de la historia académica de la UNAM. Las nuevas instalaciones permitieron un florecimiento sin precedentes en todas las áreas, y en algunas significó no solo un cambio ventajoso sino un autentico alumbramiento. Tal fue el caso de la ciencia organizada, que nació gracias a que los laboratorios y las nuevas condiciones materiales la hicieron posible.

Con la inauguración de la Ciudad Universitaria empezó a florear también, de un modo más definido, eso que hemos llamado vida universitaria. En poco tiempo y de manera definitiva se modificó el concepto "casa de estudios" y se integraron en una verdadera comunidad los estudiantes, los académicos, las autoridades y los trabajadores de la UNAM.

El proyecto de la nueva Ciudad Universitaria se dividió en cuatro zonas principales: la zona escolar, la zona para práctica de deportes, el Estadio Olímpico Universitario y Servicios Generales.

1) Zona escolar: Conformada por los edificios escolares, administrativos, etc.

👉 Edificios administrativos: Grupo de edificios correspondientes a la dirección y régimen de la universidad. Rectoría, Biblioteca Central y Museos.

👉 Humanidades: Constituido por la Facultad de Filosofía y Letras con sus respectivos institutos, la Escuela de Jurisprudencias, Economía y Comercio y la Escuela de Ciencias Políticas y Sociales.

- 🍃 Ciencias: Constituido por la Facultad de Ciencias con sus institutos y las Escuelas de Ciencias Químicas e Ingeniería. También se encuentran el Instituto de Geología y los edificios para Investigación de Energía Nuclear.
- 🍃 Museo de Arte y Escuela de Arquitectura: Conjunto formado por la Escuela de Arquitectura, el Museo e Instituto de Arte y el Teatro Experimental.
- 🍃 Ciencias Biológicas: Lo constituyen Medicina [Ver Figura AN.6], Odontología, Veterinaria y el Instituto de Biología.

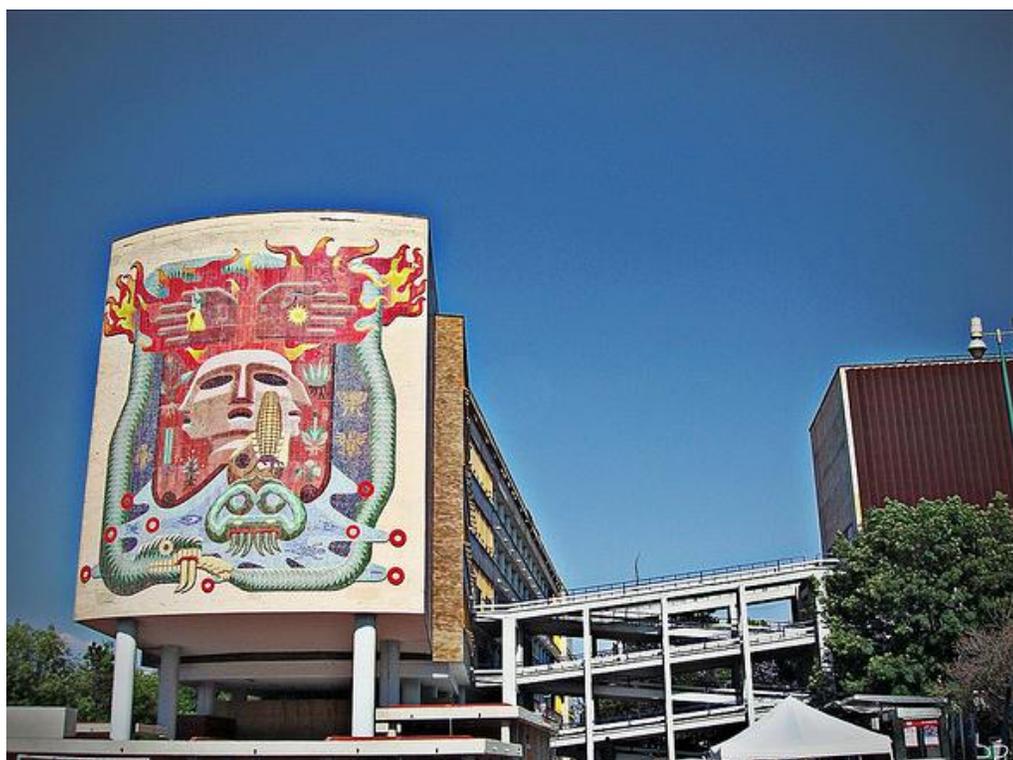


Figura AN.6.- Facultad de Medicina, UNAM. C.U. 1

- 2) Zona para práctica de deportes:** Se planearon plataformas en diferentes ubicaciones para colocar diversos campos y espacios deportivos, tales como pistas de atletismo, campos de futbol americano, campos de beisbol, futbol soccer, tiro con arco, lanzamiento de bala entre otros [Ver Figura AN.7].



Figura AN.7.- Zona de práctica de deportes, UNAM, C.U.

3) Estadio de olímpico universitario: Frente a Rectoría se ubicó el Estadio Universitario con capacidad para 75000 espectadores. Esta parte del proyecto fue desarrollado gracias a los arquitectos Augusto Pérez Palacios, Raúl Salinas Moro y Jorge Bravo Jiménez. El estadio originalmente era para celebrar los partidos de fútbol americano y más adelante modificó sus funciones con la llegada de los juegos olímpicos de 1968 [Ver Figura AN.8].



Figura AN.8.- Estadio Olímpico Universitario, UNAM, C.U.

4) Servicios Generales: Son fundamentales para atender el funcionamiento en la vida diaria de Ciudad Universitaria y está conformado por los edificios que albergan talleres, bodegas, servicios de vigilancia, etc.

Actualmente se han realizado diversas modificaciones dentro del campus, más edificios, zonas recreativas, centros de investigación, reubicaciones y ampliaciones de facultades entre muchos más; los cuales demandan cambios a la estructura de la red eléctrica universitaria exigiendo mayor confiabilidad y calidad de energía.

Todo esto en conjunto, es lo que hoy conocemos como Ciudad Universitaria [Ver Figura AN.9]

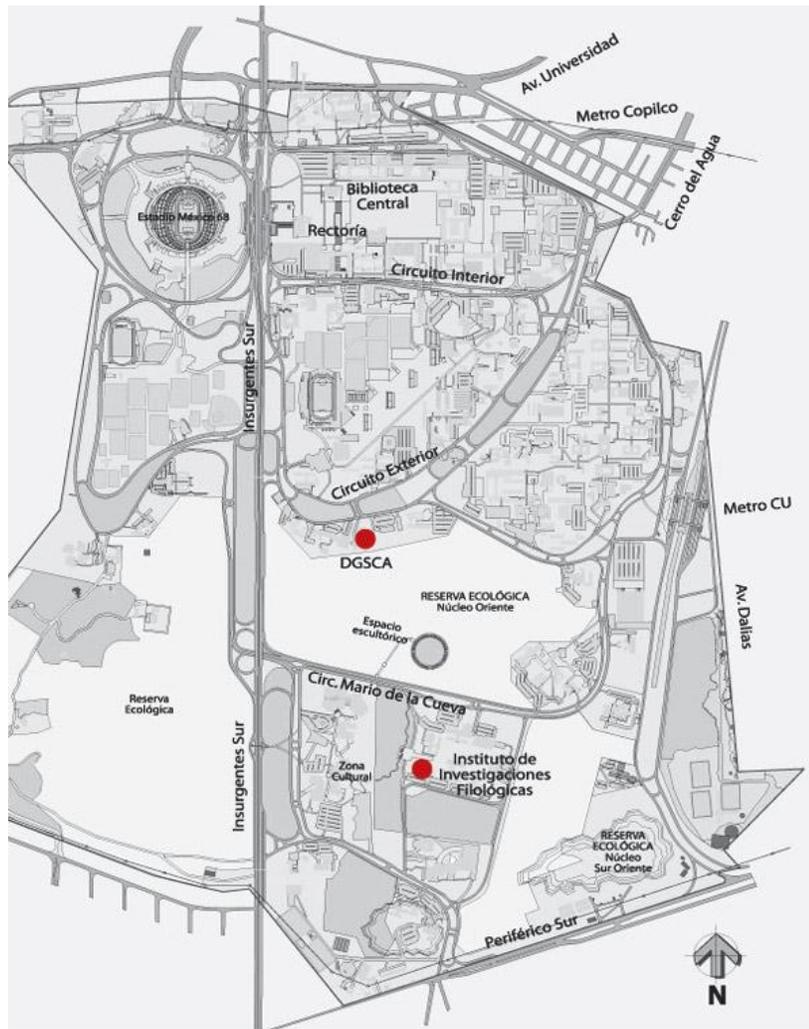


Figura AN.9.- Mapa de Ciudad Universitaria.

AN.3.- Antecedentes del sistema eléctrico de Ciudad Universitaria.

La red de distribución subterránea de Ciudad Universitaria se proyectó y construyó en los años 50, en el diseño de la construcción de C.U. UNAM. Se destaca el sistema de distribución de energía eléctrica que fue diseñado y construido a través del medio subterráneo, siendo este uno de los aspectos más importantes de la arquitectura del campus universitario. El diseño, planeación y construcción estuvieron bajo la supervisión de los ingenieros Carlos Luca Marín, Antonio Macías de Mier, Roberto Brown Brown y la colaboración de algunos más; todos ellos bajo la dirección de Luís Mascot.

El sistema eléctrico subterráneo de Ciudad Universitaria tenía como principal objetivo, garantizar la máxima continuidad del servicio de distribución de la energía eléctrica y proporcionar de manera eficiente el servicio para el cual fue diseñado.

En ese momento la subestación era abastecida por la compañía, Luz y Fuerza de Centro mediante dos alimentadores aéreos con una tensión de 23 kV.

La red eléctrica tiene un arreglo en anillo abierto, la disposición de esta configuración proporciona una confiabilidad mayor al sistema, ya que en caso de falla en alguna parte del sistema, el servicio se logra restablecer de manera inmediata.

El sistema de distribución de Ciudad Universitaria estaba conformado originalmente por una subestación principal; su construcción se inició en el año de 1952 e inició su servicio en 1954 con una capacidad de 5 MVA, proporcionada por dos transformadores de 2.5 MVA cada uno, de 23 kV a 6.6 kV provenientes de la subestación de Olivar del Conde y Taxqueña.

El sistema de 6.6 kV, estaba formado por tres circuitos de tipo anillo A, B, C cada uno contaba con dos alimentadores, llamados anillo exterior, anillo interior y

circuito Estadio respectivamente; para este proyecto se consideró cable tripolar con aislamiento de papel impregnado en aceite de 250 kCM; alimentaba a 37 subestaciones, con una capacidad total instalada de 14.65 MVA, correspondientes a facultades y edificios administrativos, así como al Estadio Universitario. Cada circuito fue proyectado en forma de anillo abierto, con el fin de brindar un servicio continuo en caso de falla.

Los Juegos Olímpicos de 1968 resultaban exigentes para la red eléctrica universitaria [Ver Figura AN.10], debido al mayor nivel de iluminación requerido para dicha celebración, se construyeron cuatro torres para la iluminación del estadio, lo que originó la instalación de dos anillos más (E y D).

En ese entonces hubo un incremento de la demanda por la ampliación del estadio, el constante crecimiento de la población escolar, la construcción de nuevos edificios e instalaciones diversas, que generaron cambios substanciales por lo que la capacidad de la Subestación General No.1 se vio rebasada, y se cambiaron los transformadores a dos de mayor capacidad para abastecer la carga excedente y quedar con un mayor margen de reserva.



Figura AN.10.- 12 de octubre de 1968 estadio olímpico de Ciudad universitaria.

La construcción en 1981 de la Subestación General No.2 fue necesaria por la saturación de la Subestación General No.1 (SG-1), debido al aumento de Institutos, Facultades y Centros de Investigación desde 1976.

La Subestación General No.2 (SG-2) se situó en el circuito exterior junto al Centro de Instrumentos, frente a la escuela de trabajo social. La ubicación de la

subestación se adecua a las condiciones de centro de carga, acometida y facilidad de acceso. Está conformada por dos transformadores de 2500 kVA, que fueron tomados de la Subestación General No.1 debido a que se encontraban en buen estado de operación.

La nueva red para la distribución de energía eléctrica de 6.6 kV estaba conformada por los anillos I y II con dos alimentadores cada uno que abastecía a las 12 subestaciones derivadas.

Con el paso del tiempo, Ciudad Universitaria fue creciendo, orillando a modificar las Subestaciones Generales No.1 y No.2 para soportar la creciente demanda.

Los cambios han consistido en aumentar la capacidad instalada en cada una de las subestaciones y en diversificar los circuitos derivados.

Actualmente la red de Ciudad Universitaria de 6.6 kV, es alimentada por la subestación Odón de buen, propiedad, de la Comisión Federal de Electricidad. El suministro es por medio de cuatro alimentadores de 23 kV que llegan de las Subestaciones Generales 1, 2, y 3.

El estado actual de los alimentadores de las SG-1 y SG-2 provenientes de la subestación Odón de Buen es relativamente precario, como puede observarse en la siguiente imagen [Ver Figura AN.11].

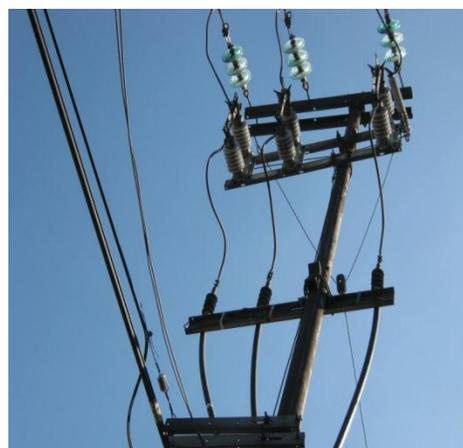


Figura AN 11.- Inicio de los alimentadores de las Subestaciones Generales 1 y 2 con dirección a Ciudad Universitaria

Entre los defectos, se encuentran la falta de hilo de guarda; indispensable para la protección de líneas aéreas ante la presencia de descargas atmosféricas que pueden producir daños a la red eléctrica y a los sistemas que se encuentren conectados a la misma [Ver Figura AN.12 y AN.13].

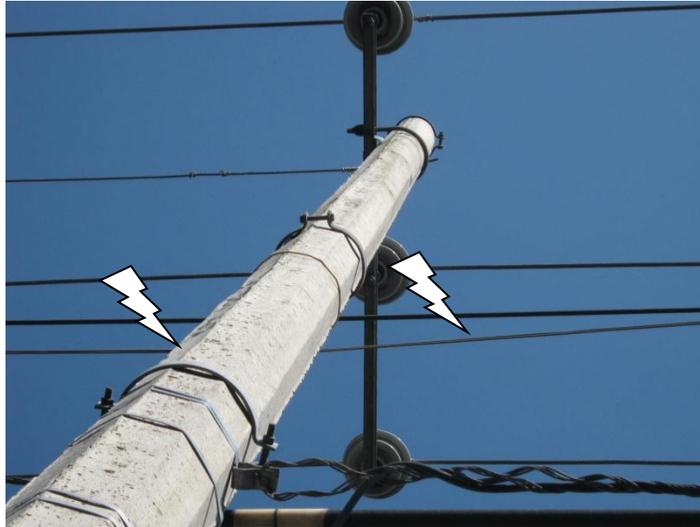


Figura AN.12.- Tramo de alimentador sin hilo de guarda



Figura AN.13.- Hilo de guarda sin aterrizar

Otro de los problemas de los alimentadores de las subestaciones eléctricas, es la corrosión y falta de mantenimiento a la que se encuentran sometidos dichos elementos; lo que hace más vulnerables al sistema, ya que pueden suscitarse eventos anormales, como accidentes viales, sismos con un grado considerable de

intensidad, fuertes ráfagas de viento entre otros, para los que el sistema podría tener fallas [Ver Figura AN.14, AN.15 y AN.16].



Figura AN.14.- Corrosión en los postes del circuito alimentador



Figura AN.15.- Corrosión en los transformadores

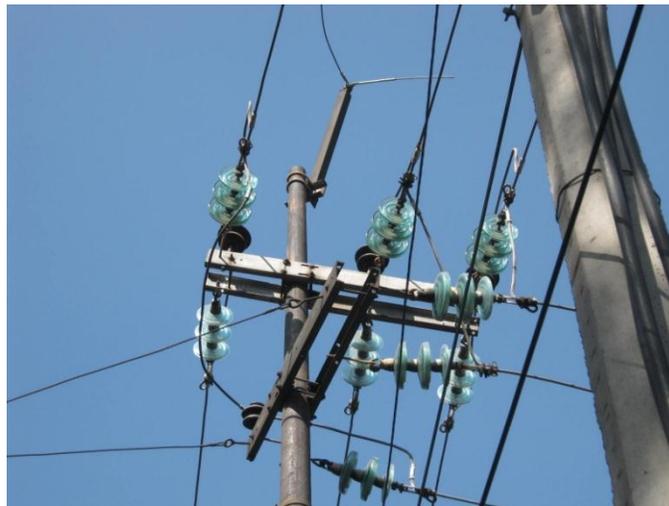


Figura AN.16.- Efectos de la corrosión y falta de mantenimiento



CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO



1.1.- Calidad del servicio eléctrico.

En un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) el suministro de la energía eléctrica se debe realizar con ciertos criterios de calidad, de tal forma que al utilizarse, se haga de manera correcta; la calidad del suministro de energía eléctrica se define principalmente por tres factores.

- a) Continuidad del servicio
- b) Regulación del voltaje
- c) Control de la frecuencia

1.1.1.- Continuidad del servicio

En la vida moderna es indispensable para todo desarrollo de cualquier país contar con buen suministro de energía eléctrica, ya que su interrupción causaría grandes catástrofes económicas irreparables.

Para lograr la continuidad del suministro deben tomarse los siguientes puntos necesarios para afrontar una falla en algún elemento del sistema eléctrico de potencia.

- a) Disponer de la reserva de generación adecuada para solucionar problemas de la posible salida de servicio o indisponibilidad de cierta capacidad de generación.
- b) Disponer de un sistema de protección automático que permita liberar una falla de manera inmediata.
- c) Diseñar el SEP de tal manera que la falla y desconexión de un elemento tenga la menor repercusión posible sobre el resto del SEP.

- d) Disponer de los circuitos de alimentación emergentes para responder a una falla en la alimentación principal.
- e) Disponer de los recursos indispensables para “n” restablecimientos rápidos del servicio, disminuyendo la duración de las interrupciones, cuando no se puedan evitar.

🦋 Las topologías del sistema y el esquema de conexiones adoptado por las subestaciones para la continuidad de servicio.

En la topología de los sistemas, estos se clasifican en tres tipos principalmente.

- a) Radial
- b) Anillo
- c) Red

En un sistema radial [Ver Figura 1.1] las cargas constan de una sola alimentación de manera que una falla o una avería en el sistema producen una interrupción completa del suministro de energía.

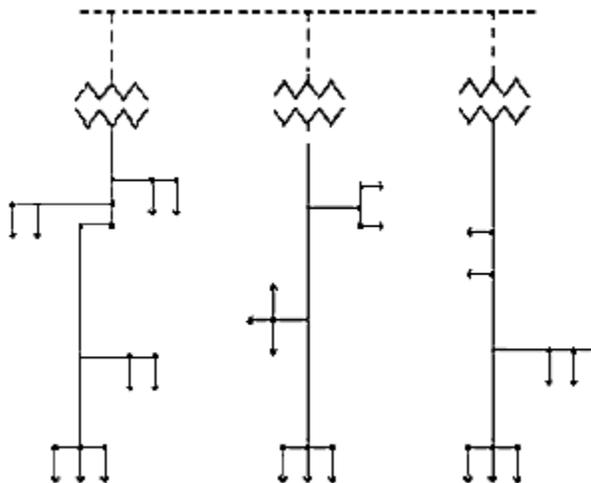


Figura 1.1.- Sistema radial

En un sistema en anillo [Ver Figura 1.2] las cargas constan de una doble alimentación y en caso de falla o una avería puede interrumpirse una de ellas sin causar la interrupción del suministro de energía. {B-6}

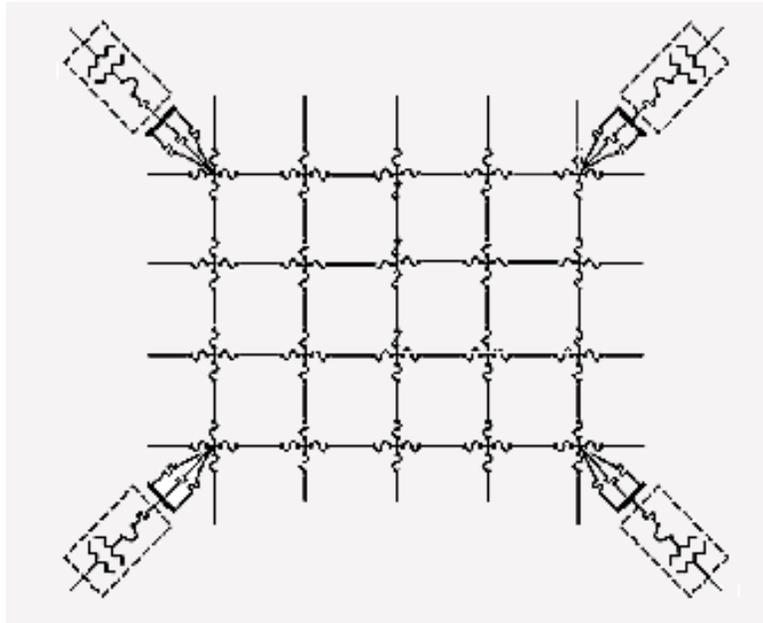


Figura 1.2.- Sistema en anillo

En un sistema en red, se incrementa el número de interconexiones y de igual manera la seguridad del servicio.

En cuanto se refiere a los esquemas de conexiones de las subestaciones, en la Figura 1.3 se muestran los diagramas unifilares de los esquemas más utilizados.

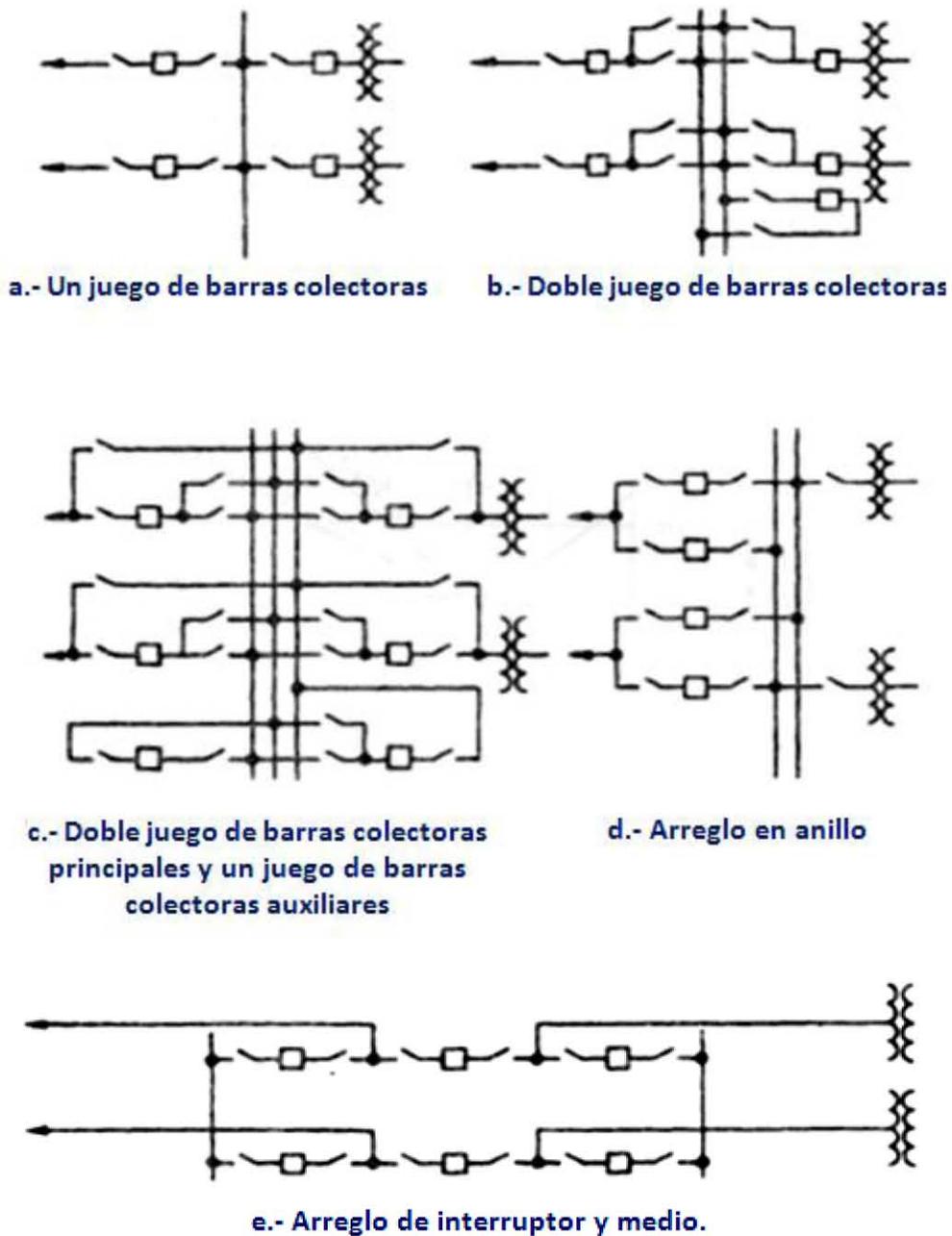


Figura 1.3.- Esquemas de conexión utilizados en subestaciones. {B-6}

1.1.2.- Regulación del voltaje

Los aparatos eléctricos están diseñados para operar a un cierto voltaje y su funcionamiento será el adecuado siempre que no se rebasen o bajen de estos límites de voltaje.

Por ejemplo, en los aparatos de calefacción eléctrica por resistencia, la energía consumida es proporcional al cuadrado del voltaje aplicado; por tanto, un voltaje inferior al nominal disminuye considerablemente al calor producido; un voltaje excesivamente alto acorta la vida del aparato.

En la Figura 1.4 se muestra el porcentaje en la variación de voltaje en un motor, tomando en cuenta su factor de potencia, corriente, eficiencia así como sus revoluciones por minuto.

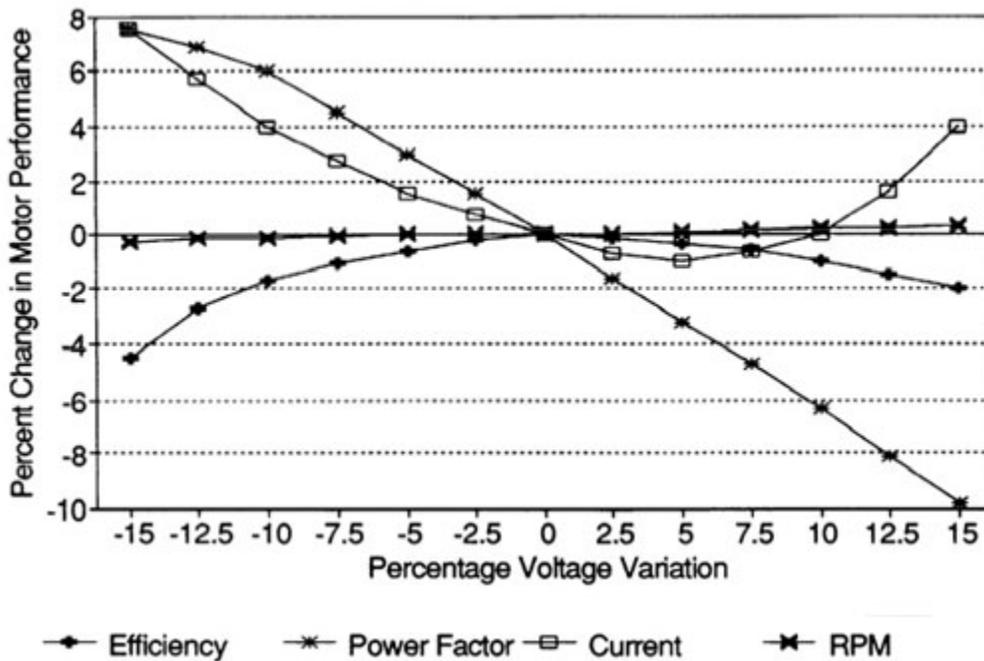


Figura 1.4.- Variación de voltaje en un motor de inducción

Los aparatos electrónicos están diseñados generalmente para operar con una tolerancia de $\pm 5\%$ de voltaje. En los aparatos de televisión, si el voltaje es inferior al voltaje de diseño del aparato la imagen se reduce.

Tenemos que ver la importancia de la regulación de voltaje en un sistema eléctrico, una variación de $\pm 5\%$ del voltaje en los puntos de utilización, con respecto al voltaje nominal, se considera satisfactoria, una variación de $\pm 10\%$ se considera tolerable.

1.1.3.- Control de la frecuencia.

Los sistema de energía eléctrica funcionan a cierta frecuencia dentro de una determinada tolerancia; aunque esta no está normalizada mundialmente, varía entre los 50 Hz y 60 Hz.

En general, el equipo electico de un sistema, principalmente los generadores y los transformadores, están diseñados para funcionar a cierta frecuencia.

Para el conjunto de la carga de un sistema eléctrico 1% de disminución de la frecuencia causa una disminución del orden de 1.5 a 2% de la carga.

Desde el punto de vista de funcionamiento del sistema debe tenerse en cuenta que si los generadores conectados al sistema están girando a la velocidad correspondiente a la frecuencia nominal, esto significa que existe un equilibrio entre la potencia real producida por los generadores y la potencia real absorbida por las cargas más las pérdidas del sistema.

Al producirse una variación de la carga conectada al sistema, se produce un desequilibrio que se refleja en una variación de la velocidad de rotación de las máquinas y en consecuencia de la frecuencia. Esto hace necesario un sistema de control adicional que restablezca la frecuencia a su valor nominal y reparta la generación entre las distintas unidades en la forma adecuada. El lograr esto

requiere un control de la frecuencia mucho más preciso que el que sería necesario de acuerdo con las características de las cargas. Por esta razón los sistemas modernos controlan la frecuencia con una precisión del orden de ∓ 0.05 Hz.

Entre las características que debe cumplir la frecuencia de un sistema puede incluirse su pureza es decir, que el porcentaje de armónicas sea despreciable.

En general las armónicas de las ondas de tensión existentes en un sistema de energía eléctrica se presentan en un porcentaje suficientemente reducido con relación a la onda fundamental para no causar problemas. {B-7}

1.2.- Cargabilidad

La cargabilidad se define como la cantidad máxima de potencia eléctrica que se puede enviar a través de una o de un conjunto de líneas de transmisión manteniendo las condiciones operativas del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) dentro de márgenes preestablecidos.

El concepto más general sobre cargabilidad o capacidad de transmisión es el que se refiere al límite o capacidad térmica del conductor; sin embargo, existen otros criterios restrictivos como la caída de tensión, los márgenes de estabilidad angular y de tensión.

1.2.1.- Limitaciones para la Transferencia de Potencia Real

1.2.1.1.- Capacidad Térmica

La capacidad térmica o límite térmico queda determinada por la máxima temperatura que soporta el conductor sin perder sus características eléctricas y mecánicas. El incremento de temperatura afecta la flecha de los conductores y la

pérdida de su resistencia mecánica. Por lo anterior, podrían disminuir las distancias a tierra permisibles o bien podría excederse el límite de elasticidad del conductor, con lo cual ya no recuperaría su longitud original aun cuando se enfriara posteriormente. La temperatura del conductor depende de la magnitud de la corriente y de la duración de ésta, de la temperatura ambiente, velocidad del viento y de las condiciones físicas en la superficie del conductor (ya que este límite resulta de la producción de calor por las pérdidas óhmicas).

1.2.1.2.- Caída de tensión

La caída de tensión es una limitante que se ve reflejada en el suministro de energía, debido a la cual existe una disminución de la misma. Está íntimamente relacionada con la capacidad de suministro de reactivos en los extremos terminales de la línea. La caída tensión se define de manera simple como la disminución del valor de la tensión, en el extremo receptor, debido a la resistencia y reactancia presentes al paso de corriente alterna en el conductor.

A modo representativo, teniendo presente la tensión al inicio y al final de la línea puede calcularse la caída de tensión de la siguiente manera, Ver Figura 1.5

$$CT = \frac{T_E - T_R}{T_R} \times 100 \quad \dots 1.1$$

Donde

CT es el porcentaje de caída de tensión.

T_E es la tensión de envío (inicio de la línea)

T_R es la tensión en el extremo receptor (fin de la línea o punto de derivación).

1.2.1.3.- Estabilidad Angular

La máxima cantidad de potencia que la línea puede entregar (es cuando $\theta = 90^\circ$) está dada mediante la expresión 1.2 y la Figura 1.6. Donde P_{max} representa el límite teórico de estabilidad de estado permanente para una línea sin pérdidas, donde θ es el ángulo entre las fuentes de tensión (tensión de envío, tensión de recepción).

$$P_{max} = \frac{T_E T_R}{X'} \quad \dots 1.2$$

Donde

T_E es la tensión de envío (inicio de la línea)

T_R es la tensión en el extremo receptor (fin de la línea o punto de derivación).

X' es la reactancia equivalente entre las dos fuentes de tensión.

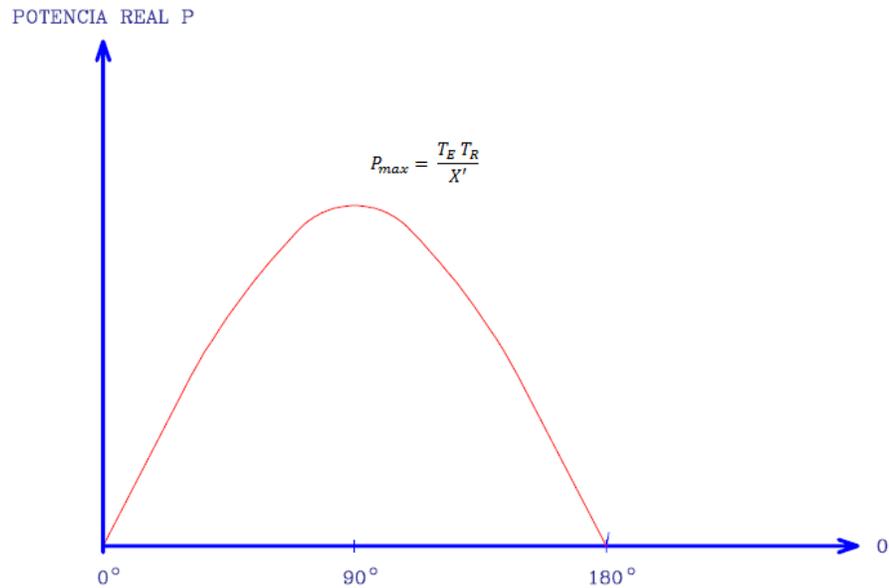


Figura 1.5.- Potencia real transmitida en función del ángulo entre las fuentes de tensión mostradas en la Figura 1.5

La limitación de estabilidad (estabilidad angular) se refiere al margen entre la potencia máxima (P_{max}) y la potencia de operación permisible (P_{op}). El ME (Ver Terminología) se define en términos de P_{max} y P_{op} .

$$ME = \frac{P_{max} - P_{op}}{P_{max}} \times 100 \quad \dots 1.3$$

Este margen se selecciona para proporcionar un funcionamiento estable del SEP ante una diversidad de contingencias que ocurren en el mismo y que pueden provocar cambios súbitos de carga y/o de generación ya sean transitorios o de régimen permanente. Esos cambios pueden ser originados por maniobras de apertura y cierre de interruptores, desconexión de líneas y/o transformadores, por cambios en el despacho de generación o por disturbios eléctricos, tales como fallas de corto circuito o fallas de equipos eléctricos

Las subestaciones de distribución (**Ver apéndice E**) se basan en estos criterios de calidad para poder brindar así lo que conocemos como calidad del servicio eléctrico.

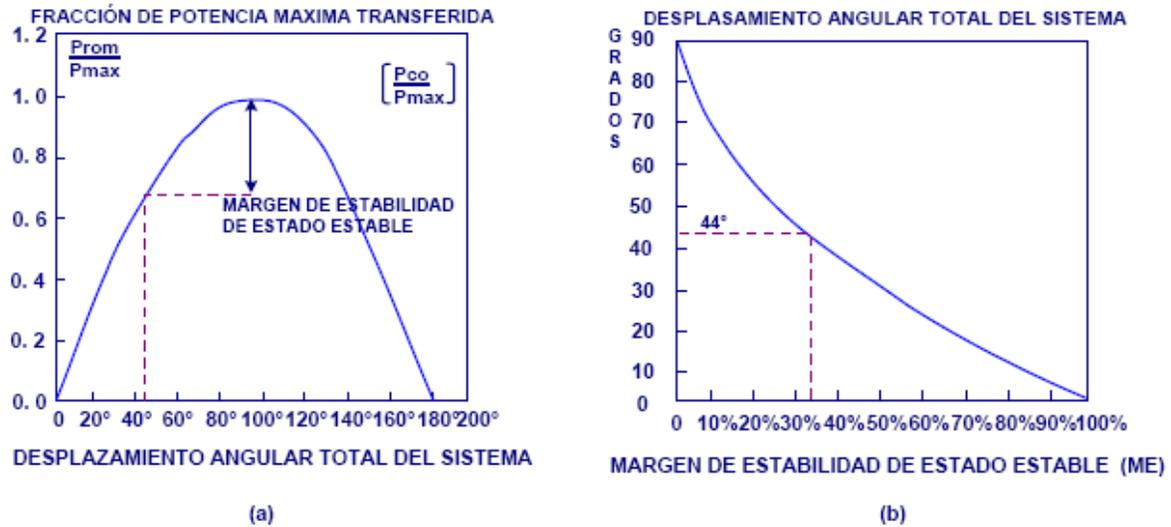


Figura 1.6.- a) Curvatura de ángulo – potencia b) Conversión del ME a desplazamiento angular

1.3.- Líneas eléctricas subterráneas.

Con el fin de realizar una propuesta adecuada es necesario conocer el tipo de cable que integra el sistema subterráneo [Ver Figura 1.7] y las ventajas de cada una de las características de construcción de estos elementos. Para esto se debe contar con la información necesaria y adecuada para elegir dentro de una gama de conductores con diferentes atributos, el elemento correcto.

Por otra parte es indispensable mencionar las partes que componen una red subterránea y la importancia que tiene contar con un tipo de sistema así, mostrando y explicando el fin de su aplicación, y cada uno de los elementos que lo conforman.



Figura 1.7.- Implementación de una red subterránea

1.3.1.- Metales conductores

Desde hace mucho tiempo los mejores conductores de energía eléctrica han sido los metales [Ver Figura 1.8]. Sin embargo, no todos los tipos de metales son considerados de la misma forma ya que existen algunas excepciones, en las cuales, este material ofrece gran resistencia al paso de la corriente eléctrica y como consecuencia son utilizados como resistencia eléctrica para producir calor; por ejemplo, un metal que se comporta de esa forma es el NiCr (Nicromo).

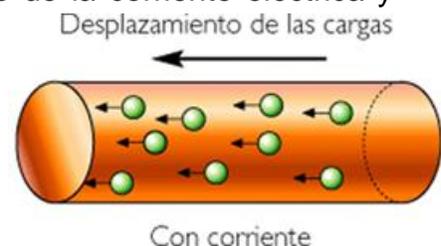


Figura 1.8.- Conducción de un metal conductor

Una de las propiedades más importantes de los metales que se toma en cuenta para ser utilizado en la fabricación de los cables para la distribución eléctrica es la conductividad.

La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo o medio para conducir la corriente eléctrica, es decir, para permitir el paso de partículas cargadas a través de él, bien sean los electrones, los transportadores de carga en conductores metálicos o semimetálicos, o iones, los que transportan la carga en disoluciones de electrolitos.

La conductividad es la inversa de la resistividad, por lo tanto:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \dots 1.4$$

Donde:

σ es la conductividad en S/m

ρ es la resistividad

En la Tabla 1.1 podemos ver los metales con mayor conductividad eléctrica. Debido al costo de cada elemento es que se utilizan en mayor o menor proporción para tal fin.

Tabla 1.1.- Conductividad eléctrica de algunos metales.

Metales Conductividad Eléctrica	Conductividad eléctrica [S·m]	Temperatura [°C]
Plata	$6,30 \times 10^7$	20
Cobre	$5,96 \times 10^7$	20
Cobre recocido	$5,80 \times 10^7$	20
Oro	$4,55 \times 10^7$	20-25
Aluminio	$3,78 \times 10^7$	20

El cobre es el metal más utilizado para fines de conducción eléctrica, por ser relativamente barato y tener buenas propiedades de un conductor eléctrico. Esta posición también es compartida por el aluminio, que, aunque está ligeramente abajo del cobre, tiene propiedades que bien pueden ser aprovechadas para el manejo de la electricidad.

Cabe mencionar que el mejor conductor es la plata [Ver Figura 1.9] y, que debido a su elevado costo y codiciada posesión, hacen de estos materiales, elementos poco utilizados, aunque no dejan de aplicarse en campos muy específicos.



**Figura 1.9.- Plata prácticamente puros
(lado derecho de la imagen)**

1.3.2.- Características del cobre y el aluminio.

Para fines prácticos, en la Tabla 1.2 se muestran las características del cobre y el aluminio, haciendo una comparación que posteriormente servirá para entender los motivos de elección de un conductor.

Tabla 1.2.- Propiedades del cobre y aluminio.

COBRE	ALUMINIO
Posee una excelente conductividad eléctrica.	Conductividad aproximada de un 60% de la del cobre.
Resistividad 17.241 Ω -mm ² /km	Resistividad 28.172 Ω -mm ² /km
La resistencia a la tracción del alambre de cobre estirado es de unos 4.200 kg/cm ²	Resistencia a la tracción 40% de la del cobre
Resistencia a la corrosión: Excelente	Resistencia a la corrosión: Buena
Punto de fusión: 1083 °C	Punto de fusión: 660°C
Coeficiente de dilatación lineal:	Coeficiente de dilatación lineal:
16.5 x 10-6	23.0x10-6

Con estos conocimientos particulares, se puede iniciar una comparación de las dos principales formas de distribución eléctrica, siendo éstas, las líneas aéreas (**Ver apéndice F**) y subterráneas las de mayor aplicación en cualquier red eléctrica.

Esta comparación se realiza con el fin de tener una mejor idea de cada uno de los sistemas mencionados, para poder definir, cuales son las ventajas y desventajas de los sistemas aéreos (**Ver apéndice F**) y subterráneos y más adelante justificar el motivo de la propuesta esencial de esta tesis.

1.4.- Cable eléctrico en líneas subterráneas

Antes de plantear cualquier clase de cable como opción para la implementación de una red eléctrica subterránea, es necesario conocer los componentes del mismo. A continuación se muestra de manera general la composición de un cable subterráneo, [Ver Figura 1.10] con una muy breve explicación, en la cual se profundizara más adelante en la presentación de este capítulo.

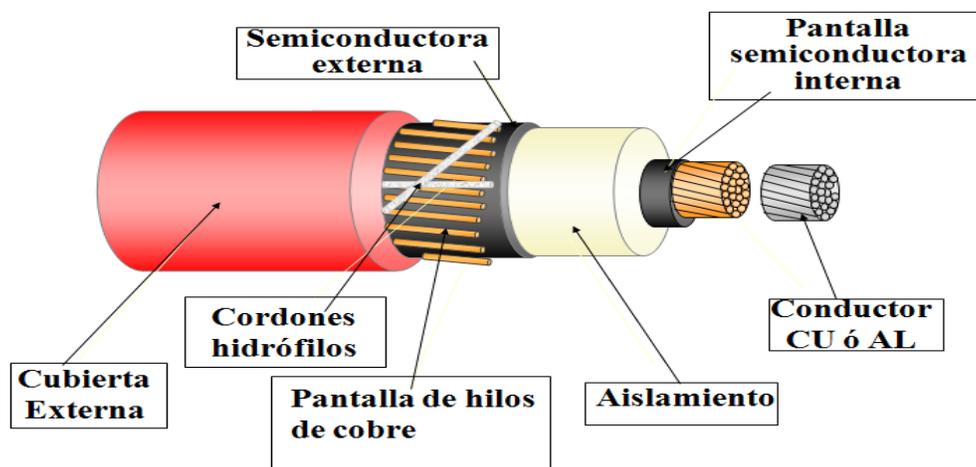


Figura 1.10.- Elementos que conforman un cable eléctrico en líneas subterráneas

1.4.1.- Componentes de los cables en líneas subterráneas.

Los cables subterráneos son el resultado de una gran variedad de procesos de fabricación en la cual se ven relacionados distintos materiales para dicho fin. Dependiendo del tipo del cable y voltaje para el que está diseñado, existen otros elementos cuyo objetivo es lograr un mejor aprovechamiento de las características de los aislamientos y la conservación de los mismos.

Existen diferentes formas para implementar cables subterráneos, por una parte pueden instalarse de manera interna en ductos de asbesto, cemento, fibra, entre otros materiales o bien pueden enterrarse directamente en el suelo donde generalmente se usa cable armado.

A) Conductor: El conductor de un cable subterráneo [Ver Figura 1.11] en la mayoría de los casos es de cobre, aunque en algunas ocasiones es sustituido por el aluminio en redes de baja tensión, y debido al modo de implementación de la red y todo lo que involucra el funcionamiento del cable, existen otros elementos que preservaran la eficiencia del conductor.

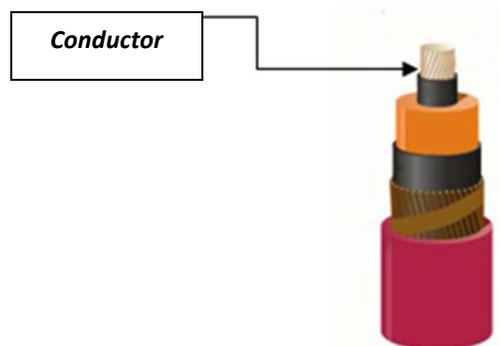


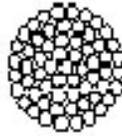
Figura 1.11.- Señalización del conductor de un cable

El material generalmente utilizado en líneas subterráneas es el conductor de cobre recocido debido a sus cualidades, en casos especiales o en algún otro país la aplicación en baja tensión es generalmente con cables de aluminio.

A continuación se mostrarán las formas y especificaciones que adoptan los conductores subterráneos de acuerdo a la forma del conductor.

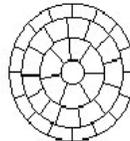
👉 CONDUCTOR CONCÉNTRICO CIRCULAR

Se encuentra conformado por alambres helicoidalmente trenzados en superficies concéntricas.



👉 CONDUCTOR CIRCULAR COMPACTO

Está constituido por un conductor concéntrico que con el objetivo de eliminar distancias entre los alambres que conforman el cable ha sido comprimido, con esto se alcanza un menor tamaño en el diámetro del conductor sin afectar el área del material que se utiliza en el mismo.



👉 CONDUCTORES SECTORIALES

Para obtener la forma de un sector de círculo se comprime un conductor concéntrico circular de manera que la sección que se encuentra deforme adopte una figura más regular. Para obtener un Cable polifásico se puede aislar cada

conductor obteniendo así un cable de menor diámetro exterior que el que está constituido por conductores concéntricos circulares.



CONDUCTORES ANULARES

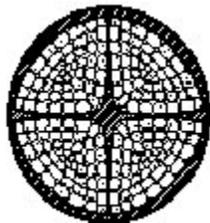
Uno de los objetivos en la construcción de un cable es mejorar su eficiencia y funcionamiento tomando en cuenta factores como el efecto superficial y por tanto la resistencia efectiva este cable por la manera en que está constituido disminuye tales efectos ya que está formado por alambres trenzados helicoidalmente, en capas concéntricas, sobre un núcleo que puede ser una hélice metálica en tal caso queda un conducto interior, o sobre un núcleo formado por un cable de yute o de otra fibra.



CONDUCTORES SEGMENTALES

Están constituidos por tres o cuatro conductores sectoriales, con una pequeña capa de aislamiento que tiene como fin separarlos eléctricamente. Los alambres de las capas exteriores de cada sector cambian de lugar en el conductor

segmental total intercalando su posición de central a periférica en distintos momentos, esto se debe a las características de construcción de los conductores sectoriales llevando como base conductores concéntricos circulares, de esta manera baja el efecto superficial y así mismo la resistencia del cable por lo que usualmente se usan en cables monofásicos destinados a soportar intensidades de corriente muy grandes.



B) Aislamiento y tipo de aislamiento: Capa de material dieléctrico [Ver Figura 1.12], que aísla los conductores de distintas fases, o entre fases y tierra. Puede ser de distintos tipos, tanto de material orgánico, como inorgánico.

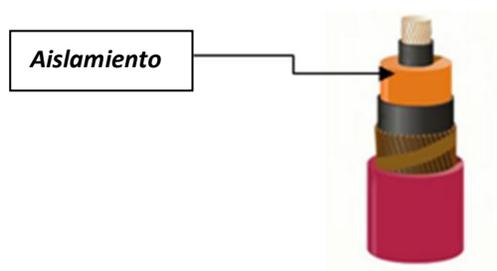


Figura 1.12.- Señalización del aislamiento de un cable

Esta capa es de material sintético de alta resistividad y su función es la de limitar el campo eléctrico.

A continuación se describen los tipos aislamientos utilizados en los cables eléctricos subterráneos.

1.- Papel impregnado

Una de las mejores opciones para el aislamiento en cables de alta tensión fue este material. Este aislamiento tiene características eléctricas magníficas como por ejemplo bajas pérdidas dieléctricas, alta rigidez y resistencia elevada a las descargas parciales, además de contar con buenas características térmicas. Este aislamiento tiene una gran desventaja frente a otros debido a que absorbe la humedad, la cual corrompe de manera considerable sus cualidades dieléctricas, de manera que, para que no suceda esto, en el proceso de fabricación el papel debe de estar libre de humedad totalmente y debe de protegerse con un forro hermético.

2.- Cambray barnizado

Este aislamiento tiene ventajas y desventajas frente al papel impregnado ya que es más flexible pero de menor calidad, sus aplicaciones se han realizado en redes en el caso de que los cables sean colocados verticalmente o con inclinaciones pronunciados ya que no presentan el problema que ocurre al utilizar el papel impregnado, en las que por efecto de gravedad el aceite puede escurrirse, actualmente los cables con este aislamiento han sido sustituidos por cables con aislamiento sintético que por sus características resultan más económicos.

3.- Termoplásticos

Entre los termoplásticos más utilizados como aislantes se encuentran el cloruro de polivinilo y el polietileno. Son materiales orgánicos sintéticos que son obtenidos por el proceso de polimerización; se vuelven plásticos al aumentar la temperatura, lo que hace posible que después de aplicarlos en caliente sobre los conductores, se solidifique con agua fría.

Comúnmente, el cloruro de polivinilo es aplicado en cables de baja tensión ya que exige un bajo costo y cuenta con una mayor resistencia a las descargas parciales. Por otro lado se encuentra el polietileno. Este material cuenta con

características maravillosas que lo hacen ver como un excelente aislante, tales como, pérdidas dieléctricas menores y rigidez dieléctrica que es muy similar con la que cuenta el papel impregnado, además de contar con una conductividad del calor mucho mayor detalle que favorece la disipación térmica.

Así como tiene cualidades benéficas este material también tiene sus desventajas, una de ellas es que el polietileno tiene un punto de fusión relativamente bajo (110 °C), situación que conlleva a limitar la temperatura de operación. En la actualidad se han realizado avances en cuanto al desarrollo de este material mejorando sus cualidades mecánicas, térmicas y bajando sus costos.

4.- Termofijos

Con el fin de mejorar las características de los cables y sus aislamientos se desarrollan materiales que mediante técnicas de vulcanización se desaparece su plasticidad y se aumenta la elasticidad y la consistencia mecánica.

Actualmente los materiales más utilizados para la fabricación de esta sección son el XLPE y EPR.

El Polietileno de cadena cruzada o XLPE (Cross-Linked Polyethylene) es el tipo de material de aislamiento más usado en los cables para Media Tensión. El Caucho de Etileno Propileno o EPR (Ethylene Propylene Rubber) es usado en menor proporción; ambos son materiales a los cuales se les aplica el proceso de reticulación (vulcanización), por medio del cual se logra que los materiales adquieran características termoestables en la Figura 1.13 se muestra lo mencionado.

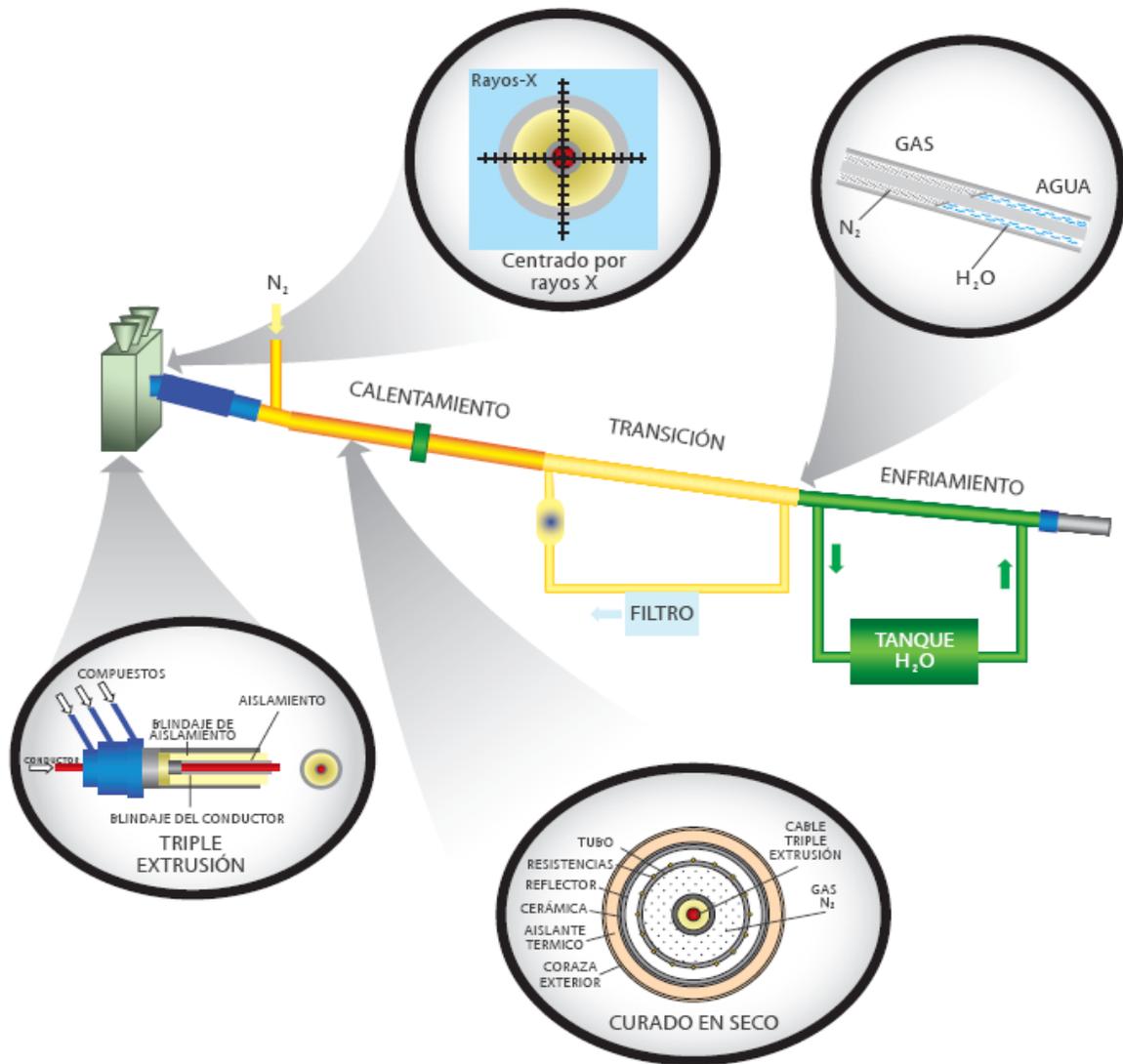


Figura 1.13.- Línea de Extrusión para Curado en Seco de Cables para Media Tensión

A continuación en la Tabla 1.3 se muestran algunas características importantes de los aislamientos.

Tabla 1.3.- Características de los aislamientos XLPE y EPR.

CARACTERISTICAS	UNIDADES	XLPE	EPR
Rigidez dieléctrica	kV/mm	25	25
Permitividad eléctrica		2.1	2.3
Factor de perdidas	%	0.1	1.5
Constante de aislamiento	MΩ-kM	6100	6100
Resistencia a la ionización		Buena	Muy buena
Resistencia a la humedad		Muy buena	Excelente
Color		Traslucido opaco	Rojizo
Temperatura de operación	°C	90	90
Temperatura máxima de sobrecarga	°C	130	130
Temperatura máxima de corto circuito	°C	250	250
Principales ventajas		Bajo factor de perdidas	Flexibilidad

Los tiempos de operación en sobrecarga no debe exceder 1500 horas acumuladas durante la vida útil del cable. Adicionalmente es recomendable que los períodos continuos en sobre carga no excedan dos horas.

Los tiempos de duración de un corto circuito son normalmente menores a un segundo.

B.1) Características de los aislamientos.

🦋 Rigidez dieléctrica

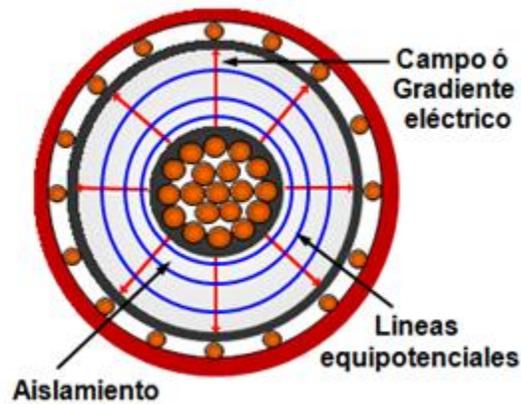


Figura 1.14.- Campo eléctrico y líneas equipotenciales presentes en un cable subterráneo

Para que se produzca una perforación en el aislamiento, se debe encontrar sometido bajo una intensidad de campo eléctrico, y al valor de éste, necesario para que ocurra la abertura se le conoce como rigidez dieléctrica [Ver Figuras 1.14 y 1.15].

$$\text{Rigidez Dielectrica} = \frac{V}{e} \dots 1.5$$

Donde

V es el voltaje aplicado al dieléctrico.

e es la distancia entre placas

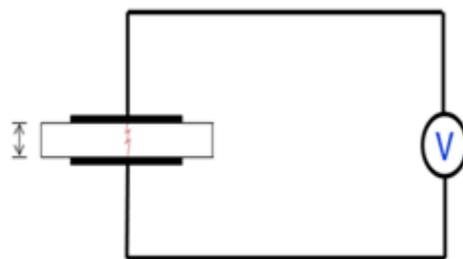


Figura 1.15.- Representación eléctrica de la rigidez dieléctrica

🍂 Constante dieléctrica

La constante dieléctrica tiene como definición la relación entre la capacitancia de un condensador que tiene como dieléctrico el aislamiento en cuestión y la capacitancia del mismo condensador con aire como dieléctrico [Ver Figura 1.16].

La capacitancia de un conductor es directamente proporcional a la constante dieléctrica de su aislamiento.

$$\text{Constante Dielectrica} = \frac{C}{C_0} \dots 1.6$$

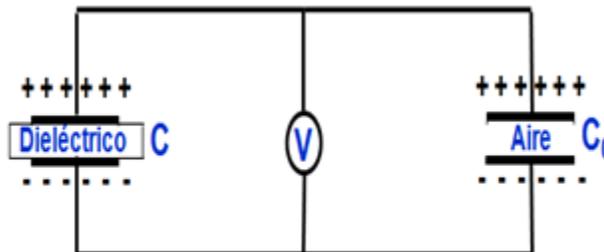


Figura 1.16.- Capacitancia de un material dieléctrico y aire, ambos con un mismo valor

Donde:

C es la capacitancia con un dieléctrico determinado

C_0 es la capacitancia con el aire como dieléctrico

🍂 Resistencia de aislamiento

Como sabemos no es posible fabricar un aislamiento ideal, al aplicarle una tensión al conductor de un cable, la diferencia de potencial entre el conductor y tierra dará como resultado una corriente a través del aislamiento aunque es muy pequeña puede causar daños al conductor.

$$R_a = k \log_{10} \left(\frac{d_a}{d_{p1}} \right) [M\Omega \cdot Km] \quad \dots 1.7$$

Donde

d_a es el diámetro del aislante (Ver Figura 1.17)

d_{p1} es el diámetro de la primera capa semiconductora

k es una cte. (Ver Tabla 1.4)

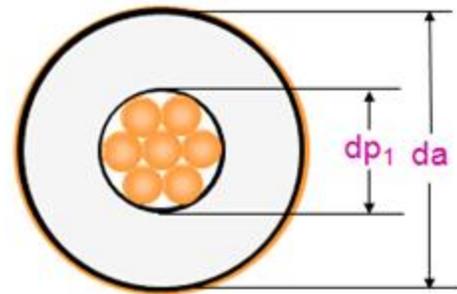


Figura 1.17.- Diámetros considerados para el cálculo de la resistencia de aislamiento

Tabla 1.4.- Valor de la constante k para los aislamientos más usados.

Tipo de aislamiento	k en $[M\Omega \cdot KM]$
	Para una temperatura de 20 $^{\circ}C$
Papel impregnado	3 000
XLP	5 120
EP	5 120

🐞 Gradiente de campo eléctrico

El gradiente máximo de tensión en operación es el esfuerzo al cual está sometido el aislamiento en la parte más próxima al blindaje del conductor [Ver Figura 1.18].

El gradiente máximo está expresado en kV/mm y es fundamental para calcular el espesor del aislamiento y viceversa. Ya que si calculáramos el espesor del aislamiento con el mismo gradiente máximo, resultarían diámetros imposibles de fabricar.

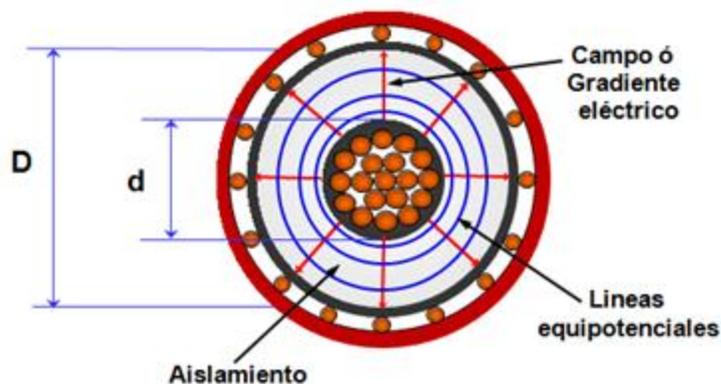


Figura 1.18.- Diámetros necesarios para calcular el gradiente máximo.

$$G_{max} = \frac{2V_o}{dL_n \left(\frac{D}{d}\right)} \quad \dots 1.8$$

Donde

G_{max} es el gradiente, esfuerzo o campo eléctrico en la periferia del Blindaje del conductor en KV/mm

V_o es el voltaje respecto a tierra aplicado al conductor. kV

d es el diámetro sobre el blindaje del conductor. mm

D es el diámetro sobre el aislamiento.

🍂 Pérdidas dieléctricas y factor de potencia del aislamiento.

Las pérdidas dieléctricas se presentan debido a la aplicación de diferencia de potencial entre el conductor del cable y tierra, ya que circula una corriente como consecuencia de no tener hasta ahora un dieléctrico perfecto. La corriente

resultante de esta característica esta adelantada en fase a la tensión aplicada, 90°.

Las pérdidas dieléctricas se deben a tres causas fundamentalmente:

- a) Perdidas por absorción dieléctrica.
- b) Perdidas por ionización.
- c) Perdidas por conducción a través del dieléctrico.

Se llama factor de ionización a la diferencia entre el factor de potencia de un aislamiento sometido a una tensión del orden del 25% de la tensión de operación y el factor de potencia del mismo aislamiento, pero sometido a una tensión superior a la de operación.

 Nivel de aislamiento.

Dependiendo de las características de funcionamiento de la red eléctrica que se esté considerando, se debe seleccionar el nivel de aislamiento adecuado para evitar posibles fallas en los cables subterráneos. El principal factor que se debe tomar en cuenta al seleccionar este parámetro es la tensión entre fases a la cual trabaja el sistema, y una vez seleccionado el material de aislamiento es necesario escoger el espesor de acuerdo al fabricante.

Existen tres niveles de aislamiento:

 Categoría 1. Nivel 100%

Esta categoría se selecciona en sistemas en donde se cuente con relevadores que tengan una acción rápida, y en caso de que ocurra una falla la libere a tierra

en un tiempo menor a un minuto; además este nivel se aplica a la mayoría de los sistemas que tienen el neutro conectado sólidamente a tierra. También puede aplicarse en sistemas donde la razón entre la reactancia de secuencia cero y de secuencia positiva no estén en el intervalo de -1 y -40 y que cumplan con la liberación de la falla. Esto se debe a que en sistemas con estas características pueden suscitarse tensiones muy altas cuando ocurren fallas a tierra.

Categoría II. Nivel 133%

Esta categoría incluye sistemas en los cuales no se cumple las condiciones de liberación de falla de la categoría I, aunque tampoco es recomendable que la falla se libere en un tiempo mayor a una hora.

Existe también algunas excepciones en las cuales también es recomendable utilizar un nivel 133% en vez de un 100%, y esto se da en caso de que se desee un espesor de del aislamiento mayor al de la categoría I.

Categoría III. Nivel 173%

Este nivel de aislamiento es generalmente aplicado en sistemas que no tienen definido un tiempo para llevar a cabo la liberación de una falla a partir del momento en que se suscita. Se recomienda su uso en sistemas que puedan presentar sobretensiones de un alto valor

B.2) Defectos y consecuencias en los aislamientos.

En la fabricación de los cables subterráneos se debe tener mucho cuidado en el proceso de colocación de cada uno de los elementos que lo conforman, ya que a consecuencia de los descuidos en el procedimiento, se pueden crear defectos

irreparables en el cable [Ver Figura 1.19], lo cual provocara que haya una concentración de potencial irregular y como resultado la disminución de vida útil de los cables y un riesgo para el sistema y los usuarios.

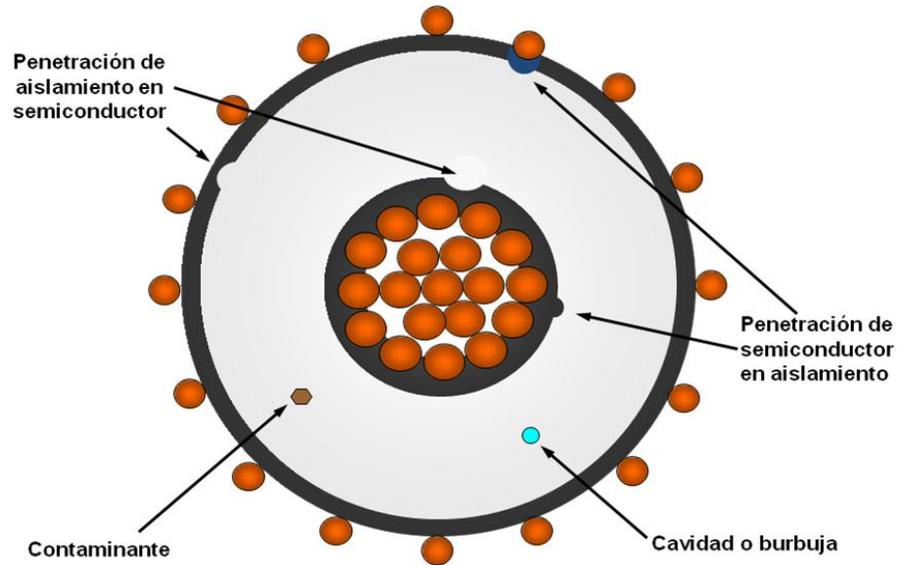


Figura 1.19.- Defectos y consecuencias de los aislamientos

En la imagen anterior se ejemplifica los defectos más comunes presentes en los cables.

Arborescencias.

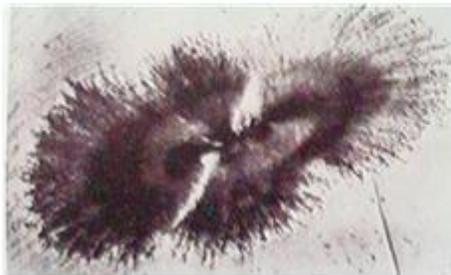
Las arborescencias son las consecuencias del esfuerzo al cual son sometidos los cables en conjunto con el defecto que se presentan en los mismos [Ver Figura 1.20].



"Ventiladas"



Arborescencia eléctrica dentro de una de agua



Tipo "corbata de moño"



Tipo "corbata de moño"

Figura 1.20.- Arborescencias de agua teñidas en cables extruidos.

🦋 Características de las arborescencias

➤ Químicas (Ver Figura 1.21)

- No se producen en cables de aluminio.
- Tienen forma de brócoli.
- Se forman en lugares con gran nivel de azufre, que reacciona con el cobre del conductor y penetra el aislamiento.



Figura 1.21.- Arborescencias químicas

➤ **Eléctricas (Ver Figura 1.22)**

- Se forman a partir de contaminantes, cavidades e irregularidades en la superficie de los semiconductores.



Figura 1.22.- Arborescencias Eléctricas

- Semejan arboles sin hojas y son canales huecos carbonizados.
- Se pueden formar a partir de arborescencias de agua
- Requiere concentración de campo eléctrico mayor que las del agua para su formación.

➤ **De agua (Ver Figura 1.23)**

- Requiere la presencia de agua y concentraciones de campo eléctrico menor que las eléctricas para su formación.

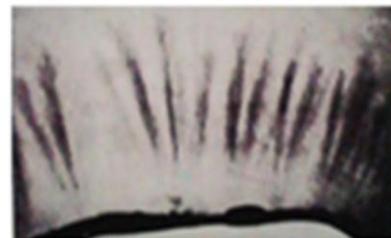


Figura 1.23.- Arborescencias de agua

- Se cree que son racimos de microcavidades.
- Se forman a partir de contaminantes, cavidades e irregularidades en la superficie de los semiconductores.

B) Cubierta semiconductor: La cubierta semiconductor es de mucha importancia, ya que gracias a él se mantiene de manera uniforme el gradiente eléctrico en la superficie del conductor disminuyendo casi en su totalidad las distorsiones del campo eléctrico, resultado de las protuberancias constituidas por los hilos de la capa exterior. La meta que se persigue con la aplicación de un material semiconductor es la de disminuir la intensidad de las descargas

C) eléctricas que pueden producir ionización, con respecto a las que se tendría como resultado si se utilizasen cubiertas de tipo metálico.

La cubierta semiconductor puede estar conformada por una tira de papel saturada de carbón coloidal, con la cual se envuelve el conductor directamente.

Cubierta semiconductor interna (Ver Figura 1.24).

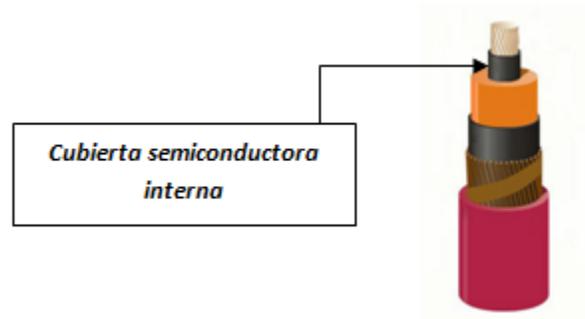


Figura 1.24.- Cubierta semiconductor interna

Es un material que tiene una baja resistividad y su función es la de promover la distribución simétrica y radial del esfuerzo del campo eléctrico sobre el aislamiento.

Capa semiconductor externa (Ver Figura 1.25)

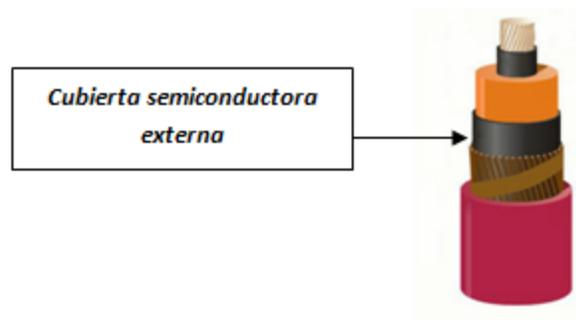


Figura 1.25.- Cubierta semiconductor externa

Se aplica sobre el aislamiento con el fin de hacer que las líneas del campo eléctrico sean radiales haciendo trabajar en forma uniforme el aislamiento. Debe ser lo más tersa y lisa posible para evitar la formación de burbujas en la interface con el aislamiento.

D) Blindaje o pantalla: Cubierta metálica, que recubre el cable en toda su extensión y que sirve para confinar el campo eléctrico y distribuirlo uniformemente en su interior.(Ver Figura 1.26)

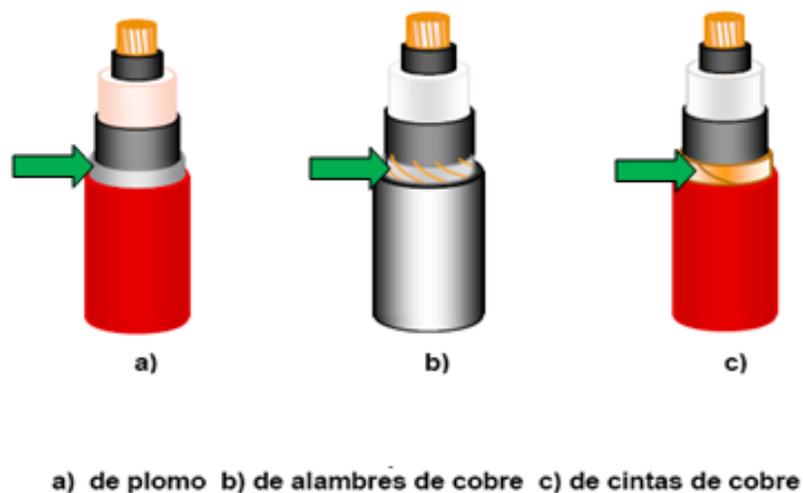


Figura 1.26.- Variantes de pantallas metálicas

La pantalla puede ser elaborada con una cinta de papel metalizado o una cinta de metal no magnético, con un espesor de alrededor de 0.8 mm enrollado sobre el aislamiento.

No en todos los casos se requiere un control de la distribución del campo eléctrico y por lo mismo no se requiere de la pantalla, como en el caso de los

cables usados en baja tensión donde el gradiente de potencial al cual es sometido el aislamiento, son bajos.

Propósitos de diseño de acuerdo a la función de la pantalla.

Pantalla para propósitos electrostáticos

Las pantallas pueden ser de tres tipos de formación, de cubierta metálica, alambres o cintas. Las pantallas constituidas a base de cintas o de alambres son generalmente de cobre normal, aunque también se presenta en combinación del estaño para evitar daños graves debidos a la corrosión (Ver Tabla 1.5).

Tabla 1.5.- Ventajas y desventajas en los tipos de pantallas

Tipo de pantalla	Ventajas	Desventajas
A base de cintas	<p>Proporciona una pantalla electrostática adecuada.</p> <p>Reduce el ingreso de humedad en el aislamiento</p>	<p>Propiedades eléctricas inconsistentes, debido a que en el manejo se afecta el traslape.</p> <p>Requiere de radios de curvatura mayores que para cables con pantalla de alambres.</p> <p>Construcción vulnerable durante la instalación.</p> <p>En empalmes y terminales se requiere de mayor tiempo y habilidad para ejecutar adecuadamente los cortes.</p>
A base de alambres	<p>Proporciona una pantalla electrostática adecuada.</p> <p>Las características eléctricas de la pantalla son consistentes y controlables.</p> <p>Fácilmente se incrementa la capacidad modificando el número de alambres.</p> <p>No requiere de gran destreza para realizar cortes en empalmes y terminales.</p> <p>Son menos vulnerables durante la instalación.</p>	<p>Permite el paso de la humedad libremente.</p> <p>Requiere precauciones para evitar desplazamiento de los alambres durante la instalación.</p>

Pantalla para conducir corrientes de falla.

El fin principal que persigue en este ámbito es conducir de manera segura una parte importante de la corriente de falla a tierra, y va a depender del tipo de

sistema que se esté instalando, su tensión y el tipo de conexión que exista de dichas pantallas.

Pantalla neutro

Este tipo de aplicación tiene ventajas adicionales a las funciones que se han descrito anteriormente, ya que bajo ciertas condiciones, la pantalla metálica puede ser utilizada como neutro, como por ejemplo en sistemas residenciales subterráneos.

Una de las funciones principales de la implementación de las pantallas es evitar que exista una diferencia de potencial con respecto a tierra en la superficie de los cables, con lo cual protegemos al usuario de recibir alguna descarga.

Se puede observar en la Figura 1.27 como el potencial se anula de acuerdo con la conexión de la pantalla.

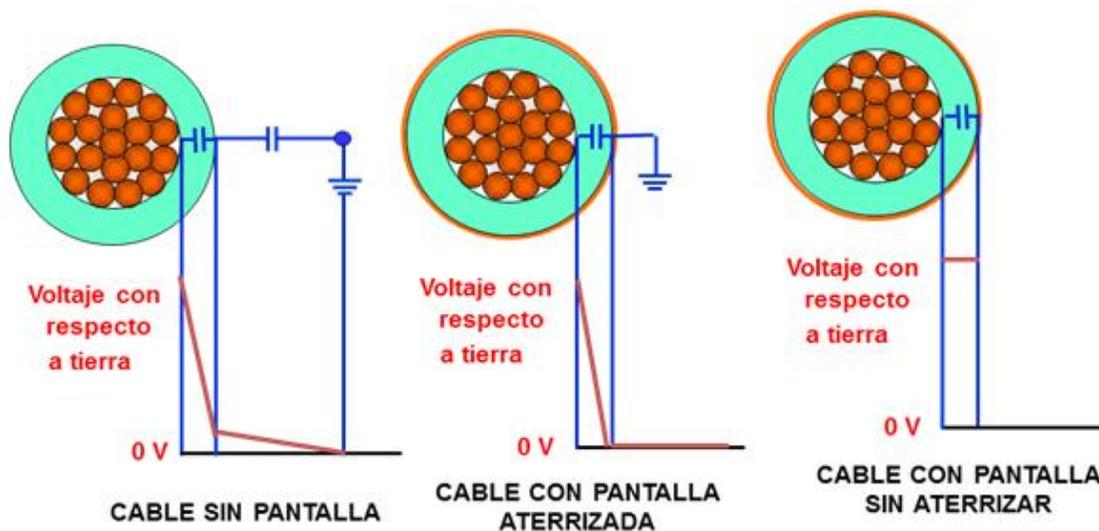


Figura 1.27.- Defectos y consecuencias de los aislamientos

E) Cubierta o forro: El forro se aplica principalmente para proteger al cable [Ver Figura 1.28], liberándolo de agentes químicos con los cuales se puede hallar en contacto, además de evitar que la humedad del medio sea absorbida y provoque un deterioro al cable, además de estos beneficios, el forro [Ver Tabla 1.6] otorga una protección mecánica al cable para contrarrestar cualquier esfuerzo al que se vea sometido.

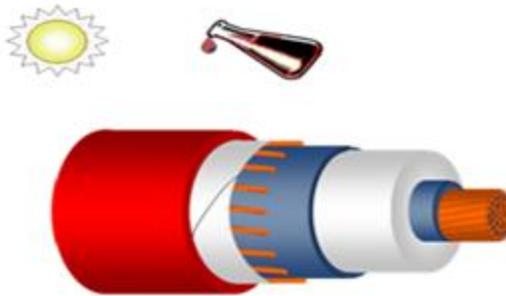


Figura 1.28.- Cubierta o forro

Tabla 1.6.- Material utilizado en la cubierta de cables subterráneos

Cubiertas	Materiales
Metálicas	Plomo
	Aluminio
Elastoméricas	Hypalon
	Polietileno clorado
	Neopreno
Termoplásticas	PVC
	Polietileno
	Alta densidad
	Baja densidad

El principal elemento utilizado para la aplicación del forro es el plomo, aunque cabe mencionar que también el aluminio se ha llegado a implementar. Aunado a todo esto, para incrementar la protección mecánica, puede enrollarse un fleje de acero. Chaqueta o cubierta externa [Ver Figura 1.29], de material aislante muy resistente, separa los componentes de un cable del medio exterior.

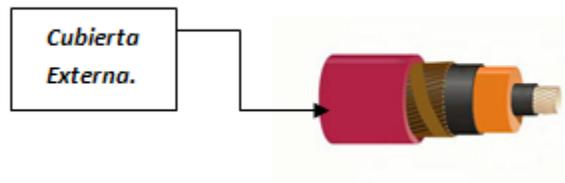


Figura 1.29.- Cubierta externa

Una opción muy importante es la de usar forros no metálicos, conformados por diversos tipos de fibras que recubren el cable o por materiales extruidos, principalmente para poder proteger cables con aislamiento termoplástico o termofijos.

1.5.- Ventajas de un sistema subterráneo

Los sistemas subterráneos tienen diversas ventajas de acuerdo a las características con las que estos son construidos y diseñados. Su principal ventaja relacionada a este punto es que los elementos de las subestaciones no se encuentran expuestos al clima y condiciones atmosféricas, como la lluvia, descargas, entre otras, por lo cual brinda una mayor confiabilidad del servicio y una continuidad extensa de la misma.

Otra ventaja primordial es la imagen del paisaje, ya sea urbano o natural, debido a que no cuenta con conductores expuestos y que no dañan la visibilidad del lugar en donde son instalados este tipo de redes; por ejemplo en Ciudad Universitaria se cuenta con este tipo de red al igual que el centro histórico de la ciudad de México.

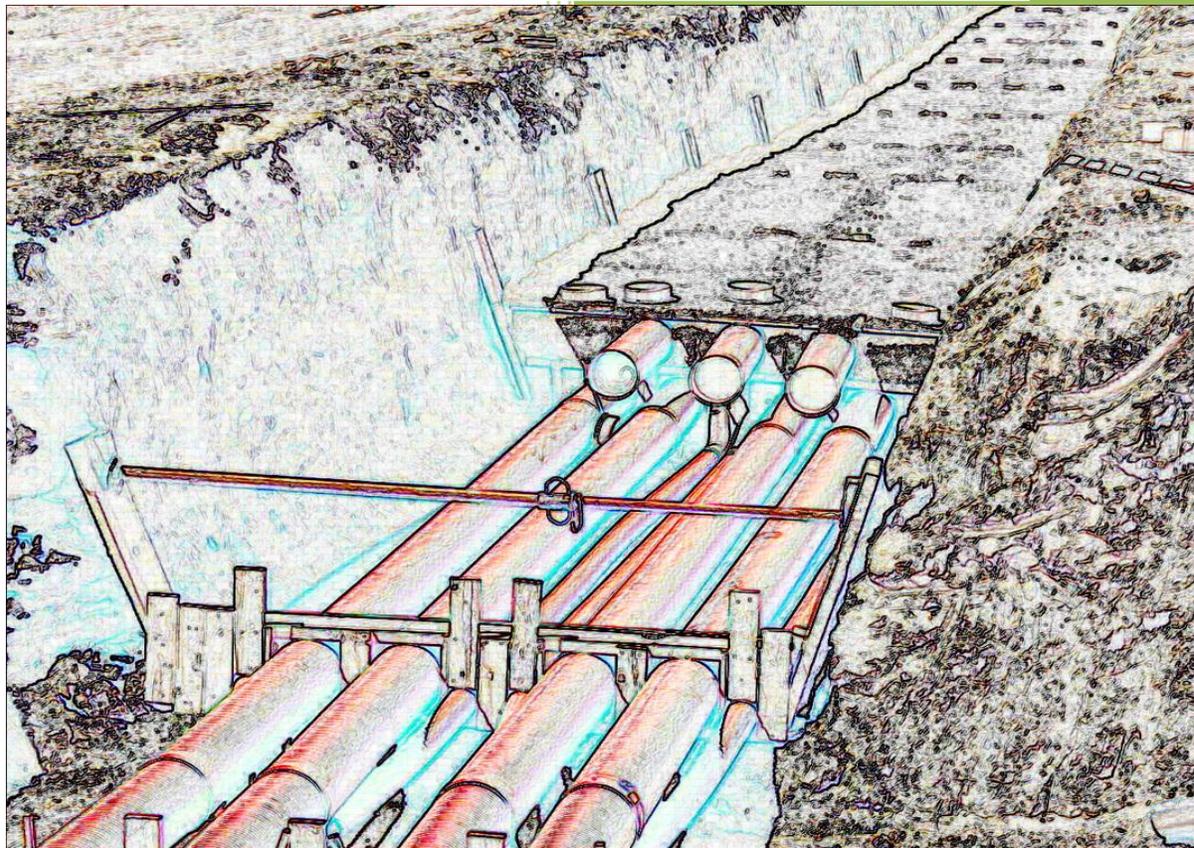
Estos sistemas son implementados en lugares con una gran concentración de carga, por lo cual es necesario que el tipo de transformadores utilizados tengan una mayor capacidad. Los transformadores utilizados en estas subestaciones tienen una capacidad superior a la del tipo poste

Se puede mencionar algunos inconvenientes de las redes subterráneas, y es que son de un costo elevado, ya que requiere una obra civil mucho mayor que las redes aéreas y que tienen una menor capacidad de transmitir energía por unidad de sección de conductor, resultado de las condiciones a las que está sujeto el conductor por su aislamiento



CAPÍTULO 2

AMPACIDAD



INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explica por medio del método de Ampacidad el cálculo de capacidad de conducción de corriente en el conductor del cable que tiene por objeto alimentar a la Subestación General Número 1 (ubicada en la Facultad de Psicología) y a la Subestación General Número 2 (ubicada en la Facultad de Trabajo Social); así como, a la Subestación General 4 (ubicada en los alrededores del Instituto de Biomédicas), desde la Subestación Odón de Buen (ubicada sobre la Av. Insurgentes), con una tensión entre fases de 23 kV [Ver Figura 2.1].



Figura 2.1.- Ubicación de las Subestaciones Generales 1, 2, 3, 4 y 5

Para cumplir el objetivo antes mencionado, es necesario contar con un cable con las características óptimas para un desempeño adecuado de sus funciones, eliminando la mayor parte de pérdidas posibles debidas a la conducción de energía eléctrica y suministrando un tiempo de vida útil y extenso, favoreciendo a los usuarios con una mejor continuidad del servicio y disminuyendo las pérdidas económicas debidas a la reposición de cables como resultado de fallas y las pérdidas eléctricas.

El procedimiento utilizado para el análisis de Ampacidad está basado en el método de -Neher- Mc Grath {B-1}. El cual es reconocido a nivel normativo por la IEEE {B-2} para sistema de cables aislados enterrados, y también por diversas empresas del ramo de cables para distribución {B-3}.

La determinación de la capacidad de conducción de corriente de un cable principalmente se encuentra relacionado con la generación de calor debida a la conducción de corriente por los elementos conductores del mismo, que forman parte de un cable de distribución subterránea; además, involucra el problema que conlleva la transferencia de calor y los medios (resistencias térmicas) a través de los cuales circula el flujo de calor, debido a la diferencia de temperatura con el medio ambiente.

Es importante recalcar que en un sistema de distribución subterráneo existe una generación de calor por parte de algunos elementos que conforman el cable y la instalación, como lo son conductores, además del material dieléctrico que tiene el cable, el ducto cuando este es metálico y se comporta como conductor. La potencia transmitida a diferentes cargas se ve limitada por las resistencias térmicas que conforman los cables y el medio que rodea a los mismos [Ver Figura 2.2].

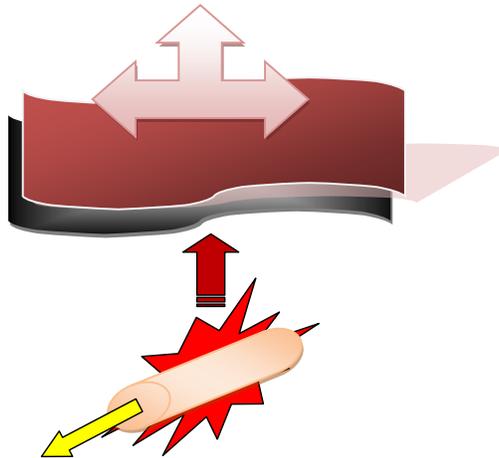


Figura 2.2.- Esquema general de disipación de energía, producto del paso de corriente a través del cable.

Flujo de corriente.

Flujo de calor.

Flujo de calor a través del medio.

2.1.- Transmisión del calor generado por la conducción de corriente a través de un cable de media tensión.

Como resultado del efecto joule [1] debido a la conducción de corriente a través de un cable, existe la producción de calor por las fuentes antes mencionadas; también por la diferencia de temperatura existente entre las fuentes de calor y el medio ambiente; ya que se efectúa una transferencia de calor con objeto de alcanzar un equilibrio térmico en algún momento.

El flujo de calor se lleva a cabo a través de los diferentes materiales por los que está compuesto el cable, el ducto y el medio que rodea a este; por lo que a su vez también se tiene una resistencia térmica que se opone al paso del calor generado [Ver Figura 2.3]. A continuación se muestran las resistencias térmicas a las cuales debe sobreponerse el flujo de calor para ser liberado al medio ambiente.

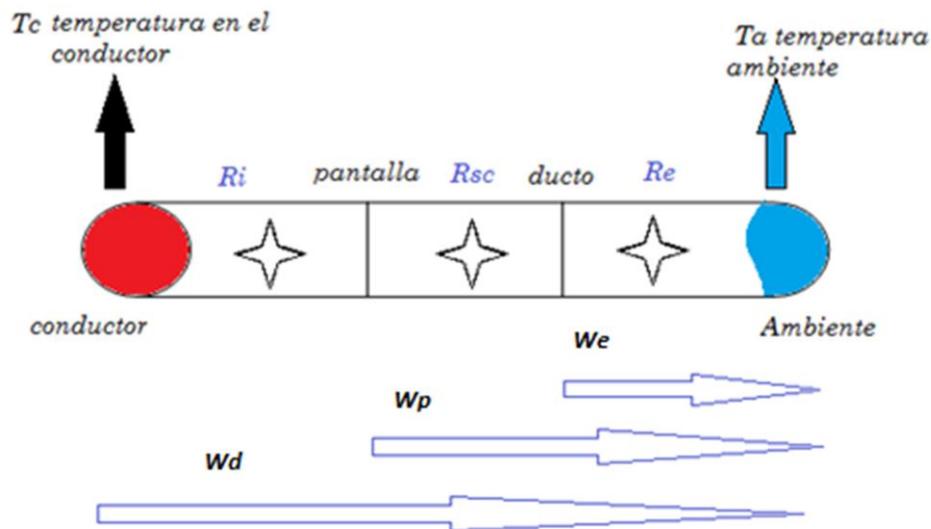


Figura 2.3.- Resistencias térmicas que debe de atravesar el calor generado en el conductor, pantalla metálica o ducto.

Como podemos observar entre el conductor y el medio ambiente existen tres resistencias térmicas principalmente, la resistencia térmica del aislamiento (R_i), resistencia térmica entre la pantalla metálica y el ducto (R_{sc}) y la resistencia térmica entre el ducto y el ambiente (R_e), todas las resistencias tomadas por unidad de longitud como lo veremos más adelante en el cálculo de estas. Se tienen dos temperaturas a considerar principalmente, la temperatura del conductor (T_c), así como la temperatura ambiente (T_a) que para nuestro caso siendo una instalación subterránea, la temperatura es la del terreno a la profundidad a la cual es colocada.

También debemos tomar en cuenta que el calor generado por el aislamiento. Aunque este se genera en todo el volumen del conductor, se puede considerar, que el calor generado es producido por una sola fuente de calor a la mitad de la resistencia del aislamiento [Ver Figura 2.4].

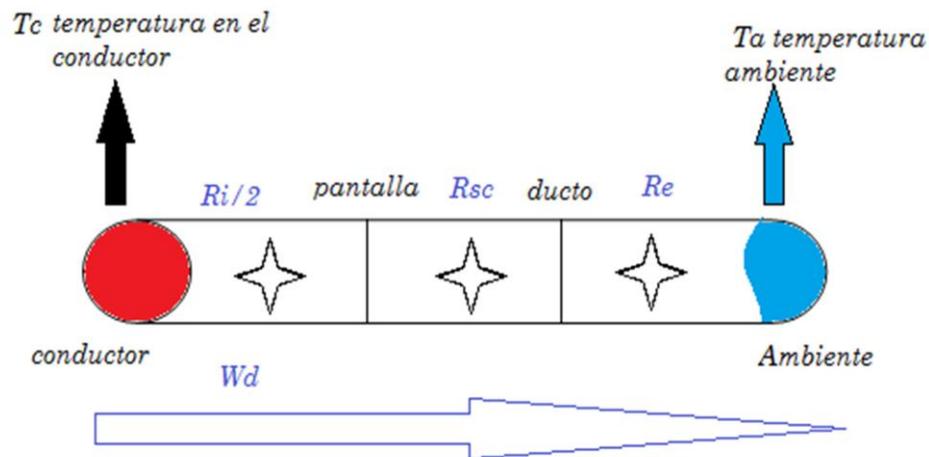


Figura 2.4.- Flujo de calor en el aislamiento, resistencias térmicas que debe de atravesar el calor generado en el aislamiento

A continuación se describen todos los parámetros mencionados en las Figuras 2.3 y 2.4 para su mejor entendimiento de estos.

T_c es la temperatura del conductor, en °C.

T_a es la temperatura del ambiente, en °C. Para cables subterráneos esta temperatura es la del terreno a la profundidad de instalación.

R_i es la resistencia térmica de aislamiento por unidad de longitud, en °C-m/W.

R_{sc} es la resistencia térmica entre la pantalla metálica y el ducto por unidad de longitud, en °C-m/W.

R_e es la resistencia térmica entre el ducto y el ambiente por unidad de longitud, en °C-m/W.

W_c es el calor generado en el conductor por unidad de longitud, en W/m.

W_p es el calor generado en la pantalla por unidad de longitud, en W/m.

W_e es el calor generado en el ducto por unidad de longitud, en W/m.

W_d es el calor generado en el aislamiento por unidad de longitud, en W/m.

2.1.1.- Efecto Joule y cálculo generalizado de la capacidad de conducción de corriente a través de un cable subterráneo.



Figura 2.5.- James Joule 1818-1889

El efecto Joule como ya se mencionó, es aquel fenómeno que se da como resultado del paso de corriente eléctrica a través de un conductor. Parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. Esto provoca pérdidas de energía en forma de calor en la transmisión de la misma, es por eso que siempre debe tomarse en cuenta este fenómeno para un mejor aprovechamiento de la energía; como consecuencia existen caídas de tensión y potencia que altera el buen funcionamiento del sistema eléctrico con el que se cuenta.

El efecto Joule como ya se mencionó, es aquel fenómeno que se da como resultado del paso de corriente eléctrica a través de un conductor. Parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. Esto provoca pérdidas de energía en forma de calor en la transmisión de la misma, es por eso que siempre debe tomarse en cuenta este fenómeno para un mejor aprovechamiento de la energía; como consecuencia existen caídas de tensión y potencia que altera el buen funcionamiento del sistema eléctrico con el que se cuenta.

$$P = i^2 \times R \quad \dots 2.1$$

Donde

P es la potencia generada.

i es la corriente que circula a través del conductor.

R es la resistencia que presenta el conductor al paso de la corriente.

Un aspecto importante que se debe considerar, es la cantidad de corriente que un cuerpo puede conducir sin sufrir daños. En el caso de los cables debe tomarse en cuenta la temperatura máxima de operación para la cual están diseñados. Esta

consideración es uno de los puntos que garantizará que un sistema funcione de manera eficiente y segura.

Podemos expresar la ecuación de Joule de la siguiente forma:

$$w_c = I^2 R \quad \dots 2.2$$

De acuerdo a los parámetros mencionados anteriormente podemos expresarla así:

$$\Delta T_c = I^2 R (r_i + q_s R_{sc} + q_e R_e') \quad \dots 2.3$$

Y si

$$\Delta T_c = T_c - T_a \quad \dots 2.4$$

Donde

T_c es la temperatura en el conductor, en °C.

T_a es la temperatura del ambiente, en °C.

Entonces se tiene

$$T_c - T_a = I^2 R (R_i + q_s R_{sc} + q_e R_e') + \Delta T_d \quad \dots 2.5$$

ΔT_d es el incremento de temperatura debido al calor generado en el aislamiento

$$\Delta T_d = W_d R_{da}' \dots 2.5.1$$

Donde

$$R_{da} = \frac{R_i}{2} + R_{sc} + R_e' \dots 2.5.2$$

Realizando las sustituciones y los despejes adecuados se tiene una ecuación directa para determinar la corriente máxima permisible que puede circular por el cable.

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R(R_i + q_s R_{sc} + q_e R_e')}} \dots 2.6$$

2.2- Resistencia del conductor

2.2.1.- Resistencia del conductor por corriente directa

Enseguida se muestra la ecuación que determina la resistencia por corriente directa de un conductor eléctrico, para cualquier material:

$$R_{cd} = \rho \times \frac{L}{A} \dots 2.7$$

Donde

R_{cd} es la resistencia por corriente directa

L es la longitud del conductor.

A es el área de la sección transversal del conductor.

ρ es la resistividad volumétrica del material del conductor en unidades compatibles con L y A .

En cuanto a los conductores que se han fabricado con una serie de alambres (cable) el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$R_{cd} = \frac{R'}{n} = \frac{\rho}{n} \times \frac{L}{A'} \quad \frac{\Omega}{Km} \quad \dots \quad 2.8$$

Donde

R' es la resistencia de cada alambre.

A' es el área de la sección transversal de cada alambre.

n es el número de alambres.

Su resistencia es igual a la resistencia de cada uno de ellos dividido entre el número total de alambres.

Puesto que las longitudes de los alambres son diferentes por la forma de cableado se debe tomar en cuenta la ecuación 2.9 para definir el incremento de resistencia por el efecto del cableado.

$$R_{cd} = \rho \times \frac{L}{A} (1 + k_c) \quad \frac{\Omega}{Km} \quad \dots \quad 2.9$$

k_c es el factor de cableado [Tabla 2.1]

Tabla 2.1.- Factores de cableado de acuerdo al tipo de cable.

Tipo de cableado	Kc
Redondo normal	0.02
Redondo compacto	0.02
Sectorial	0.015
Segmental	0.02

Es importante que tomemos en cuenta el efecto de la temperatura en la resistencia del conductor del cable, ya que esta varía de acuerdo al cambio de temperatura a la cual se encuentre sometido el cable aislado; lo que resulta en un aumento de resistencia.

La resistencia del conductor a la corriente directa por unidad de longitud a la máxima temperatura de operación se calcula de la siguiente forma:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)] \text{ en } \Omega \quad \dots \text{ 2.10}$$

Donde

R_2 es la resistencia del conductor a la corriente directa por unidad de longitud a la máxima temperatura de operación en Ω/m .

R_1 es la resistencia del conductor a la corriente directa por unidad de longitud a 20 °C de temperatura en Ω/m

T_2 es la máxima temperatura de operación en °C a la que se desea obtener el valor de resistencia

T_1 es generalmente a una temperatura estándar de 20 °C (68 °F).

α es el coeficiente de corrección por temperatura.

Existen valores de temperatura en la cual el valor teórico de la resistencia es nulo. En la Tabla 2.2 se mencionan los valores de los materiales más usados en la fabricación de conductores eléctricos.

Tabla 2.2.- Temperatura en °C de los materiales más usuales de conductores

Temperatura máxima	Características
234.5 °C	Para cobre recocido estirado en frío con 100% de conductividad, según IACS (Ver terminología).
241 °C	Para cobre semiduro estirado en frío con 97.3 % de conductividad, según IACS.
228 °C	Para aluminio estirado en frío con 61 % de conductividad, según IACS.

De la Figura 2.6 se deduce que

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T_2 + T}{T_1 + T} \quad \dots \quad 2.11$$

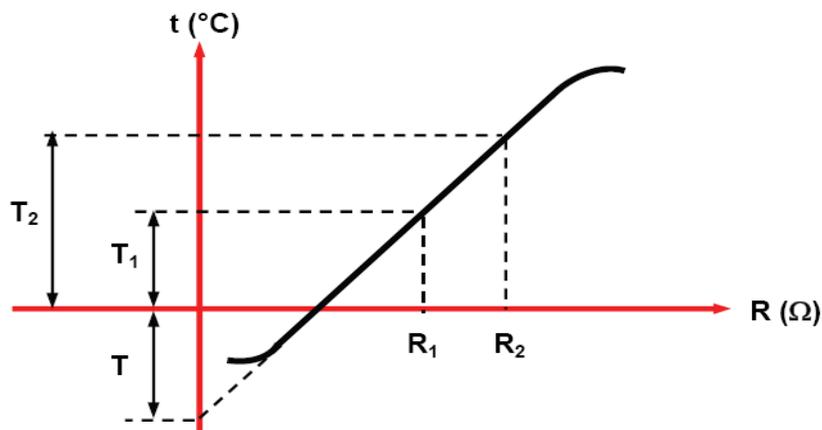


Figura 2.6.- Variación de la resistencia debido al cambio de temperatura

α Se calcula de la siguiente manera

$$\alpha = \frac{1}{234.5} = 0.00427 \text{ a } 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \dots \text{ 2.12}$$

Por lo tanto

$$\alpha = \frac{1}{234.5 + X \text{ } [^\circ\text{C}]} = \alpha \text{ } 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \dots \text{ 2.13}$$

El factor de corrección se obtiene de acuerdo con el porcentaje de conductividad de cada material, en este caso tomaremos en cuenta los siguientes porcentajes:

Para cobre de 100% de conductividad se tiene:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{234.5 + 20}{234.5 + T_2} = \frac{254.5}{234.5 + T_2} \quad \dots \text{ 2.14}$$

Para aluminio de 61% de conductividad se tiene:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{228 + 20}{228 + T_2} = \frac{248}{228 + T_2} \quad \dots \text{ 2.15}$$

Donde:

R_1 es la resistencia a 20 °C.

R_2 es la resistencia medida a la temperatura de prueba.

T_2 es la temperatura de prueba.

A continuación en la Tabla 2.3 se presentan los factores de corrección calculados a partir de las ecuaciones 2.14 y 2.15 para el cobre (100%) y el aluminio (61%) respectivamente.

Tabla 2.3.- Factores de corrección por temperatura para cálculo de resistencias de conductores eléctricos de cobre y aluminio.

Temperatura del conductor	Factor de corrección 20 °C	
	Cobre	Aluminio
0	1.085	1.088
5	1.062	1.064
10	1.04	1.042
15	1.02	1.02
20	1	1
25	0.98	0.98
30	0.962	0.961
35	0.944	0.943
40	0.927	0.925
45	0.91	0.908
50	0.894	0.892
55	0.879	0.876
60	0.869	0.861
65	0.85	0.846
70	0.836	0.832
75	0.822	0.818
80	0.809	0.805
85	0.796	0.792
90	0.784	0.78

2.2.2.- Resistencia del conductor por corriente alterna.

Para la determinación de la resistencia del conductor por corriente alterna deberá ser calculada a la temperatura de operación del conductor y tomar en cuenta los factores por efecto piel y proximidad.

Además, la resistencia en corriente alterna está en función de varios factores entre ellos el valor de la resistencia a la corriente continua, la frecuencia, el diámetro y la naturaleza del metal conductor; así como, la distancia entre ejes de los mismos, etc.

La obtención de este parámetro, se calcula con base al procedimiento que se muestra más adelante; sin embargo, primero se deben obtener los factores (y_s y y_p) a partir de la aplicación de las ecuaciones mostradas en seguida.

La resistencia que tiene un conductor en corriente alterna se calcula de la siguiente manera:

$$R_{ca} = R_{cd}(1 + y_s + y_p) \quad \dots \quad 2.16$$

Donde

R_{ca} es la resistencia por corriente alterna

R_{cd} es la resistencia por corriente directa

y_s es el factor debido al efecto piel

y_p es el factor debido al efecto de proximidad

2.2.3.- Efecto superficial o piel.

Se considera que el efecto superficial o piel da como resultado el aumento de resistencia del conductor debido a que la densidad de corriente es mayor en la superficie del conductor que en el centro.

El efecto piel se presenta en la transmisión de corriente alterna, entre más alta es la tensión es más visible este efecto, la corriente no se transmite en toda el área de la sección transversal del conductor, sino que la mayor parte se hace por la periferia.

Para evitar la pérdida del material conductor en los conductores de muy alta tensión se hacen huecos [Ver Figura 2.7], ya que por el centro no conduce corriente, o son muy bajas casi despreciables.



Figura 2.7.- Por eso el ACSR, el alma de acero no es para transmitir corriente, sino para mejorar las propiedades mecánicas del conductor al que está expuesto.

En un conductor, la circulación de una corriente se distribuye en la superficie de su sección de acuerdo a la frecuencia. En corriente continua o alterna de muy baja frecuencia, toda la sección conduce. A medida que la frecuencia aumenta, la circulación sólo se produce por las zonas exteriores del conductor. A frecuencias muy altas, sólo conduce la superficie exterior [Ver Figura 2.8]

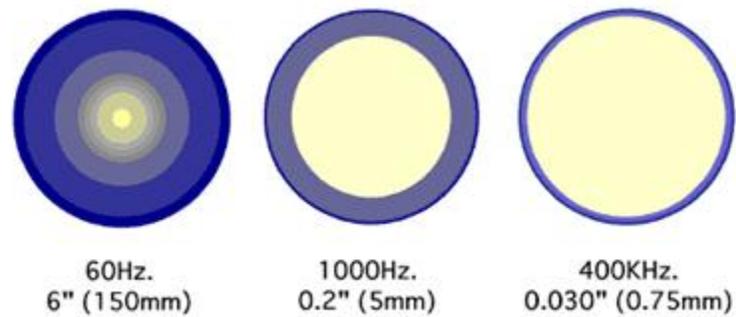


Figura 2.8.- Manifestación del efecto piel a distintas frecuencias y diámetros

El factor del efecto piel se puede determinar en base a la ecuación 2.17

$$y_s = \frac{X_S^4}{192 + 0.8X_S^4} \quad \dots \quad 2.17$$

Para fines prácticos X_S^2 se define por medio de la siguiente expresión

$$X_S^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-4} k_S \quad \dots \quad 2.18$$

f es la frecuencia del sistema en Hz.

R' es la resistencia del conductor por corriente directa corregida a la temperatura de operación, Ω/km .

k_S es el factor correspondiente a la forma del conductor.

2.2.4.- Efecto de proximidad.

El flujo de corriente alterna a través del conductor cuando se encuentra cercano a otro, que conduce corriente de iguales características pero en sentido contrario,

provoca una distribución no uniforme de la densidad de corriente y un aumento de la resistencia efectiva [Ver Figura 2.9]

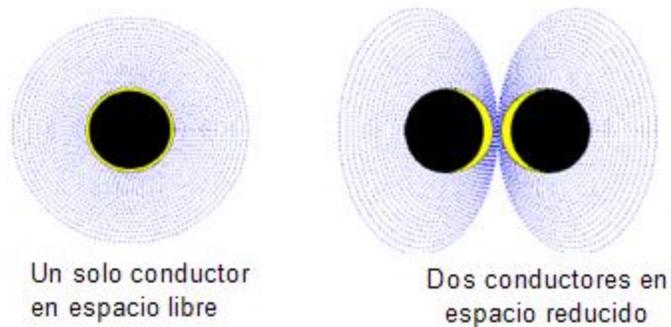


Figura 2.9.- Efecto de proximidad, flujo de corriente mostrado en amarillo.

Para el cálculo de dicha resistencia es necesario contemplar el factor (y_p) que se determina a partir de la siguiente expresión:

$$y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} + 0.27} \right] \quad \dots 2.19$$

d_c = es el diámetro del conductor cm.

s = es la distancia entre ejes de los conductores cm.

Para fines prácticos X_p^2 es:

$$X_p^2 = \frac{8\pi f}{R} \times 10^{-4} k_p \quad \dots 2.20$$

La Tabla 2.4 contiene los valores de k_s y k_p según la forma del cable.

Tabla 2.4.- Valores de K_s y K_p para calcular el efecto piel y el efecto de proximidad.

Forma del conductor	K_s	K_p
Redondo normal	1	1
Redondo compacto	1	1
Segmental	0.435	0.37

2.2.5.- Cálculo de la resistencia en corriente alterna por tablas.

El cálculo de la resistencia en corriente alterna se puede realizar, dando como resultado valores aproximados a los calculados con el procedimiento antes desarrollado, con ayuda de las tablas que se muestran en seguida del procedimiento para dicho cálculo.

Puntos para llevar a cabo el cálculo de la resistencia en corriente alterna por tablas:

-  Seleccionar el valor de la resistencia por corriente directa a una temperatura de 20 °C, (Tabla 2.5)
-  Realizar la división entre el factor correspondiente a la Tabla 2.6
-  Aproximar los efectos de proximidad y superficial multiplicando por el valor de la Tabla 2.7

Tablas utilizadas en el cálculo de resistencia en corriente alterna por tablas.

Tabla 2.5.- Resistencia a la corriente directa a 20 °C en conductores de cobre con cableado concéntrico normal, comprimido y compacto

mm^2	[AWG] [kcmil]	Área de la sección transversal	Resistencia eléctrica nominal a la c.d. (20 °C, Cu suave) Ω/km
	8	8.37	2.1
	6	13.3	1.322
	5	16.77	1.05
	4	21.15	0.832
	3	26.7	0.66
	2	33.6	0.523
35		34.89	0.504
	1	42.41	0.415
50		48.3	0.364
	1/0	53.5	0.329
	2/0	67.43	0.261
70		69	0.255
	3/0	85	0.207
	4/0	107.21	0.164
	250	126.7	0.139
150	300	152.01	0.116
	350	177.34	0.0992
	400	202.7	0.0867
240		242.5	0.0726
	500	253.4	0.0694
	600	304.02	0.0578
	700	354.7	0.0496
	750	380.02	0.0463
	800	405.36	0.0434
	1000	506.7	0.0347

Tabla 2.6.- Factores de corrección por temperatura para el cálculo de resistencias de conductores eléctricos de cobre y aluminio

Temperatura del conductor en °C	Factor de corrección a 20 °C	
	Cobre	Aluminio
0	1.085	1.088
5	1.062	1.064
10	1.04	1.042
15	1.02	1.02
20	1	1
25	0.98	0.98
30	0.962	0.961
35	0.944	0.943
40	0.927	0.925
45	0.91	0.908
50	0.894	0.892
55	0.879	0.876
60	0.869	0.861
65	0.85	0.846
70	0.836	0.832
75	0.822	0.818
80	0.809	0.805
85	0.796	0.792
90	0.784	0.78

Tabla 2.7.- Razón de resistencias, c.a./c.d. para conductores de cobre y aluminio a una frecuencia de 60 Hz. Cableado concéntrico normal.

Calibre del conductor AWG o kcmil	Para cables con cubierta no metálica, (Véase nota 1)		Para cables con cubierta metálica, (Véase nota 2)	
	1		2	
mm ²	Cobre	Aluminio	Cobre	Aluminio
3 y menores	1	1	1	1
2	1	1	1.01	1
1	1	1	1.01	1
1/0	1.001	1	1.02	1
2/0	1.001	1.001	1.03	1
3/0	1.002	1.001	1.04	1.01
4/0	1.004	1.001	1.05	1.01
250	1.005	1.002	1.06	1.02
300	1.006	1.003	1.07	1.02
350	1.009	1.004	1.08	1.03
400	1.011	1.005	1.1	1.04
500	1.018	1.007	1.13	1.06
600	1.025	1.01	1.16	1.08
750	1.039	1.015	1.21	1.11
1000	1.067	1.026		1.19
1250	1.102	1.04		1.27
1500	1.142	1.058		1.36
1750	1.185	1.079		1.46
2000	1.233	1.1		1.56
2500	1.326			

2.3.- Cálculo de pérdidas en cables subterráneos.

2.3.1.- Pérdidas en pantallas o cubiertas metálicas.

El parámetro q_s se define de la siguiente forma; como la razón de la suma de las pérdidas en el conductor y la pantalla entre las pérdidas en el conductor.

$$q_s = \frac{w_c + w_p}{w_c} = 1 + \frac{w_p}{w_c} = 1 + \lambda_p \quad \dots 2.21$$

λ_p es la razón de pérdidas, o calor generado, en la pantalla entre las pérdidas del conductor, sin unidades.

w_c es el calor generado en el conductor por unidad de longitud, en W/m.

w_p es el calor generado en la pantalla por unidad de longitud, en W/m.

El valor de esta variable está conformado por dos partes fundamentales:

La primera es debida a las pérdidas producidas por corrientes circulantes λ_p' .

La segunda es debida a las pérdidas producidas por corrientes de Eddy λ_p'' .

Finalmente

$$\lambda_p = \lambda_p' + \lambda_p'' \quad \dots 2.22$$

Para cables con pantallas metálicas constituidas de alambres no existen pérdidas por corrientes tipo Eddy; estas sólo se presentan en pantallas que cubren toda la circunferencia del cable.

La razón de pérdidas en la pantalla por corrientes circulantes (λ_p) se calcula de acuerdo a las siguientes formas de instalar los cables subterráneos:

- 👉 Cables monofásicos en formación triangular equidistante o sistema de dos cables (bifásico).
- 👉 Cables monofásicos en formación plana equidistante.

2.3.1.1- Cables monofásicos en formación triangular equidistante o sistema de dos cables (bifásico), [Ver Figura 2.10].

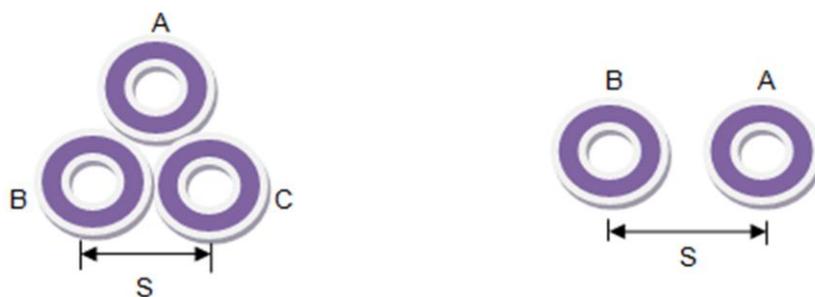


Figura 3.10.- Formación triangular o equidistante

Para este caso tenemos que por simetría λ_p' es igual para todas las fases A, B y C

$$\lambda_p' = \frac{R_p}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_p}{X_m}\right)^2} \quad \dots \text{2.23}$$

Donde

R es la resistencia del conductor en corriente alterna a la temperatura máxima de operación del conductor, en ohm/km. Para el cálculo de esta resistencia, hay que dividir este valor entre 1000 para pasarlo a ohm/m.

R_p es la resistencia eléctrica de la pantalla o cubierta metálica, en ohm/km. Para el cálculo, hay que dividir este valor entre 1000 para pasarlo a ohm/m.

X_m es la reactancia inductiva mutua de las pantallas y los conductores, en ohm/km. Para el cálculo hay que dividir este valor entre 1000 para pasarlo a ohm/m.

Calculo de R_p

R_p Es la resistencia de la pantalla a la temperatura de operación.

Pantalla de alambres:

$$R_p = \rho \frac{1.07}{0.7854 \times n \times d^2} \frac{\Omega}{Km} \dots 2.24$$

Tubular de plomo:

$$R_p = \frac{\rho}{\pi \times d_m \times t} \frac{\Omega}{Km} \dots 2.25$$

Pantalla de cintas de cobre traslapadas:

$$R_p = \rho \frac{1.02 \times K}{\pi \times d_m \times t} \frac{\Omega}{Km} \dots 2.26$$

Donde

d_m es el diámetro medio de la pantalla o forro metálico en mm.

d es el diámetro de los alambres de la pantalla en mm.

t es el espesor de la pantalla o forro metálico en mm (aproximadamente 0.12 mm para cintas de cobre).

n es el número de alambres.

K es el factor para incrementar la resistencia debido al contacto en el traslape ($K=1$ para cables nuevos; $K=2$ para cables que han estado en servicio).

ρ es la resistividad eléctrica del material de la pantalla metálica a su temperatura de operación en ohm-mm²/km:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha(t - 20)) \quad \dots 2.27$$

Donde

ρ_0 es la resistividad eléctrica del material de la pantalla metálica a 20 °C.

α es el coeficiente térmico de resistividad eléctrica del material de la pantalla metálica a 20 °C.

t es la temperatura de operación de la pantalla metálica.

Las Tablas 2.8 y 2.9 ayudan en los cálculos anteriores:

Tabla 2.8.- Resistividad eléctrica y coeficiente térmico de resistividad eléctrica a 20 °C

Material	Resistividad eléctrica a 20 °C	Coeficiente térmico de resistividad eléctrica a 20 °C
	ohm-mm ² /Km	1/°C
Aluminio	28.264	0.00403
Cobre suave	17.241	0.00393
Plomo	221	0.0041

Tabla 2.9.- Temperatura aproximada de la pantalla en °C, en función de la temperatura del conductor

Voltaje de fase a fase del cable	Temperatura aproximada de la pantalla en °C, en función de la temperatura del conductor						
	95 °C	90 °C	85 °C	80 °C	75 °C	70 °C	65 °C
kV	95 °C	90 °C	85 °C	80 °C	75 °C	70 °C	65 °C
5	90	85	80	75	70	65	60
15	90	85	80	75	70	65	60
25	90	85	80	75	70	65	60
35	85	80	75	70	65	60	55
46	85	80	75	70	65	60	55
69	80	75	70	65	60	55	50

Calculo de X_m :

$$X_m = 2 \Pi f M \quad \dots 2.28$$

M Es la inductancia mutua entre conductor y pantalla o cubierta metálica.

$$X_m = 2 \Pi f \left[2 \times 10^{-4} \ln \frac{S}{r_o} \right] = 0.0754 \ln \frac{S}{r_o} \quad \text{en } \frac{\text{ohm}}{\text{km}} \quad \dots 2.29$$

f es la frecuencia en c/s (ciclos por segundos)

S es la distancia entre centros de los cables en cm

r_o es el radio medio de la pantalla en cm

2.3.1.2.- Cables monoconductores en formación plana equidistante. [ver Figura 2.11].

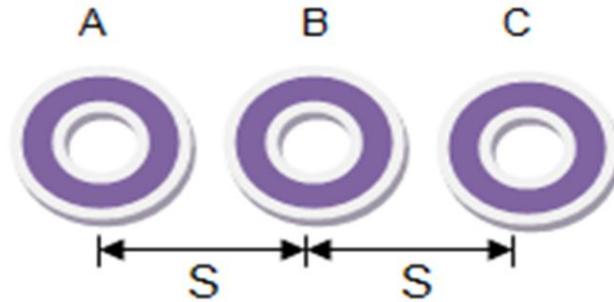


Figura 2.11.- Formación plana equidistante

(S Es la separación entre centros de cables A, B y C son las fases)

Para este caso tenemos que $\lambda_{p'}$ es diferente para cada fase y se calcula con las siguientes fórmulas:

Fase A

$$\lambda_{pA'} = \frac{R_p}{R} \left[\frac{(P^2 + 3Q^2) + 2\sqrt{3}(P - Q) + 4}{4(P^2 + 1)(Q^2 + 1)} \right] \quad \dots 2.30$$

Fase B

$$\lambda_{pB'} = \frac{R_p}{R} \left[\frac{1}{(Q^2 + 1)} \right] \quad \dots 2.31$$

Fase C

$$\lambda_{pc'} = \frac{R_p}{R} \left[\frac{(P^2 + 3Q^2) - 2\sqrt{3}(P - Q) + 4}{4(P^2 + 1)(Q^2 + 1)} \right] \quad \dots 2.32$$

Donde

$$P = \frac{Rp}{y} \quad \dots 2.33$$

$$Y = X_m + a \quad \dots 2.34$$

$$Q = \frac{Rp}{z} \quad \dots 2.35$$

$$Z = X_m - \frac{a}{3} \quad \dots 2.36$$

$$a = 2\pi f 2 \times 10^{-7} \ln(2) \quad \dots 2.37$$

f Es la frecuencia del sistema 60 Hz.

Los demás términos se indicaron en el apartado de cables monoconductores en formación triangular equidistante o sistema de dos cables (bifásico).

2.3.1.3.- Cables monoconductores con las pantallas aterrizadas en un solo punto.

En el caso de contar con cables con cubiertas o pantallas metálicas que cubren completamente la circunferencia del cable, existen pérdidas por corrientes Eddy. Cuando las pantallas tienen éstas características y se aterrizan en un solo punto, las pérdidas por corrientes Eddy se calculan por medio de la siguiente ecuación.

Cabe mencionar que para cables con pantallas metálicas de alambre no existe esta clase de pérdidas.

$$\lambda_p'' = \frac{3R_p}{R} \frac{\left(\frac{D_{pm}}{2S}\right)^2 \left[1 + \frac{5}{12} \left(\frac{D_{pm}}{2S}\right)^2\right]}{\left[\left(\frac{1.58 \times 10^6 R_p}{f}\right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{2S}{D_{pm}}\right)\right]} \quad \dots 2.38$$

Donde

R_p es la resistencia eléctrica de la pantalla o cubierta metálica, en ohm/km.

Para el cálculo hay que dividir este valor entre 1000 para pasarlo a ohm/m.

R es la resistencia del conductor en corriente alterna a la temperatura máxima de operación del conductor, en ohm/m. Para el cálculo hay que dividir este valor entre 1000 para pasarlo a ohm/m.

f es la frecuencia del sistema 60 Hz.

S es la separación entre centros de cables, en mm.

D_{pm} es el diámetro medio de la cubierta o pantalla metálica, en mm.

$$D_{pm} = \frac{D_p + D_{pi}}{2} \quad \dots 2.39$$

Donde

D_p es el diámetro externo de la cubierta o pantalla metálica, en mm.

D_{pi} es el diámetro interno de la cubierta o pantalla metálica, en mm

2.3.1.4.- Cables monoconductores con las pantallas aterrizadas en dos o más puntos.

Cuando se instalan cables con las características mencionadas en el punto anterior, pero con sus pantallas aterrizadas en dos o más puntos se puede aplicar la siguiente ecuación.

$$\lambda_p'' = \frac{3R_p}{R} \frac{\left(\frac{D_{pm}}{2S}\right)^2 \left[1 + \frac{5}{12} \left(\frac{D_{pm}}{2S}\right)^2\right]}{\left[\left(\frac{1.58 \times 10^6 R_p}{f}\right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{2S}{D_{pm}}\right)\right]} \frac{R_p^2}{(R_p^2 + X_m^2)} \quad \dots 2.40$$

Donde los términos significan lo mismo que en las ecuaciones del caso anterior.

2.3.2.- Pérdidas en los ductos metálicos

Expresando q_e como la razón de la suma de las pérdidas en el conductor, la pantalla metálica y el ducto entre las pérdidas en el conductor queda de la siguiente manera:

$$q_e = \frac{w_c + w_p + w_e}{w_c} = 1 + \frac{w_p}{w_c} + \frac{w_e}{w_c} = 1 + \lambda_p + \lambda_e \quad \dots 2.41$$

λ_p es la razón de pérdidas, o calor generado, en la pantalla entre las pérdidas del conductor, sin unidades.

λ_e es la razón de pérdidas, o calor generado, en el ducto metálico entre las pérdidas del conductor, sin unidades.

La razón de pérdidas en el ducto metálico entre las pérdidas del conductor λ_e se calcula dependiendo del agrupamiento de los cables y del tipo de ducto.

2.3.3.- Cálculo de pérdidas en el dieléctrico

Como sabemos aún no existe material aislante alguno que evite el paso de corriente a través de él al ser sometido a una diferencia de potencial determinada, ya que aunque sea mínima, la circulación de corriente a través del aislamiento se presenta trayendo como consecuencia pérdidas de energía.

Las pérdidas en el aislamiento de un cable de energía dependerán fundamentalmente de las características del material; como la permitividad del dieléctrico y el factor de potencia, las cuales se han relacionado con expresiones matemáticas que permiten cuantificar tales pérdidas.

La expresión para el cálculo de las pérdidas en el dieléctrico de un cable de energía es:

$$W_d = (2\pi f C E_0^2 \tan \delta) \times 10^{-3} \text{ en } kW/Km \quad \dots 2.42$$

Donde

f es la frecuencia en Hz

E_0 es la tensión al neutro, en V

$\tan \delta$ es el factor de pérdidas del aislamiento a la frecuencia y temperatura de operación por unidad [Ver Tabla 2.12]

C Es la capacitancia del cable.

Se calcula como

$$C = \frac{(0.0241)SIC}{\log_{10} \frac{d_a}{d_c}} \times 10^{-6} \quad \dots \text{ 2.43}$$

Donde

SIC es la constante inductiva específica del aislamiento [Ver Tabla 2.11]

d_a es el diámetro sobre el aislamiento, en mm.

d_c es el diámetro bajo el aislamiento, en mm.

Para poder determinar los parámetros de las ecuaciones 2.42 y 2.43 es necesario considerar la siguiente Tabla 2.10

Tabla 2.10.- Valores de la constante inductiva específica (SIC) y $\tan \delta$ para aislamientos empleados usualmente

Aislamiento	$\tan \delta$	SIC
EP	0.015	2.6
XLP	0.001	2.1
PAPEL IMPREGNADO	0.011	3.9

2.4.- Cálculo de resistencias térmicas.

Para la determinación de un cable subterráneo es muy importante tomar en cuenta las resistencias térmicas (**Ver apéndice H**), ya que éstas, de acuerdo al elemento que se estudie representan la capacidad que tiene el material de oponerse al flujo de calor, en este cálculo intervienen:

- a) Resistencia térmica del aislamiento.
- b) Resistencia térmica de la cubierta.

- c) Resistencia térmica del medio dentro del ducto.
- d) Resistencia térmica del ducto.
- e) Resistencia térmica externa de cables subterráneos.

2.4.1.- Resistencia térmica del aislamiento.

La resistencia térmica del aislamiento es aquella que aparta térmicamente la superficie a cubrir (conductor) reduciendo la transferencia de calor hacia el ambiente mediante el uso de materiales especiales de baja conductividad térmica.

Los principales objetivos por los que la resistencia térmica del aislamiento debe de ser la correcta son:

-  Minimizar las pérdidas de energía por transferencia de calor hacia o desde el ambiente.
-  Proteger al personal

La resistencia térmica del aislamiento para cables monopolares se define como:

$$R_i = \frac{\rho_i}{2\pi} \ln\left(\frac{d_i}{d}\right) \quad \dots 2.44$$

Donde

R_i es la resistencia térmica del aislamiento por unidad de longitud, en °C-m/W.

ρ_i es la resistividad térmica del aislamiento, en °C-m/W

d_i es el diámetro sobre el semiconductor externo, en mm

d es el diámetro sobre el conductor, en mm

En la Tabla 2.11 se incluyen valores de la resistividad térmica para algunos aislamientos.

Tabla 2.11.- Resistividad térmica de aislamientos

** Valor promedio, ya que la resistividad térmica del PVC varía de acuerdo con el compuesto*

AISLAMIENTO	ρ_i [°C-m/W]
Papel	6
Polietileno	3.5
XLPE	3.5
EP	5
PVC*	6

Como podemos ver para los aislamientos extruidos (Polietileno y XLPE) su resistividad térmica es la misma 350 °C cm/W.

Para el papel existen tres casos:

- 1.- Papel solidó que se fabrica a base de gas a media presión. 600 °C cm/W.
- 2.- Papel autónomo que se fabrica a base de agua 550 °C cm/W.
- 3.- Papel tipo tubo fabricado a base de LPP 600 °C cm /W.

2.4.2.- Resistencia térmica de la cubierta.

La resistencia térmica de la cubierta es aquella que se opone a la circulación del calor hacia el ducto.

La resistencia térmica de la cubierta se define como:

$$R_c = \frac{n_c' \rho_c}{2\pi} \ln\left(\frac{d_c}{d_0}\right) \quad \dots 2.45$$

Donde

R_c es la resistencia térmica de la cubierta, en °C-m/W.

ρ_c es la resistividad térmica de la cubierta, en °C-m/W.

d_c es el diámetro sobre cubierta, en mm

d_0 es el diámetro bajo cubierta, en mm

n_c' es el número de cables que transmiten energía bajo la cubierta.

En la Tabla 2.12 se incluyen valores de ρ_c para algunas cubiertas.

Tabla 2.12.- Resistividad térmica de cubiertas

** Valor promedio, ya que la resistividad térmica del PVC varía de acuerdo con el compuesto*

CUBIERTA	ρ_c (°C-m/W)
Policloropreno	5.5
Polietileno	3.5
PVC*	6

2.4.3.- Resistencia térmica del medio dentro del ducto.

La resistencia térmica del medio dentro del ducto es aquella que existe entre el cable y el ducto, dependen del material del cual está hecho el ducto y la temperatura que se tenga en esta sección (entre cable y ducto).

Se define como:

$$R_{cd} = \frac{n_d' U}{1 + 0.1(V + Y\theta_m)d_e} \quad \dots 2.46$$

Donde

R_{cd} es la resistencia térmica del medio entre cable y ducto, en °C-m/W.

U , V e Y Son las constantes que dependen del tipo de instalación (Tabla 2.13).

d_e es el diámetro del grupo de n' cables que están dentro del ducto, en mm.

n_d' es el número de cables que transmiten energía dentro del ducto.

θ_m es la temperatura del medio que se encuentra dentro del ducto, en °C. Un valor asumido debe usarse inicialmente y cuando sea necesario se debe repetir el cálculo con un valor modificado con base en los resultados.

Tabla 2.13.- Valores de U, V e Y.

Condiciones de instalación	U	V	Y
En ducto metálico	5.2	1.4	0.01
En ducto de fibra en aire	5.2	0.83	0.01
En ducto de fibra en concreto	5.2	0.91	0.01
Ductos en aire	5.2	1.2	0.01
Ductos en concreto	5.2	1.1	0.01

2.4.4.- Resistencia térmica del ducto.

La resistencia térmica del ducto es aquella que se opone al paso del calor al exterior del mismo.

El principal objetivo por lo que la resistencia térmica del ducto debe de ser la correcta es tener la temperatura más baja posible en toda la sección del ducto, solo para ductos no metálicos.

La formula se emplea como ya lo mencionado antes solo para ductos no metálicos ya que para ductos metálicos su resistencia se considera cero.

Se define como

$$R_d = \frac{\rho_d}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{ed}}{D_d}\right) \quad \dots 2.47$$

Donde:

R_d es la resistencia térmica del ducto, en °C-m/W

ρ_d es la resistividad térmica del ducto, en °C-m/W ver Tabla 2.15

D_d es el diámetro interno del ducto, en mm

D_{ed} es el diámetro externo del ducto, en mm

En la Tabla 2.14 se incluyen valores de ρ_d para algunos materiales.

Tabla 2.14.- Resistividad térmica de materiales empleados en ductos

MATERIAL	ρ_d [°C-m/W]
Concreto	1
Fibra	4.8
Asbesto	2
PVC	7
PE	3.5

Es importante mencionar que para la resistencia térmica del ducto, cuando este no es metálico, debe incluirse en la resistencia " R_{sc} " (resistencia térmica entre la pantalla metálica y el ducto por unidad de longitud, en °C-m/W)

2.4.5.- Resistencia térmica externa de cables subterráneos.

La resistencia térmica entre cualquier punto de la tierra que rodea a un cable enterrado y la tierra que está a temperatura ambiente se define como:

$$R_{pa} = \frac{\rho_g}{2\pi} \ln\left(\frac{d'}{d}\right) \quad \dots \quad 2.48$$

Donde

R_{pa} es la resistencia térmica entre cualquier punto "P" de la tierra que rodea a un cable enterrado y la tierra que está a temperatura ambiente, en °C-m/W

ρ_g es la resistividad térmica del terreno, en °C-m/W.

d' es la distancia de la imagen del cable al punto "P".

d es la distancia del centro del cable al punto "P".

Para determinar las distancias d' y d se puede observar el esquema de la Figura 2.12

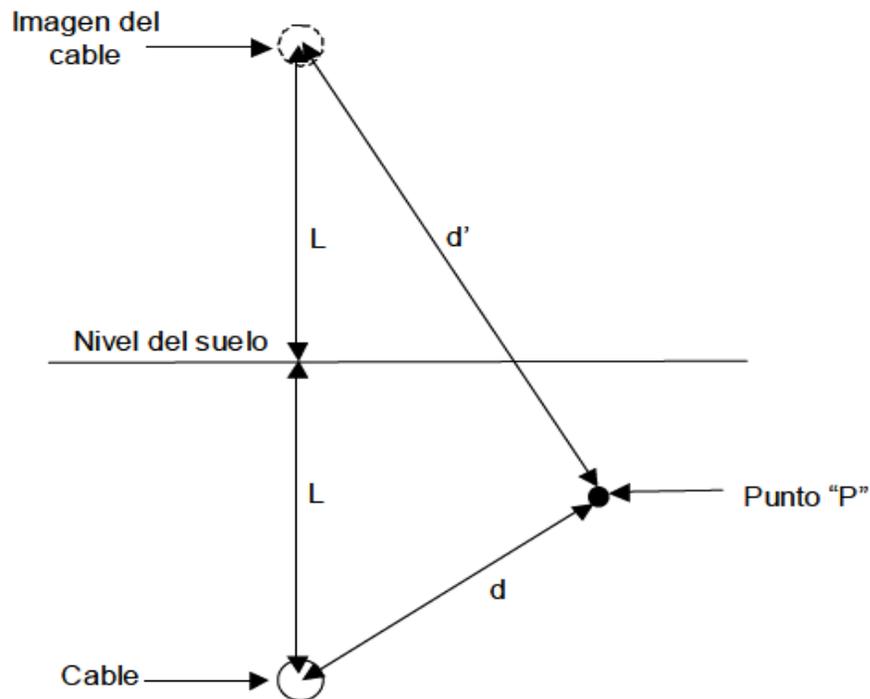


Figura 2.12.- Diagrama de cable subterráneo con su imagen

Donde

d es la distancia del centro del cable al punto "P".

d' es la distancia del centro de la imagen del cable al punto "P".

L es la profundidad de instalación del centro del cable.

Partiendo de la ecuación anterior (2.58) se desarrollan las siguientes ecuaciones aplicables para cables subterráneos en los siguientes casos.

2.4.6.1.- Ductos, o cables, o grupos de cables directamente enterrados.

En base a la ecuación 3.58 y considerando los parámetros mencionados enseguida; se puede calcular la resistencia térmica efectiva entre el ducto y el ambiente con la siguiente ecuación.

$$R_e' = \frac{\rho_g}{2\pi} n_e' \left[\ln \left(\frac{D_x}{D_e} \right) + F_p \ln \left[\left(\frac{4L}{D_x} \right) \right] \right] \quad \dots 2.49$$

Donde

R_e' es la resistencia térmica efectiva entre el ducto (o cable, o grupo de cables, cuando aplique) y el ambiente que considera el efecto de los ciclos diarios de calentamiento y el calentamiento mutuo de los cables en el sistema, en °C-m/W

ρ_g Es la resistividad térmica del terreno, en °C-m/W

n_e' es el número de cables que transmiten energía contenidos en el diámetro D_e

D_e es el diámetro donde comienza la porción de tierra del circuito térmico, en mm
Este diámetro puede ser el diámetro exterior del ducto; o en cables directamente enterrados, el diámetro exterior del cable.

L es la profundidad de instalación del cable bajo análisis, debajo de la superficie de la tierra, en mm

F_p es el factor de pérdidas, en fracción

D_x es el diámetro donde comienza la reducción de la resistencia exterior en un factor F_p , en mm Este diámetro se calcula con la siguiente ecuación

$$D_x = 1.02\sqrt{\alpha(lch)} \quad \dots \quad 2.50$$

Donde

α es la difusividad térmica de la tierra, en $\frac{mm^2}{hr}$. Se recomienda usar para un ciclo diario (24 horas) el valor de $1774 \frac{mm^2}{hr}$

lch es la longitud del ciclo, en horas.

Para ciclos diarios son 24 horas.

Tomando en cuenta estos valores, el valor recomendado queda:

$$D_x = 210.5 \text{ mm} \quad \dots \quad 2.51$$

Este valor de D_x es aplicable inclusive para diámetros de ductos que excedan de 210.5 mm, en cuyo caso el primer término entre paréntesis de la ecuación para calcular R_e' se hace negativo.

Para calcular R_e' , se usa la siguiente fórmula:

$$R_e' = \frac{\rho_g}{2\pi} n_e' \left[\ln\left(\frac{D_x}{D_e}\right) + \ln\left[\left(\frac{4L}{D_x}\right)\right] \right] \quad \dots \quad 2.52$$

Donde

R_e' es la resistencia térmica efectiva entre el ducto (o cable, o grupo de cables, cuando aplique) que considera el calentamiento mutuo de los cables en el sistema, en °C-m/W. En esta resistencia no se considera el efecto de los ciclos diarios de calentamiento, es decir, se considera el factor de pérdidas igual a la unidad, ya que las pérdidas en el dieléctrico son constantes y no dependen del ciclo de carga del cable.

Los demás términos significan lo mismo que en la ecuación para R_e' :

2.4.6.2.- Banco de ductos, o rellenos térmicos

Para el caso en el cual se tenga banco de ductos o rellenos térmicos se puede partir de la ecuación 2.58 para determinar la resistencia entre el ducto y el ambiente. Se deben considerar los parámetros que enseguida se mencionan para poder aplicar la siguiente ecuación.

$$R_e'' = \frac{\rho_c}{2\pi} n_e'' \left[\ln \left(\frac{D_x}{D_e} \right) + F_p \ln \left[\left(\frac{4L}{D_x} \right) F \right] \right] + \frac{(\rho_g - \rho_c)}{2\pi} n_e'' N(F_p)(G_b) \quad \dots 2.53$$

Donde

R_e'' es la resistencia térmica efectiva entre el ducto (o cable, o grupo de cables, cuando aplique) y el ambiente que considera el efecto de los ciclos diarios de calentamiento y el calentamiento mutuo de los cables en el sistema, en °C-m/W.

ρ_c es la resistividad térmica del concreto o relleno térmico, en °C-m/W

ρ_g es la resistividad térmica del terreno, en °C-m/W

G_b es el factor geométrico del banco de concreto o relleno térmico. Este factor se

calcula con la siguiente fórmula:

$$G_b = \left(\frac{L_b + \sqrt{L_b^2 - r_b^2}}{r_b} \right) \quad \dots 2.54$$

L_b es la profundidad del centro del banco de ductos con respecto a la superficie de la tierra, en mm

r_b es el radio equivalente del banco de concreto o relleno térmico, en mm

Este radio se calcula con la siguiente fórmula:

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2} \quad \dots 2.55$$

R_{ed}' es la resistencia térmica efectiva entre el ducto (o cable, o grupo de cables, cuando aplique, que considera el calentamiento mutuo de los cables en el sistema, en °C-m/W). En esta resistencia no se considera el efecto de los ciclos diarios de calentamiento, es decir, se considera el factor de pérdidas igual a la unidad, ya que las pérdidas en el dieléctrico son constantes y no dependen del ciclo de carga del cable.

2.5.- Capacidad de conducción de corriente como parte de un criterio de la instalación de un sistema eléctrico

En este capítulo se ha mostrado la importancia que tiene el estudio de este tema (Ampacidad) para la implementación de un sistema eléctrico de distribución,

principalmente para el proyecto que se menciona en el objetivo del mismo capítulo. Esencialmente se presentaron los parámetros necesarios para realizar el estudio de capacidad de conducción así como la forma de obtenerlos y las consideraciones que deben hacerse para un cálculo correcto.

La manera de proceder para la aplicación de la teoría mostrada, iniciará tomando en cuenta la demanda eléctrica bajo la cual se encuentran sometidas las Subestaciones Generales 1, 2 y 4; teniendo en cuenta la información, se propone un cable de acuerdo a las tablas de capacidad de conducción, existentes en documentos regidos bajo las normas oficiales. Posteriormente y considerando las condiciones de instalación, se realizarán los cálculos para verificar que el conductor seleccionado sea el adecuado para proporcionar un servicio seguro y eficiente. En caso contrario se procede a revisar la información y se volverá a seleccionar un conductor de dimensiones mayores para volver a verificar la situación del cable (adecuado ó no adecuado para la implementación del sistema).



CAPÍTULO 3

CAIDA DE TENSIÓN



INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos primordiales al dimensionar los conductores que forman parte de una instalación eléctrica, luego del cumplimiento de la capacidad de conducción de corriente, es el porcentaje de caída de tensión.

La caída de tensión en el conductor se origina debido a la resistencia eléctrica presente en el paso de corriente. Esta resistencia depende de la longitud del circuito, el material, el calibre y la temperatura de operación del conductor. El calibre seleccionado para un circuito eléctrico debe verificarse por la caída de tensión.

Al suministrar corriente a una carga por medio de un conductor, se experimenta una caída en la tensión y una disipación de energía en forma de calor, provocando pérdidas en el sistema eléctrico [Ver Figura 3.1]. Además es necesario conocer los límites en el porcentaje de caída de tensión que deben ser respetados a nivel normativo. NOM-001-SEDE-2005 [2].

Lámpara incandescente con la tensión al inicio de la línea



Lámpara incandescente con la tensión al final de la línea



Línea eléctrica



Figura 3.1.- Visualización de la caída de tensión

3.1.- Parámetros eléctricos básicos involucrados en la caída de tensión

Existen parámetros eléctricos básicos en cualquier circuito eléctrico, por lo cual se hace una breve referencia de ellos para entender mejor el contenido de este capítulo (Ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1.- Parámetros eléctricos básicos en un circuito eléctrico

Parámetro	Unidad	Formula	Instrumento de medición
Tension [V]	Volt [V]	$V = R \cdot I$	Vóltmetro
Corriente [I]	Amper [A]	$I = V/R$	Amperímetro
Resistencia [R]	Ohm [Ω]	$R = V/I$	Óhmetro
Potencia [P]	Watt [W]	$P = V \cdot I$	Wattmetro
		$P = R \cdot I^2$	

Donde

Tensión es la diferencia de potencial entre dos puntos en un circuito eléctrico.

Corriente es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material.

Resistencia es la oposición al flujo de corriente eléctrica.

Potencia es el trabajo efectuado en la unidad del tiempo

En este capítulo que se enfoca al análisis de caída de tensión, veremos más adelante que a partir de las ecuaciones mostradas en la Tabla 3.1 podemos implementar el cálculo de caída de tensión, apoyándose en las consideraciones que deben tomar en cuenta para garantizar la correcta selección de un cable eléctrico.

3.1.1.- Parámetros de corriente alterna

Como sabemos, la corriente alterna mantiene una diferencia de potencial constante, pero su polaridad varía con el tiempo, siendo así los parámetros más importantes los que a continuación se mencionan (Ver Figura 3.2).

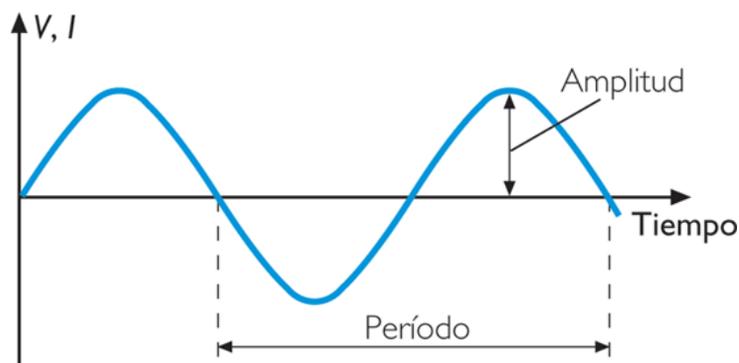


Figura 3.2.- Parámetros básicos de la corriente alterna

- 🍂 **Amplitud:** Es la altura máxima que alcanza la señal o valor de pico. Esta magnitud se mide en volts o en amperes, según se esté hablando de señal de tensión o intensidad de corriente eléctrica, respectivamente.
- 🍂 **Frecuencia:** Número de veces que la corriente alterna cambia de polaridad en 1 segundo. La unidad de medida es el Hertz Hz y se le designa con la letra f . De esta forma si tenemos una tensión de 127 V 60 Hz, significa que dicha tensión habrá de cambiar su polaridad 60 veces por segundo.

$$f = \frac{1}{T} \quad \dots 3.1$$

- 🍂 **Angulo de fase:** Es la fracción de ciclo transcurrido desde el inicio del mismo, su símbolo es la letra griega θ .

🍂 **Período:** El tiempo que demora cada valor de la onda de corriente alterna en repetirse o cumplir un ciclo completo, ya sea entre pico y pico, entre valle y valle o entre nodo y nodo, se conoce como “período”. El período se expresa en segundos y se representa con la letra T.

El período es el recíproco de la frecuencia y, matemáticamente, se representa por medio de la ecuación 3.2

$$T = \frac{1}{f} \quad \dots 3.2$$

3.2.- Ley de Ohm

En el capítulo anterior ya se ha hecho mención de manera general de la ley de Ohm (Ver Figura 3.3 y 3.4), pero con la importancia que tiene dicho concepto dentro del presente capítulo, es necesario volver a retomar de manera más particular algunos puntos.

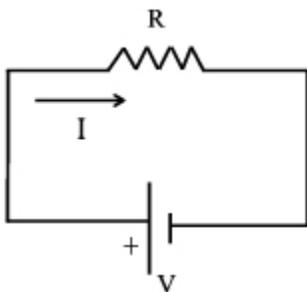


Figura 3.3.- Ley de ohm en un circuito eléctrico.

$$V = i \times R$$

↓
↓
↓
voltaje **corriente** **resistencia**

Figura 3.4.- Expresión matemática de la ley de ohm.

Definición: La Ley de Ohm afirma que la corriente que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la tensión e inversamente proporcional a la resistencia, siempre y cuando su temperatura se mantenga constante.

Esta ley la podemos generalizar en el caso de circuitos donde se encuentren relacionadas las reactancias inductivas y capacitivas con la resistencia como es el caso de las líneas de transmisión. Por lo cual tendremos que utilizar en este análisis, el concepto de impedancia.

3.3.- Concepto y parámetros de la impedancia

Impedancia

En un circuito formado por elementos lineales, sometido a una diferencia de potencial que es una función senoidal del tiempo de una frecuencia f , circula una corriente que a su vez también es una función senoidal del tiempo de la misma frecuencia f , cuya amplitud y ángulo de fase dependen de la diferencia de potencial aplicado, de la resistencia, la inductancia y la capacitancia del circuito así como de la frecuencia misma. {B-7}

Cuando las funciones senoidales del tiempo estas se representan en forma compleja permiten relacionar en forma sencilla la amplitud y el ángulo de fase de la tensión y la corriente mediante la impedancia del circuito. Esta relación se representa por la siguiente ecuación que prácticamente es la ley de ohm generalizada.

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{V}}{Z} \quad \dots 3.3$$

Para un circuito con resistencia, inductancia y capacitancia, que es el caso general; la impedancia, expresada esta en forma compleja, se representa por:

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = |Z| \angle \theta \quad \dots 3.4$$

Donde

$$\omega = 2 \pi f \quad \dots 3.5$$

El modulo de la impedancia es

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad \dots 3.6$$

Donde el argumento es

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad \dots 3.7$$

Tomaremos ahora los tres casos particulares más comunes para circuitos: resistivo, inductivo y capacitivo.

a) Circuito resistivo

El circuito de la Figura 3.5, representa un circuito ideal con una carga puramente resistiva, se tiene entonces de acuerdo a la segunda ley de ohm lo siguiente:

$$v = Ri \quad \dots 3.8$$

Siendo R la resistencia del circuito e i la corriente que circula a través del circuito resistivo.

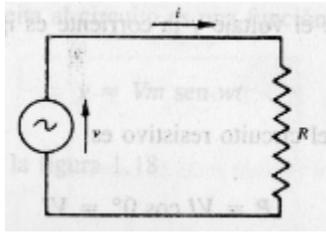


Figura 3.5.- Circuito resistivo.

Si se le aplica al circuito tensión alterna sinusoidal

$$v = V_m \text{ sen } \omega t \quad \dots 3.9$$

$$i = \frac{v}{R} = \frac{V_m}{R} \text{ sen } \omega t \quad \dots 3.10$$

Donde

V_m es el valor máximo de la tensión

Es decir; la corriente que circula por el circuito resistivo es una función senoidal del tiempo de la misma frecuencia y está en fase con la onda de tensión, siendo así tenemos

$$i = I_m \text{ sen } \omega t \quad \dots 3.11$$

Donde

I_m es el valor máximo de la corriente eléctrica

De las ecuaciones 3.10 y 3.11 tenemos:

$$\frac{V_m}{R} = I_m \quad \dots 3.12$$

$$\frac{V_m}{I_m} = \frac{V}{I} = R \quad \dots 3.13$$

Donde

V es el valor eficaz de la tensión.

I es el valor eficaz de la corriente.

La impedancia en este caso de un circuito puramente resistivo expresada en forma compleja es:

$$Z = R + j0 = R \angle 0^\circ \quad \dots 3.14$$

Donde la relación entre fasores de corriente y tensión está determinada por:

$$I \angle \theta_I = \frac{V \angle \theta_V}{R \angle 0^\circ} \quad \dots 3.15$$

Donde

θ_V es el ángulo de fase de la tensión.

θ_I es el ángulo de fase de la corriente.

En el caso de circuito resistivo la corriente está en fase con la tensión aplicada.

Como el ángulo de fase θ entre la tensión y la corriente es cero, el factor de potencia $\cos \theta$ es igual a la unidad.

Por lo tanto la potencia real absorbida por el circuito resistivo se determina por:

$$P = VI \cos 0^\circ = VI \quad \dots 3.16$$

Sustituyendo en la ecuación 3.16

$$V = RI \quad \dots 3.17$$

$$P = RI^2 \quad \dots 3.18$$

La potencia reactiva Q absorbida por el circuito resistivo es igual a cero.

$$Q = VI \operatorname{sen} 0^\circ = 0 \quad \dots 3.19$$

b) Circuito inductivo

En la Figura 3.6 se representa un circuito ideal con una fuente de tensión que alimenta una inductancia pura.

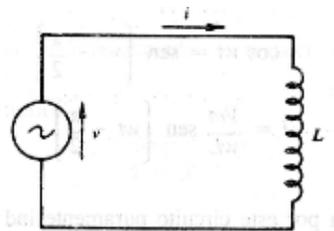


Figura 3.6.- Circuito inductivo.

La corriente i que circula por la inductancia genera un campo magnético; si la corriente es una función del tiempo a su vez el campo magnético lo será. Este campo variable induce en el circuito una diferencia de potencial e , que se opone a la diferencia de potencial que excita al circuito.

$$e = -L \frac{di}{dt} \quad \dots 3.20$$

Donde

L es una constante de proporcionalidad llamada coeficiente de autoinducción o inductancia.

Si esta diferencia de potencial e que excita al circuito es una función senoidal del tiempo.

$$v = V_m \operatorname{sen} wt \quad \dots 3.21$$

Y se comprueba en el circuito de la Figura 3.6

$$V_m \operatorname{sen} wt = -e = L \frac{di}{dt} \quad \dots 3.22$$

$$di = \frac{V_m}{L} \operatorname{sen} wt \, dt \quad \dots 3.23$$

Integrando tenemos que:

$$i = \frac{V_m}{L} \int \operatorname{sen} wt \, dt \quad \dots 3.24$$

$$i = \frac{V_m}{\omega L} (-\cos wt) + K \quad \dots 3.25$$

Si suponemos que $k = 0$, lo que significa considerar únicamente el régimen permanente del circuito.

Tomando en cuenta lo siguiente:

$$-\cos wt = \operatorname{sen} \left(wt - \frac{\pi}{2} \right) \quad \dots 3.26$$

$$i = \frac{V_m}{\omega L} \operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad \dots \quad 3.27$$

Es decir, la corriente que circula por este circuito puramente inductivo es una corriente alterna senoidal, atrasada 90° con respecto a la tensión aplicada.

Puede, por tanto, escribirse

$$i = I_m \operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad \dots \quad 3.28$$

De las ecuaciones 3.27 y 3.28

$$\frac{V_m}{\omega L} = I_m \quad \dots \quad 3.29$$

$$\frac{V_m}{I_m} = \frac{V}{I} = \omega L = X_L \quad \dots \quad 3.30$$

Se le llama reactancia inductiva a la siguiente expresión.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad \dots \quad 3.31$$

La impedancia en el caso de un circuito puramente inductivo, expresada en forma compleja es por tanto:

$$Z = 0 + jX_L = X_L \angle 90^\circ \quad \dots \quad 3.32$$

Donde la relación entre los fasores de la tensión y de la corriente es:

$$I \angle \theta_I = \frac{V \angle \theta_v}{X_L \angle 90^\circ} = \left(\frac{V}{X_L}\right) \angle \theta_v - 90^\circ \quad \dots 3.33$$

Por lo tanto en el caso del circuito inductivo la corriente está atrasada 90° con respecto a la tensión aplicada.

La potencia real absorbida por el circuito inductivo es igual a cero.

$$P = VI \cos 90^\circ = 0 \quad \dots 3.34$$

El valor absoluto de la potencia reactiva absorbida por el circuito inductivo es:

$$|Q| = VI \sin 90^\circ = VI \quad \dots 3.35$$

c) Circuito capacitivo

El circuito de la Figura 3.7 representa un circuito ideal constituido por una fuente de voltaje que alimenta un capacitor.

Si se aplica entre las dos placas del capacitor una diferencia de potencial v , el condensador adquirirá una carga eléctrica q que es proporcional a la diferencia de potencial aplicada y a una constante de proporcionalidad llamada capacitancia.

La capacitancia depende de las dimensiones del capacitor así como de la naturaleza del dieléctrico.

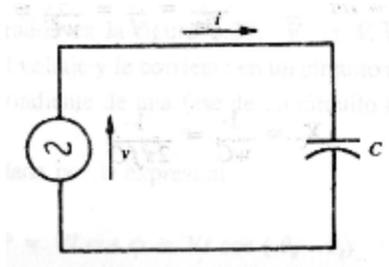


Figura 3.7.- Circuito capacitivo

Si la diferencia de potencial aplicada es una tensión alterna senoidal

$$q = Cv = CV_m \text{ sen } wt \quad \dots 3.36$$

$$\frac{dq}{dt} = wCV_m \text{ cos } wt \quad \dots 3.37$$

Donde

q es la carga eléctrica

C es la capacitancia

Como la primera derivada de la carga eléctrica con respecto al tiempo es igual a la intensidad de corriente.

$$\frac{dq}{dt} = i \quad \dots 3.38$$

Teniendo en cuenta lo siguiente:

$$\text{cos } wt = \text{sen} \left(wt + \frac{\pi}{2} \right) \quad \dots 3.39$$

Puede expresarse como:

$$i = \frac{V_m}{\frac{1}{wC}} = \text{sen} \left(wt + \frac{\pi}{2} \right) \quad \dots 3.40$$

Por lo cual, la corriente i es de igual manera una función senoidal del tiempo y esta adelantada 90° con respecto a la tensión aplicada. Puede expresarse como:

$$i = I_m \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \dots 3.41$$

De las ecuaciones 3.40 y 3.41 se tiene:

$$\frac{V_m}{\frac{1}{\omega C}} = I_m \dots 3.42$$

$$\frac{V_m}{I_m} = \frac{V}{I} = \frac{1}{\omega C} = X_c \dots 3.43$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \dots 3.44$$

Se llama reactancia capacitiva.

La impedancia expresada en forma compleja, en el caso de un circuito puramente capacitivo queda como:

$$Z = 0 - jX_c = X_c \angle -90^\circ \dots 3.45$$

La relación entre los fasores de voltaje y corriente queda como:

$$I \angle \theta_I = \frac{V \angle \theta_v}{X_c \angle -90^\circ} = \left(\frac{V}{X_c}\right) \angle \theta_v + 90^\circ \quad \dots 3.46$$

Donde

θ_v es el ángulo de fase de la tensión.

θ_I es el ángulo de fase de la corriente.

Por lo tanto en el caso de un circuito capacitivo la corriente esta adelantada 90° con respecto a la tensión aplicada.

La potencia real absorbida por el circuito capacitivo es cero.

$$P = VI \cos 90^\circ = 0 \quad \dots 3.47$$

Obteniendo el valor absoluto de la potencia reactiva queda:

$$|Q| = VI \sin 90^\circ = VI \quad \dots 3.48$$

Sustituyendo en la ecuación 3.48

$$V = X_c I \quad \dots 3.49$$

$$|Q| = X_c I^2 \quad \dots 3.50$$

3.4.- Impedancia de las líneas de distribución en media tensión

La impedancia es la resistencia total al paso de la corriente eléctrica alterna, formada por sus tres componentes principales:

- 👉 Resistencia
- 👉 Reactancia inductiva
- 👉 Reactancia capacitiva

La impedancia puede representarse como la suma de una parte real y una parte imaginaria.

$$Z = (R + j) \quad \dots 3.51$$

Donde

R es la parte resistiva o real de la impedancia

X es la parte reactiva o reactancia de la impedancia

La impedancia en una línea de distribución se puede representar de la siguiente forma (Ver Figura 3.5).

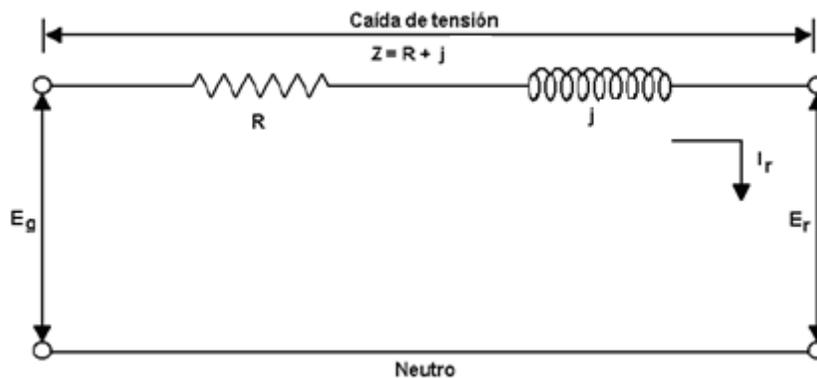


Figura 3.5.- Circuito que representa la impedancia de un sistema

Donde

E_g es la tensión de envío

E_r es la tensión recibida

I_r es la corriente

R es la resistencia

X es la reactancia

Z es la impedancia

Debido a que las longitudes que poseen las líneas de distribución en media tensión son relativamente cortas, podemos analizarlas como tal; Por lo tanto, los efectos debidos a las corrientes capacitivas que afectan a los cables son prácticamente despreciables [3],[4]. Por lo cual la impedancia del cable va a estar compuesta por la resistencia y la reactancia inductiva.

Para tener un valor de impedancia correcto es necesario tomar en cuenta la longitud del circuito.

Por lo tanto

$$Z = (R + jX)l \quad \dots 3.52$$

Donde

l es la longitud del cable

Z es la impedancia

R es la parte real o resistiva

jX es la parte reactiva o reactancia

3.5.- Parámetros de una línea de distribución de energía eléctrica.

Los parámetros de una línea de distribución son:

-  La resistencia
-  La inductancia y reactancia inductiva
-  La capacitancia y reactancia capacitiva

Estas son magnitudes típicas de una línea de distribución, estos parámetros sirven para definir a la línea eléctricamente estableciendo así su comportamiento dentro de los sistemas eléctricos de potencia, por ejemplo para el cálculo de la caída de tensión donde se usan dichos parámetros.

3.5.1.- Resistencia eléctrica

Se denomina resistencia eléctrica a aquella propiedad que posee un material para oponerse a la circulación de corriente eléctrica por él. La expresión que define la resistencia de un conductor es:

$$R_{cd} = \frac{1.02 \rho L}{A} \quad \dots 3.53$$

Donde

R_{cd} es la resistencia de corriente directa en [ohm].

ρ es la resistividad volumétrica del material a una resistencia dada.

$1.02L$ es la longitud efectiva del conductor, resultante del proceso de fabricación.

[5]

A es el área de la sección transversal.

La ecuación 3.53 solamente es aplicable para corriente directa, ya que en corriente alterna existe el fenómeno llamado efecto piel, como se mencionó anteriormente, el efecto piel se presenta debido al nivel de frecuencia que se maneja en el sistema. Esto a su vez, tiende a producir densidades desiguales de corriente sobre la sección transversal en su conjunto, de manera que la densidad es mínima en el centro del conductor y máxima en la periferia del mismo.

Tal distribución de la densidad de la corriente produce un incremento en la resistencia efectiva y una disminución de la inductancia interna efectiva, la primera es de mayor importancia práctica que la segunda, por lo tanto, la resistencia en corriente alterna es mayor que en corriente directa. Las frecuencias a las cuales se transmiten potencia, el efecto piel presenta un efecto significativo en conductores largos.

El cálculo de resistencia alterna se obtiene de la formula 3.54 El desarrollo completo para la obtención de este parámetro puede verse de manera completa en el Capítulo 2, (Ver punto **2.2.2.- Resistencia del conductor por corriente alterna**).

$$R_{ca} = R_{cd}(1 + y_s + y_p) \quad \dots 3.54$$

Donde

R_{ca} es la resistencia por corriente alterna

R_{cd} es la resistencia por corriente directa

y_s es el factor debido al efecto piel

y_p es el factor debido al efecto de proximidad

3.5.2.- Reactancia inductiva e inductancia.

Reactancia inductiva (X_L)

La reactancia inductiva es aquella resistencia u oposición al paso del flujo de corriente alterna por un circuito eléctrico cerrado. Como se explica, en el capítulo anterior; esto se debe a la inducción que se genera en un conductor como resultado del flujo de corriente a través de él; esta corriente produce un campo magnético alrededor del conductor cuyas líneas de fuerza son concéntricas en el conductor.

El valor de la reactancia inductiva dependerá de la frecuencia del sistema y del valor de la inductancia total (inductiva propia y mutua) del cable, esta se define como

$$X_L = 2\pi fL \frac{\Omega}{km} \quad \dots 3.55$$

Donde

f es la frecuencia del sistema en Hz.

L es la inductancia total en H/km.

Inductancia

Cuando en un conductor eléctrico se le aplica una corriente variable en el tiempo, en este se presenta un flujo magnético que también es variable, el cual se enlaza con el o los conductores del circuito, por los que también circulan corrientes de naturaleza similar.

A la razón de la variación del flujo magnético, respecto a la variación de la corriente en el tiempo se le conoce como inductancia.

$$L = \frac{\text{VARIACION DEL FLUJO MAGNETICO EN EL TIEMPO}}{\text{VARIACION DE LA CORRIENTE EN EL TIEMPO}} \quad \dots \text{ 3.56}$$

La inductancia está compuesta de dos partes, una por la inductancia propia de un cable y otra por la inductancia mutua, debido a los cables que circundan al primer cable mencionado.

La inductancia propia y mutua se expresan de la siguiente forma para la obtención de la inductancia total (L):

$$L = Lp + Lm \quad \dots \text{ 3.57}$$

Donde

Lp es la inductancia propia del conductor.

Lm es la inductancia mutua.

Donde la inductancia propia del conductor solamente está en función de sus características. Debido a esto es necesario considerar el concepto de radio medio geométrico.

La inductancia mutua va a ser función de la separación de los cables así como de la disposición de los mismos; además también es importante considerar la construcción de los cables y tomar en cuenta si están provistos o no de pantallas o cubiertas metálicas y la conexión a tierra de las mismas.

Más adelante se muestran las formulas para obtener la inductancia total (L) aplicables a las distintas disposiciones de los cables en un sistema eléctrico; de manera que se consideren la inductancia propia y mutua.

3.5.2.1.- Radio medio geométrico

Matemáticamente se puede demostrar considerando un conductor imaginario que no es atravesado por el flujo magnético generado, afectando el radio (r) de la sección que conduce por una constante, obteniendo el radio de un conductor imaginario para el que todo el flujo es externo solamente, a este radio calculado se le conoce como radio medio geométrico del conductor (RMG) y la ecuación se puede expresar en la ecuación 3.58

El radio medio geométrico es un concepto matemático útil en el cálculo de la inductancia y puede ser definido como el radio de un conductor que tiene en cuenta tanto el flujo interno como el flujo externo a una distancia unitaria del centro del conductor.

El radio medio geométrico (RMG) del conductor se ve afectado por su construcción y se calcula según la siguiente expresión:

$$RMG = r \times k \quad \dots 3.58$$

Donde

r es el radio del conductor.

k es el factor de construcción del cable.

Para fines prácticos se toma en cuenta la Tabla 3.2 de los conductores más usuales.

Tabla 3.2.- Tabla que relaciona el cable de acuerdo al número de hilos con el RMG (Radio Medio Geométrico)

Numero de hilos que componen el cable.	RMG
19 hilos	0.758r
37 hilos	0.768r
61 hilos	0.772r
91 hilos	0.774r
127 hilos	0.776r

3.5.2.2.- Inducción de Cables en Paralelo

En ocasiones, las conexiones de los sistemas deben realizarse a través de más de un cable por fase, dando lugar a sistemas con dos o más cables en paralelo.

La inducción y, consecuentemente, la reactancia inductiva de cables en paralelo de una misma fase deben ser iguales para todos, puesto que de ello depende la distribución de la corriente en ellos; por ejemplo: en un sistema con dos cables en

paralelo es de esperarse que cada uno conduzca la mitad de la carga; si el sistema no tiene una reactancia inductiva uniforme esto ocasionará que uno de los cables conduzca una carga mayor que la proyectada, ocasionando envejecimiento prematuro de los aislamientos y, como consecuencia, fallas.

Se obtiene una distribución completamente uniforme de la corriente sólo cuando se utilizan cables de tres conductores, puesto que de esa forma se elimina la influencia inductiva de los cables próximos.

En el caso de cables monoplares en paralelo que estén dispuestos en configuración plana, si los cables de una misma fase están agrupados y tendidos uno junto al otro (Ver Figura 3.6a) se obtiene un coeficiente de inducción muy irregular. Es mejor agrupar los cables de distintas fases en sistemas, y hacer que las separaciones entre los cables (d) pertenecientes a un sistema sean menores que las distancias (D) entre los propios sistemas.

El orden de las fases dentro de un sistema es igualmente de gran importancia. En concordancia con el número de sistemas trifásicos se recomienda la sucesión de fases de la Figura 3.6b. Con esta disposición, los coeficientes de inducción de los cables paralelos en una fase son prácticamente iguales, mientras que las fases A, B y C difieren entre sí. Sin embargo, esto es menos perjudicial que la diferencia en inducción de cables de la misma fase.

En la Figura 3.6c tenemos un ejemplo de distribución que cumple con las condiciones de agrupar cables de distintas fases en sistemas y también conservar la separación entre sistemas ($D \gg d$) mayor que la que existe entre cables; pero es desfavorable, pues, en este caso, difieren no sólo los coeficientes de inducción entre las fases A, B y C, sino también los de los cables paralelos en una misma fase. Tomando en cuenta todo lo anterior, para varios sistemas de cables monoplares agrupados en “trébol” se recomienda la disposición de la Figura 3.3d.

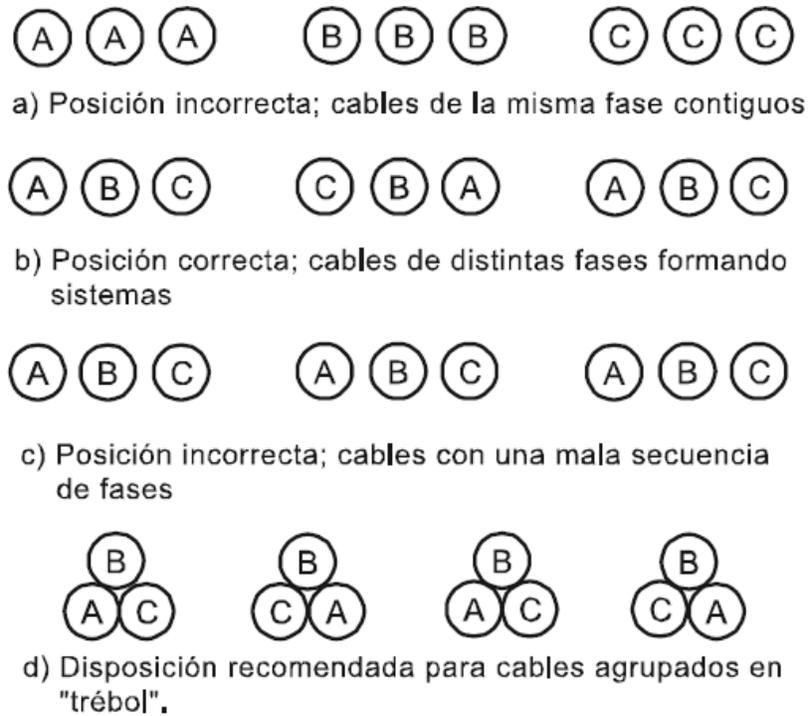


Figura 3.6.- Agrupación de cables en paralelo

3.5.3.- Cálculo de la inductancia total, para diversas disposiciones de los cables en un circuito trifásico.

Como ya se ha mencionado la inductancia depende de la disposición que tiene los cables del sistema por lo que a continuación se muestran las configuraciones más usuales.

Donde

S es la distancia entre el centro de los cables

RMG es el radio medio geométrico

DMG es la distancia media geométrica

Formación triangular equidistante

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{S}{RMG} \left[\frac{H}{m} \right] \quad \dots 3.59$$

Las inductancias para las tres fases son iguales

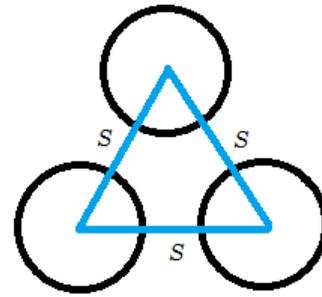


Figura 3.7.- Formación triangular equidistante

Formación plana

El valor medio de la inductancia total es:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{DMG}{RMG} \left[\frac{H}{m} \right] \quad \dots 3.60$$

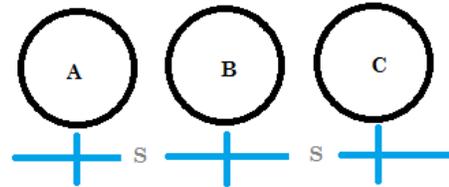


Figura 3.8.- Formación plana

$$DMG = \sqrt[3]{2} \times S \quad \dots 3.61$$

Formación Rectangular

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{DMG}{RMG} \left[\frac{H}{m} \right] \quad \dots 3.62$$

$$S_{AB} \neq S_{BC} \neq S_{CA} \quad \dots 3.63$$

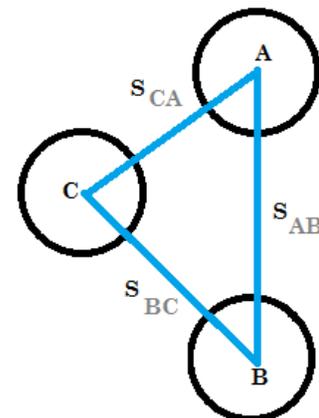


Figura 3.9.- Formación rectangular

$$DMG = \sqrt[3]{S_{AB} \times S_{BC} \times S_{CA}} \quad \dots 3.64$$

3.5.4.- Cálculo de la impedancia para dos circuitos en dos bancos de ductos

Como se ha hecho mención la impedancia está compuesta por una parte resistiva y otra reactiva. La manera de determinar la resistencia de corriente alterna se vio en el Capítulo 2. En este apartado se hará énfasis en la obtención de la reactancia inductiva para dos circuitos, mostrando las consideraciones que deben tomarse para este tipo de disposición de los cables.

Partiendo de que

$$X_L = 2\pi fL \quad \dots 3.65$$

Y tomando en cuenta que

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{DMG}{RMG} \quad \dots 3.66$$

Donde

$$f = 60 \text{ Hz}$$

Obtenemos

$$X_L = 0.0753 \ln \frac{DMG_{6C}}{RMG_{6C}} \quad \text{en } \Omega/\text{Km} \quad \dots 3.67$$

Considerando que el cálculo a demostrar es para dos circuitos, seis conductores se presenta lo siguiente:

Calculo de DMG_{6C}

Tomando en cuenta las disposiciones recomendadas para la instalación de los cables y considerando que se trata de dos circuitos paralelos se puede obtener las siguientes ecuaciones para conseguir el Diámetro Medio Geométrico (DMG_{6C}).

$$DMG_{6C} = \sqrt[3]{d_{AB} \times d_{AC} \times d_{BC}} \quad \text{en mm} \quad \dots 3.68$$

$$d_{AB} = \sqrt[4]{d_{A1B1} \times d_{A1B2} \times d_{A2B1} \times d_{A2B2}} \quad \text{en mm} \quad \dots 3.69$$

$$d_{AC} = \sqrt[4]{d_{A1C1} \times d_{A1C2} \times d_{A2C1} \times d_{A2C2}} \quad \text{en mm} \quad \dots 3.70$$

$$d_{BC} = \sqrt[4]{d_{B1C1} \times d_{B1C2} \times d_{B2C1} \times d_{B2C2}} \quad \text{en mm} \quad \dots 3.71$$

Donde

$d_{N \times M}$ son las distancias entre las fases de ambos circuitos (1 y 2)

Calculo de RMG_{6C}

De igual forma es importante considerar el radio medio geométrico para todos los conductores (RMG_{6C}); éste dato se verá influenciado considerablemente por la construcción de cable (Ver punto **3.5.2.1.- Radio Medio Geométrico**) y las distancias entre las fases.

$$RMG_{6C} = \sqrt[3]{RMG_A \times RMG_B \times RMG_C} \quad \text{en mm} \quad \dots 3.72$$

Donde

$$RMG_A = \sqrt{RMG_{1C} \times d_{A1A2}} \quad \text{en mm} \quad \dots 3.73$$

$$RMG_B = \sqrt{RMG_{1C} \times d_{B1B2}} \quad \text{mm} \quad \dots 3.74$$

$$RMG_C = \sqrt{RMG_{1C} \times d_{C1C2}} \quad \text{mm} \quad \dots 3.75$$

3.5.5.- Corrección de la resistencia y de la reactancia inductiva debido al efecto que producen las corrientes que circulan por la pantalla metálica.

Para el cálculo de la inductancia y la reactancia inductiva en cables provistos de pantallas y/o cubiertas metálicas que se encuentran conectadas a tierra en dos o más puntos, es necesario considerar el efecto producido por las corrientes circulantes en la pantalla o cubierta.

Se pueden determinar los efectos de las corrientes circulantes en pantallas y cubiertas metálicas considerando un cable imaginario sin pantalla, que presente una resistencia y reactancia comparable a la que presenta un conductor real, incluidos los efectos de la pantalla. A la resistencia y a la reactancia de este cable imaginario se les conoce como resistencia y reactancia aparentes, y los valores obtenidos de estos parámetros permiten de manera directa el cálculo de la impedancia de la línea, y por lo tanto la caída de tensión existente en la línea.

En circuitos trifásicos con cables monopolares colocados equidistantes o circuitos monofásicos podemos calcular la resistencia aparente (R_A) y la reactancia inductiva aparente (X_{LA}) con las siguientes expresiones:

$$R_A = R + \frac{X_m^2 R_p}{X_m^2 + R_p^2} \quad \text{en } \Omega/\text{Km} \quad \dots 3.76$$

$$X_{LA} = X_L - \frac{X_m^3}{X_m^2 + R_p^2} \quad \text{en } \Omega/\text{Km} \quad \dots 3.77$$

Donde

R es la resistencia por corriente alterna del conductor (Ver punto **2.2.2 resistencia del conductor por corriente alterna**).

R_p es la resistencia de la pantalla a la temperatura de operación en Ω/Km (Ver punto **2.3.1.- Pérdidas en pantallas o cubiertas metálicas**).

X_L es la reactancia inductiva calculada.

X_m es la reactancia mutua entre el conductor y pantalla o cubierta metálica en Ω/Km

$$X_m = 2\pi f M \quad \dots 3.78$$

M Es la inductancia mutua entre el conductor y la pantalla o cubierta metálica en Ω/Km .

$$X_m = 0.0753 \text{ Ln } \frac{S}{RM_{1p}} \quad \text{en } \Omega/Km \quad \dots 3.79$$

Donde

S es la distancia entre centros de los cables en mm

RM_{1p} es el radio medio de la pantalla.

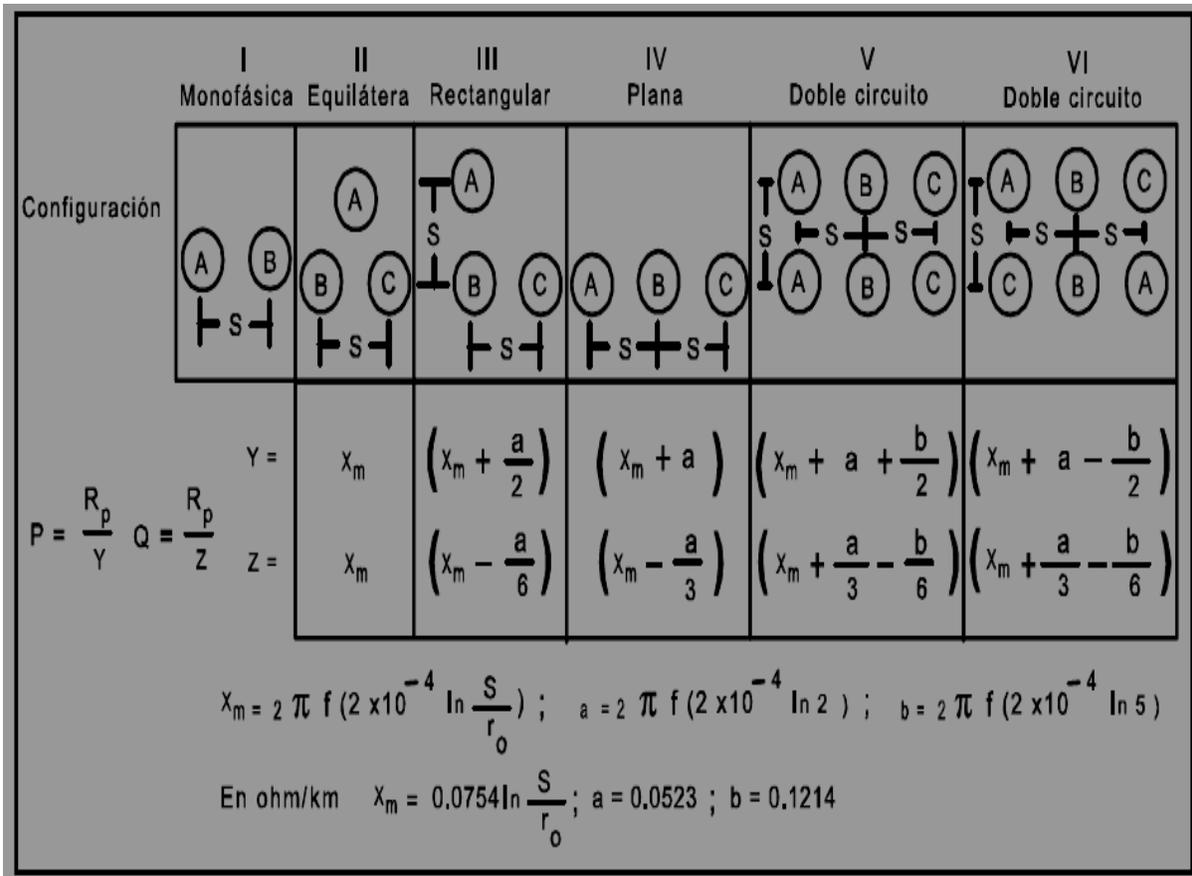


Figura 3.10.- Formulas y disposiciones para el cálculo de resistencia y reactancia aparente

En la Figura 3.10 se muestran las fórmulas necesarias para calcular X_m en las diversas disposiciones de cables que pueden presentarse.

Finalmente con los datos de R_A y X_{LA} se puede obtener directamente la impedancia, logrando con esto, contar con el parámetro principal para el cálculo de caída de tensión.

3.6.- Reactancia Capacitiva y Capacitancia

Capacitancia

También es una medida de la cantidad de energía eléctrica almacenada para un potencial eléctrico determinado.

La capacitancia de una línea de distribución es el resultado de la diferencia de potencial existente entre los conductores y origina que ellos adquieran una carga eléctrica Q de la misma forma que las placas de un capacitor cuando hay una diferencia de potencial entre ellas. La capacitancia entre conductores es la carga por unidad de longitud. La capacitancia entre conductores paralelos es una constante que depende del tamaño y espaciamiento entre ellos. El efecto de la capacitancia puede ser pequeño y muchas veces se desprecia en las líneas de potencia que tienen menos de 80 km (líneas cortas) de largo.

La relación entre la diferencia de potencial (o tensión) existente entre las placas del condensador (por una parte tenemos al conductor que tiene un valor de tensión igual al de la línea, y por otro la pantalla que estará conectado a tierra) y la carga eléctrica almacenada en éste, se describe mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{Q}{V} \quad \dots 3.80$$

En el caso de cables con aislamiento, la capacitancia dependerá de su construcción si este es monopolar o tripolar, con pantallas o sin estas, así como del material y el espesor del aislamiento.

En el caso de los cables subterráneos con pantalla metálica independiente, el aislamiento es el material dieléctrico. Para estos tipos de cables la capacitancia se puede calcular de la siguiente manera.

$$C = \frac{0.0241 SIC}{\log_{10} \left(\frac{da}{dp} \right)} \times 10^{-6} \quad \dots 3.81$$

Donde

SIC es la constante inductiva específica del aislamiento.

da es el diámetro sobre el aislamiento en mm

dp es el diámetro bajo el aislamiento en mm

 Cálculo de la capacitancia para cable monopolar con cubierta o pantalla metálica.

Este es un caso muy particular ya que el cable representa un capacitor en el que el conductor (Ver Figura 3.11) que se encuentra al potencial al que está sometida la línea, constituye una de las placas y la pantalla o cubierta metálica, que esta aterrizada a tierra constituye la otra placa, por último el dieléctrico lo constituye el propio aislamiento.

Para líneas de alta tensión más largas, la capacitancia crece en importancia. La capacitancia de una Línea de Transmisión se calcula de la siguiente manera:

$$C_n = \frac{2\pi k}{\ln \frac{DMG}{R}} \text{ en F/m} \quad \dots 3.82$$

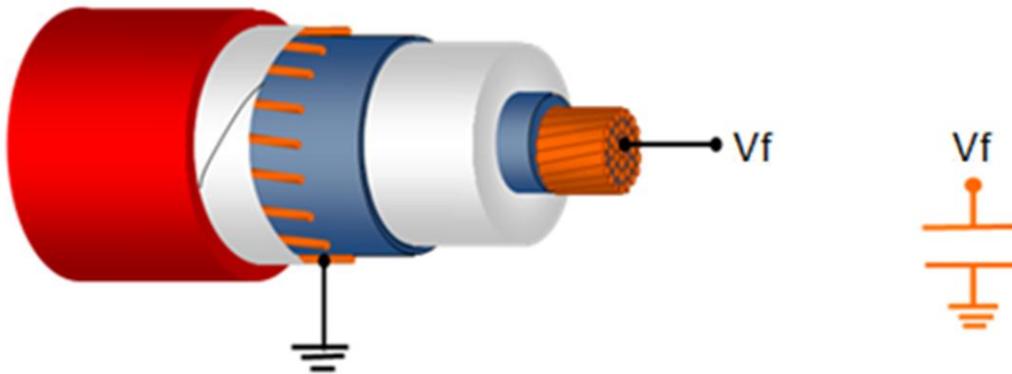


Figura 3.11.- Analogía de un cable aislado con un capacitor

Valores para las ecuaciones anteriores de la constante inductiva específica (SIC) y $\tan \delta$ para aislamientos empleados usualmente (Ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3.- Valores de la constante inductiva específica SIC , y $\tan \delta$ para aislamientos empleados usualmente.

Aislamiento	$\tan \delta$ (unidad)	SIC
EP	0.015	2.6
XLP	0.001	2.1
PAPEL IMPREGNADO	0.011	3.9

La reactancia capacitiva se puede expresar de la siguiente manera:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad \dots 3.83$$

Donde

X_c es la reactancia capacitiva en Ω/Km

C es la capacitancia en F/km, calculada en el punto anterior.

f es la frecuencia del sistema en Hz.

De manera simple se puede calcular la caída de tensión, obteniendo un valor aproximado.

$$\Delta V = IZL \quad \dots 3.84$$

Donde la impedancia es igual a:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \dots 3.85$$

3.7.- Caída de tensión (fase a tierra y entre fases) en circuitos trifásicos balanceados.

Durante la explicación de este capítulo se mencionaron aquellos aspectos que se deben tomar en cuenta para realizar el cálculo de caída de tensión, como lo son: concepto de impedancia (resistencia y reactancia), la disposición de los cables en una instalación eléctrica, la longitud etc; donde la obtención de la resistencia se puede visualizar de mejor forma en el Capítulo 2.

En la Figura 3.12 se muestran los circuitos trifásicos usualmente aplicados por sus múltiples ventajas en zonas habitacionales e industriales.

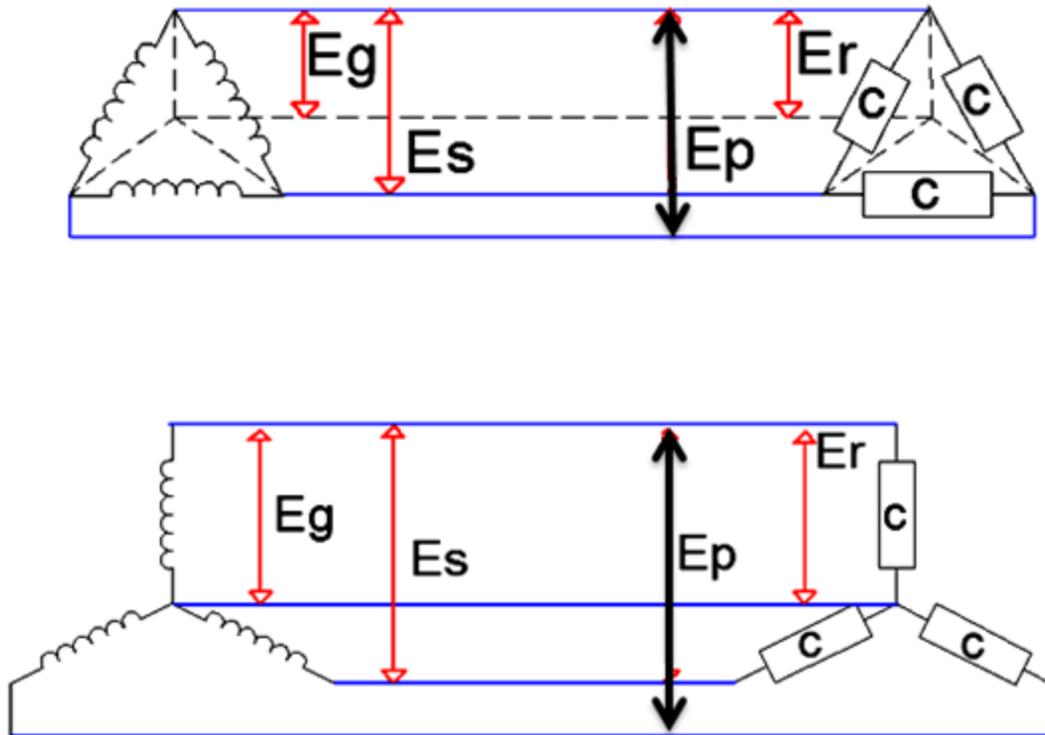


Figura 3.12.- Circuito trifásico de 3 hilos y de 4 hilos respectivamente.

Donde

E_g es la tensión de envío de fase a neutro

E_s es la tensión de envío entre fases

C es la carga conectada al circuito teniendo conocimiento de los parámetros mencionados en este apartado se puede considerar la aplicación de la siguiente ecuación para el cálculo de caída de tensión de una manera más precisa.

$$\Delta V = [(E_r \cos\phi + IRL)^2 + (E_r \sin\phi + IXL)^2]^{\frac{1}{2}} - E_r \quad \dots 3.86$$

Donde

ΔV es la caída de tensión al neutro o a tierra, en V.

R es la resistencia a la corriente alterna de la línea, en Ω/Km .

X es la reactancia inductiva de la línea a la frecuencia de operación en Ω/Km

L es la longitud de la línea, en km.

$\sin\phi$ es el seno del ángulo del factor de potencia.

E_r es la tensión de fase a neutro o a tierra en el extremo receptor, en V.

I es la corriente de línea, en A.

La corriente de línea se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$I = \frac{W}{\sqrt{3} E_p \cos\phi} = \frac{VA}{\sqrt{3} E_p} \quad \dots 3.87$$

Donde

W es la potencia real total entregada a las cargas, en W.

VA es la potencia aparente total entregada a las cargas, en VA.

$\cos\phi$ es el coseno del ángulo factor de potencia.

I es la corriente de línea, en A.

E_p es la tensión de fase a fase en el extremo receptor, en V

La tensión de fase a tierra se puede calcular de la siguiente forma a partir de la tensión entre fases.

$$E_r = \frac{E_p}{\sqrt{3}} \dots 3.88$$

Ya obtenidos los parámetros que se requieren en la ecuación 3.86 se realiza el cálculo de manera sencilla. En caso de que la caída de tensión sea mayor a la permitida (3% en circuitos alimentadores), se debe incrementar el calibre del cable que se había seleccionado en el cálculo de capacidad de conducción de corriente (Ampacidad) y se debe de volver a realizar el cálculo de caída de tensión hasta obtener un resultado favorable.



CAPÍTULO 4

PROPUESTA



INTRODUCCIÓN

Para poder hacer el cálculo de conductores sea cual sea, la disposición de los mismos, el tipo de instalación (**Ver Apéndice D**) o la utilidad para la cual sean requeridos, es necesario tomar la demanda máxima de la carga posible en el sistema, en este caso como ya se ha mencionado de las Subestaciones Generales SG-1 Y SG-2.

Para el estudio fue necesario hacer una búsqueda de información, para cumplir con el objetivo de esta tesis (**Ver Objetivos**). Parte de esta información nos da una idea en general sobre la demanda real de consumo de los últimos tres años de las Subestaciones Generales 1 y 2 (SG-1 y SG-2), para poder tener un panorama amplio de la demanda máxima que se presentará en los años posteriores.

Esta parte de la tesis es de suma importancia ya que de esto dependerá el correcto funcionamiento y seguridad de los alimentadores principales, los cuales en función de estas dos características proporcionarán continuidad y confiabilidad al servicio eléctrico en Ciudad Universitaria. En este capítulo sólo se tratara lo relacionado a las SG-1, SG-2 y SG-4, estas dos últimas alimentadas por el mismo alimentador, mientras que la SG-1 contará con un alimentador propio. Para los cálculos relacionados con las Subestación General 5 se presenta en apéndice C, donde se encuentra la información y las determinaciones pertinentes referentes a esta subestación [Ver Figura 4.1]

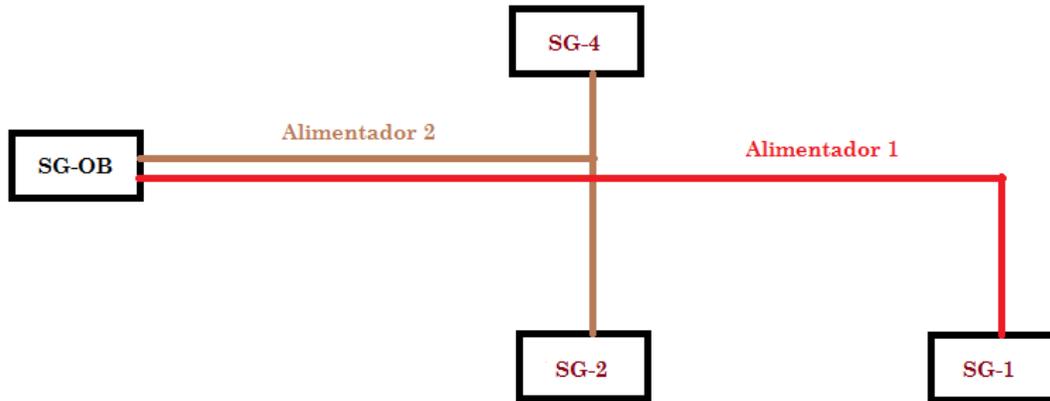


Figura 4.1.- Diagrama unifilar de los alimentadores 1 y 2.

4.1.- Recopilación de información.

Para basarse de información lo más certera y confiable posible, fue necesario hacer una investigación y obtención de datos de dos fuentes, estas son:

Fuente No.1

Por parte del Departamento de Ingeniería Eléctrica de Potencia (DIEP).

- a) Del periodo (2009 - 2011). Tablas que muestran la información de las demandas máximas de las dependencias de las Subestaciones Generales 1 y 2 (Orden de cargas de acuerdo a la topología actual de la Red de Distribución Subterránea de Ciudad Universitaria). (Ver Tabla B1 y B2, **Apéndice B**).

Como resultado de dos estudios realizados posteriormente, por el DIEP

- b) Carpetas con la información general del suministro eléctrico a cada una de las dependencias que se encuentran conectadas a las Subestaciones Generales 1 y 2, que contiene los siguientes dos puntos citados:

- Orden de cargas de acuerdo a la topología actual de la Red de Distribución Subterránea de Ciudad Universitaria. (Ver Tablas B3 y B4, **Apéndice B**).
- Orden de cargas de acuerdo a la nueva topología de la Red de Distribución Subterránea de Ciudad Universitaria. (Ver Tablas B5 y B6, **Apéndice B**).

Lo anterior corresponde a la nueva topología y ventajas que ofrecerá la Nueva Red de Media Tensión en Ciudad Universitaria.

Fuente No. 2

2.- Por parte de la Dirección General de Obras y Conservación (DGOYC).

Recibo de facturación del suministro de energía eléctrica, para ambas Subestaciones Generales, con gráfica de demandas máximas indicadas por mes (Ver Tabla 4.1 y Tabla 4.2).

Tabla 4.1.- Facturación eléctrica para la Subestación General 1



Comisión Federal de Electricidad
DIRECCIÓN DE OPERACIÓN

Av. Paseo de la Reforma Num. 164
Col. Juárez, México, D.F. 06600
RFC: CFE370814-QID

Numero de servicio:
965 831 003 206

Total a pagar:
\$6,696,821.00
(SEIS MILLONES SEISCIENTOS NOVENTA Y SEIS MIL OCHOCIENTOS VEINTIUN PESOS/100 M.N.)

Fecha límite de pago:
15 ABR 12

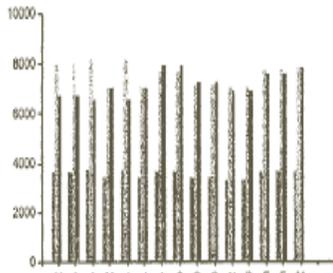
Nombre y Domicilio:
UNAM SUB ELEC → **SG 1**
AV INSURGENTES SUR CIRCUITO INTERIOR C U
COYOACAN, D.F.

Ruta	Periodo	No. Medidor
82DN10E028230037	29 FEB 12 A 31 MAR 12	A012871

Tarifa	Carga conectada kW	Demanda contratada kW	Multiplicador
HM	3054	2138	12000

Función y periodo	Lectura actual	Lectura anterior	Diferencia	Totales
kWh base				746,400
kWh intermedia				2,110,800
kWh punta				530,400
kW base				3,636
kW intermedia				7,861
kW punta				7,823
kVAh				1,376,800

Datos Históricos



Mes	Demanda máxima kW	Consumo total kWh	F.P. %	F.C. %	Precio medio
MAR 11	7,931	3,562,800	90.97	58	1.5432
ABR 11	7,193	211,200	90.26	57	1.5201
MAY 11	7,230	3,589,800	90.59	57	1.5088
JUN 11	6,421	3,284,000	91.05	60	1.5327
JUL 11	5,645	2,238,000	89.22	43	1.6494
AGO 11	7,040	3,500,400	92.05	59	1.5261
SEP 11	7,113	3,320,400	92.32	58	1.5834
OCT 11	7,054	3,308,000	92.41	58	1.5513
NOV 11	7,078	192,000	92.03	56	1.6368
DIC 11	7,935	3,141,600	92.42	55	1.7517
ENE 12	7,305	2,515,200	91.38	46	1.8741
FEB 12	6,948	2,935,200	92.84	56	1.7967
MAR 12	7,841	3,160,800	93.41	59	1.8067
MAR 12	7,841	3,167,800	93.60	56	1.7043

Conceptos	Totales	Precios unitarios
Energía en base kWh	746,400	1.01510
Energía en intermedia kWh	2,110,800	1.21440
Energía en punta kWh	530,400	2.06660
Demanda facturable kW	7,841	178.80000

Avisos Importantes

- Aviso-recibo Informativo. Servicio incluido en convenio de cobranza centralizada.
- Nos transformamos para servirte mejor.
- Servicio a Clientes Teléfono 071.
- El mantenimiento operativo de vehículos y equipos genera ahorro... ¡Y ahorra energía!

Estado de cuenta

Conceptos	Importe \$
Energía	4,411,848.79
Demanda Facturable	1,401,970.80
Bonificación Factor de Potencia	-40,896.72
Subtotal	5,772,922.87

Tabla 4.2.- Facturación eléctrica para la Subestación General 2



Comisión Federal de Electricidad
DIRECCIÓN DE OPERACIÓN

Av. Paseo de la Reforma Num. 164
Col. Juárez, México, D.F. 06600
RFC: CFE370814-Q10

Número de servicio:
965 000 106 173

Total a pagar:
\$5,257,336.00
(CINCO MILLONES DOSCIENTOS CINCUENTA Y SIETE MIL TRESCIENTOS TREINTA Y SEIS PESOS 00/100 M.N.)

Fecha límite de pago:
15 ABR 12

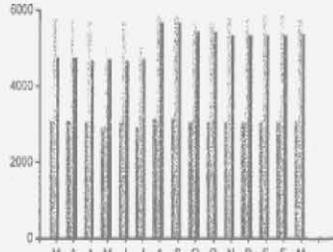
Nombre y Domicilio:
UNAM SUB. ELEC. **SG 2**
AV INSURGENTES SUR S N CIRCUIT
O EXTERIOR C.U.
COYOACAN, D.F.

Ruta	Periodo	No. Medidor
82DN10E028230020	29 FEB 12 A 31 MAR 12	A009452

Tarifa	Carga conectada kW	Demanda contratada kW	Multiplicador
HM	10560	8248	3000

Función y periodo	Lectura actual	Lectura anterior	Diferencia	Totales
kWh base				707,190
kWh intermedia				1,806,830
kWh punta				396,840
kW base				5,089
kW intermedia				5,736
kW punta				5,352
kVAh				1,480,830

Datos Históricos



Conceptos	Totales	Precios unitarios	Mes	Demanda máxima 15'	Consumo total kWh	F.P. %	F.C. %	Precio medio
Energía en base kWh	707,190	1.01510	MAR 11	5,743	2,816,680	87.22	62	1.5340
Energía en intermedia kWh	1,806,830	1.21440	ABR 11	5,240	1,677,810	86.75	60	1.5172
Energía en punta kWh	396,840	2.08680	ABR 11	5,422	0	86.73	59	0.0000
Demanda facturable kW	5,468	178.80000	MAY 11	5,418	2,695,330	87.15	62	1.5370
			JUN 11	5,015	2,718,240	87.07	65	1.5418
			JUL 11	4,826	2,050,200	84.32	64	1.6227
			AGO 11	5,004	2,722,410	86.88	64	1.5332
			SEP 11	5,051	2,598,050	86.71	63	1.5866
			OCT 11	4,982	2,524,770	86.94	63	1.5600
			OCT 11	4,824	1,644,470	86.05	62	1.6105
			NOV 11	5,727	2,640,810	87.35	63	1.7166
			DIC 11	5,487	2,268,200	85.81	55	1.8400
			ENE 12	5,479	2,565,810	86.96	59	1.7916
			FEB 12	5,475	2,516,220	87.89	62	1.7927
			MAR 12	5,468	2,712,680	87.77	64	1.6708

Avisos Importantes

- Aviso-recibo informativo. Servicio incluido en convenio de cobranza centralizada.
- Nos transformamos para servirte mejor.
- Servicio a Clientes Teléfono 071.
- El mantenimiento operativo de vehículos y equipos genera ahorro... (Y ahorra energía)

Domicilio fiscal
UNA2907227Y5

Factura: NA
Pala: 000022184332
No. aprobación: 1381087

Estado de cuenta

Conceptos	Importe \$
Energía	3,487,529.99
Demanda Facturable	977,878.40
Cargo Factor de Potencia	66,978.12
Subtotal	4,532,386.51
IVA 16%	725,149.84
Facturación del Periodo	5,257,536.35
Total	\$5,257,536.35

PORTE PAGADO
CARTAS
028-1987

4.2.- Información a partir de la fuente de No. 1 inciso a

Se obtuvo información de las Tablas B1 y B2, **Apéndice B**, las cuales se muestran en el apéndice B, en éstas se muestran las nomenclaturas y nombres de cada dependencia, así como su demanda máxima medida y la demanda máxima calculada con un factor de crecimiento a 30 años; este último dato se presenta con la intención de observar el valor máximo de demanda que se podría considerar para el estudio de los alimentadores siempre y cuando se tome la decisión de utilizar los datos de las Tablas B1 y B2 , **Apéndice B**.

Para la obtención y medición de la demanda máxima de cada dependencia se solicitó que se pusieran en operación los equipos y la iluminación, durante un cierto periodo, con el objeto de realizar una medición lo más cercana al valor real de la demanda.

4.2.1.- Resultados de la fuente No. 1 inciso a

Los resultados obtenidos a partir de las Tablas B1 y B2 del **Apéndice B** son los siguientes, aplicando un factor de crecimiento (F.C.) a 30 años, ver Tabla 4.3:

Tabla 4.3. Resultados obtenidos a partir de la fuente No, 1 de información.

SUBESTACION GENERAL 1

Demanda actual máxima en MVA	Corriente en A	Demanda actual máxima a 30 años en MVA (Con F.C.)	Corriente a 30 años en A
12.992	326.13	16.889	423.96

SUBESTACION GENERAL 2

Demanda actual máxima en MVA	Corriente en A	Demanda actual máxima a 30 años en MVA (Con F.C.)	Corriente a 30 años en A
11.187	280.8	14.543	365.06

Demanda total máxima actual (SG1 y SG2) en MVA	24.179
Demanda total máxima (SG1 y SG2) a 30 años en MVA	31.432

Donde:

F.C. Es el factor de crecimiento a 30 años (1.3)

4.3.- Información a partir de la fuente de No.1 inciso b

Estas carpetas contienen información acerca del suministro de energía de cada SD's que se encuentra conectada a cada una de las Subestaciones Generales respectivamente, de las cual se recopilamos datos de la potencia en kVA de las gráficas existentes en cada apartado para cada dependencia. Las carpetas tienen la información de acuerdo a la disposición actual de la red. Debido a esto se realizó una reorganización de la información de acuerdo a la estructura de la nueva red. A continuación se presenta un ejemplo de cómo se obtuvo la información de estas carpetas, para entender el ejemplo es necesario **conocer** dos conceptos sumamente importantes, vistos a mas profundidad mas adelante.

Factor de diversidad.- Es la relación que existe entre la suma de las demandas máximas individuales de varias partes del sistema y la demanda máxima del sistema.

Factor de coincidencia.- El factor de coincidencia puede considerarse como el porcentaje promedio de la demanda máxima individual de un grupo que es coincidente en el momento de la demanda máxima del grupo.

4.3.1.- Obtención de los datos para calcular el factor de coincidencia.

Si se conocen las demandas máximas individuales de cualquier grupo de cargas y el factor de diversidad, la demanda del grupo será igual a la suma de las demandas individuales divididas entre el factor de diversidad, este se usa para

determinar la máxima demanda resultante, de la combinación de un grupo individual de cargas, o de la combinación de dos o más grupos.

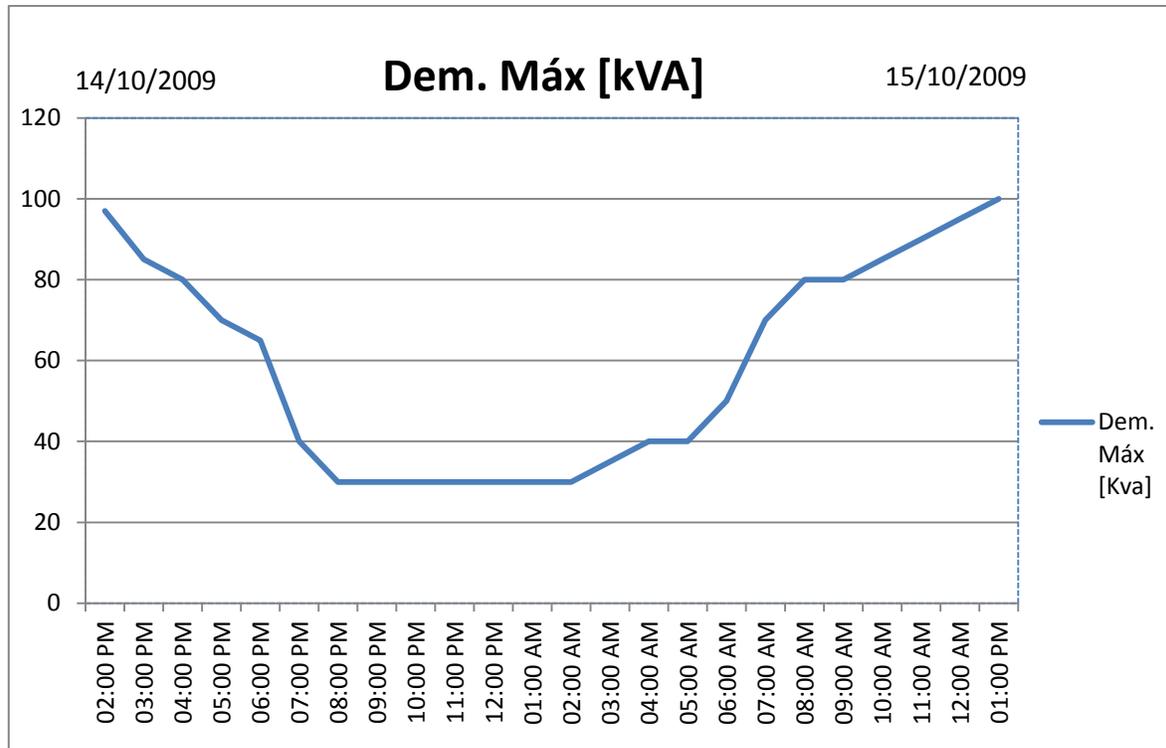
Estas combinaciones podrían representar un grupo de consumidores alimentados por un transformador, un grupo de transformadores cuyo suministro proviene de un alimentador primario o un grupo de alimentadores primarios provenientes de una subestación.

En ocasiones se prefiere un factor de multiplicación más que de división, por lo que tenemos lo anteriormente mencionado como factor de coincidencia, de tal manera que la demanda máxima se puede calcular multiplicando la suma de un grupo de demandas por el factor de coincidencia.

Se obtuvieron datos a partir de la información proporcionada por parte de la DIEP (División de Ingeniería Eléctrica de Potencia), basada en un estudio que se realizó en el año 2009, llamado “Proyecto Ejecutivo para la Construcción de la Red de Distribución Eléctrica Subterránea en 23 kV” donde se muestra el comportamiento de la demanda eléctrica en un cierto periodo por cada dependencia, a partir de estas gráficas, se puede determinar tanto las demandas máximas individuales como la demanda máxima del sistema, como se explica a continuación en el siguiente ejemplo con dos dependencias:

Dependencia 1(Instituto de Biología edificio A y B).

El Instituto de Biología (edificios A y B) tiene el comportamiento siguiente en un cierto periodo, de mayor consumo de energía dentro del periodo de medición, como se muestra en la Gráfica 4.3



Gráfica 4.3.- Comportamiento de la demanda del Instituto de Biología edificio A y B en un día.

Se puede ver en la Gráfica 4.3, la demanda en relación al tiempo durante un día completo. A las 2:00 p.m. se tiene una demanda de aproximadamente de 95 kVA. El comportamiento de esta demanda va decreciendo conforme pasa la tarde, es importante mencionar que se tomaron valores discretos para la obtención de estos datos; de igual forma se observa que la demanda mínima se presenta cerca de las 8:00 p.m. a 2:00 a.m. aproximadamente, con un valor de 30 kVA, que es cuando los equipos de mayor consumo no están en servicio, incluso la iluminación. La demanda máxima se tiene a la 1:00 p.m. con un valor de 95 kVA, obteniendo los valores hora por hora, en las 24 horas del día, se obtuvieron las tablas de demandas para las SG-1 y SG-2, para esta dependencia en particular queda como lo muestra la Tabla 4.4.

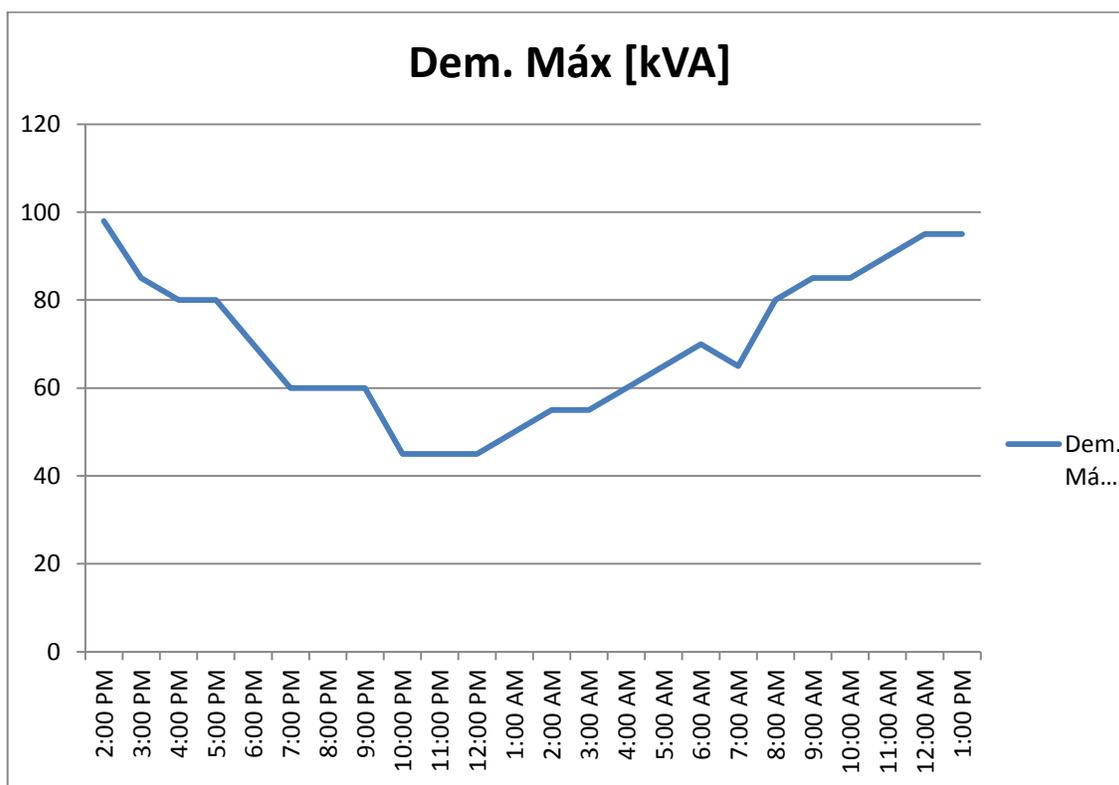
Tabla 4.4.- Datos de la demanda del Instituto de Biología edificio A y B en un día.

Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
5SD-F1	30	30	35	40	40	50	60	70	80	85	90	95	95	95	90	90	70	65	60	30	30	30	30	30

Ahora bien tomando otra dependencia:

Dependencia 2 (Instituto de Biología edificio C y D)

El Instituto de Biología (edificios C y D) tiene el siguiente comportamiento en un día, de mayor consumo de energía dentro del periodo de medición, como se muestra en la Grafica 4.4

**Gráfica 4.4.- Comportamiento de la demanda del Instituto de Biología edificio C y D en un día.**

Se puede ver en la Gráfica 4.4, la demanda en relación al tiempo durante un día completo. A las 2:00 p.m. se tiene una demanda de aproximadamente de 98 kVA. El comportamiento de esta demanda va decreciendo conforme pasa la

tarde, de igual forma se observar que la demanda mínima se presenta entre las 10:00 p.m. y 1:00 a.m. aproximadamente, con un valor de 45 kVA, que es cuando los equipos de mayor consumo están apagados, incluso la iluminación. La demanda máxima se tiene a la 2:00 p.m. con un valor de 98 kVA, obteniendo los valores hora por hora, en las 24 horas del día, se obtuvieron las tablas de demandas para las SG-1 y SG-2; para esta dependencia en particular queda como lo muestra la Tabla 4.5

Tabla 4.5.- Datos de la demanda del Instituto de Biología edificio C y D en un día.

Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
4SD-F1	50	55	55	60	65	70	65	80	85	85	90	95	95	98	85	80	80	70	60	60	60	45	45	45

Con la información de estas carpetas se logra obtener el factor que es de mucha importancia para el cálculo de los alimentadores llamado factor de coincidencia, pero para esto se debe entender primero lo que es el factor de diversidad.

4.3.2.- Factor de diversidad. F_{div}

Para entender el concepto de factor de coincidencia (F_{coin}), es indispensable mencionar el factor de diversidad (F_{div}). Si se imagina al conjunto de cargas instaladas en la red de usuario, unas entran y salen en diferentes momentos, es decir existe una diversidad en el empleo de las cargas, el factor de diversidad es la relación que existe entre la suma de las demandas máximas individuales de varias partes del sistema y la demanda máxima del sistema.

$$F_{div} = \frac{\sum D_{max i}}{D_{max}} \quad \dots (4.1)$$

Donde

F_{div} Factor de diversidad

$\sum D_{max i}$ Sumatoria de las demandas máximas individuales

D_{max} Demanda máxima del sistema

Este factor es igual a la unidad cuando las demandas máximas de las cargas ocurren simultáneamente. Si las cargas no son coincidentes entonces la suma de las demandas máximas individuales de las cargas será mayor que la demanda máxima global del sistema, dando como resultado un factor de carga mayor que la unidad.

Si el factor de carga indica el grado con que se emplean las instalaciones, el factor de diversidad expone que tan uniforme es ese empleo, es decir, que tan bien está distribuido en el tiempo el empleo de la energía demandada por el sistema.

4.3.3.- Factor de Coincidencia. F_{coin}

Este se define como el inverso del factor de diversidad

$$F_{coin} = \frac{D_{max}}{\sum D_{max i}} \dots (4.2)$$

Dado que es el recíproco del factor de diversidad, el factor de coincidencia indica el grado de "desuniformidad" con que operan en el tiempo las cargas del sistema.

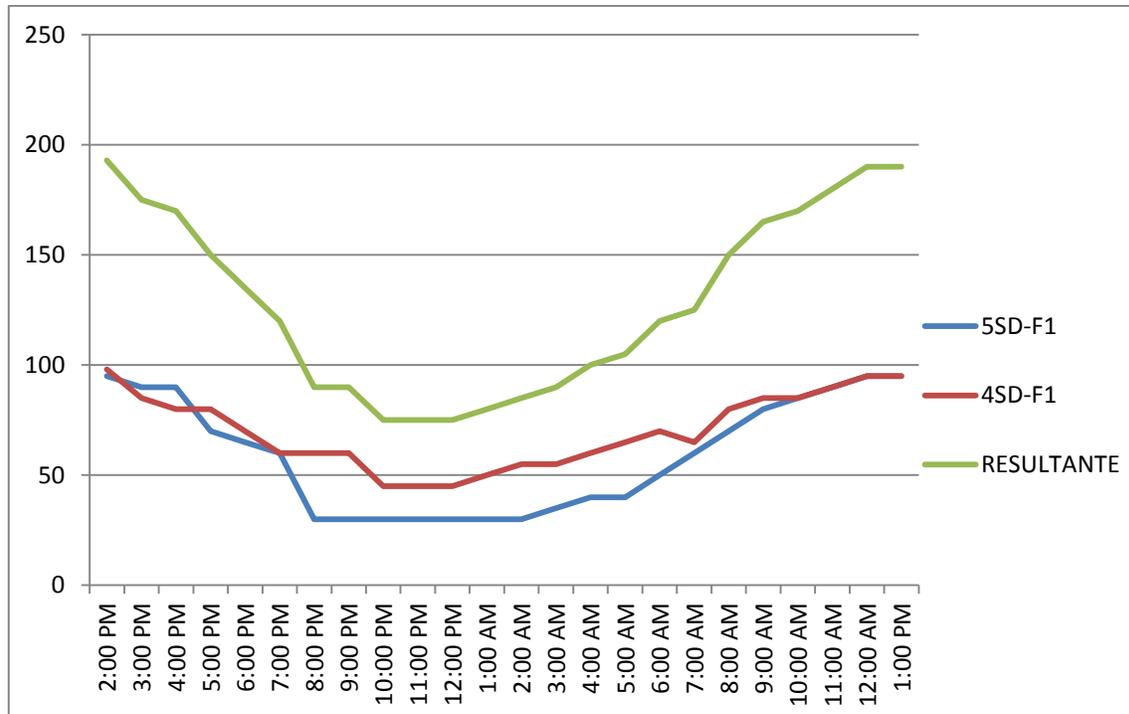
El factor de coincidencia puede considerarse como el porcentaje promedio de la demanda máxima individual de un grupo que es coincidente en el momento de la demanda máxima del grupo.

Los factores de diversidad y coincidencia se afectan por el número de cargas individuales, el factor de carga, las costumbres de vida de la zona, etc. El factor de diversidad tiende a incrementarse con el número de consumidores en un grupo con rapidez al principio y más lentamente a medida que el número es mayor. Por otra parte, el factor de coincidencia decrece rápidamente en un principio y con más lentitud a medida que el número de consumidores se incrementa.

La diversidad entre las cargas individuales o grupos separados tiende a incrementarse si las características de la carga difieren, de tal manera que si un grupo de cargas individuales tienen normalmente su demanda máxima por la tarde (como las cargas residenciales) y se combina con un grupo formado por cargas individuales que normalmente tienen sus demandas máximas en la mañana (como en pequeñas o medianas industrias), el factor de diversidad será mayor que si todas las cargas tuvieran su máxima demanda en la tarde o todos sus máximos en las mañanas.

4.3.4.- Ejemplos del cálculo de factor de coincidencia

Tomando en cuenta los datos que se mostraron en el inciso 4.3.1 anterior para calcular el factor de coincidencia se logra representar lo mostrado en la Gráfica 4.5 con base en las demandas máximas de las dos dependencias anteriores (Instituto de Biología edificio (A y B), así como el Instituto de Biología edificio (C y D).



Gráfica 4.5.- Comportamiento de la demanda del Instituto de Biología (edificios A y B) en conjunto con el C y D en un día, así como su resultante basada en la suma de

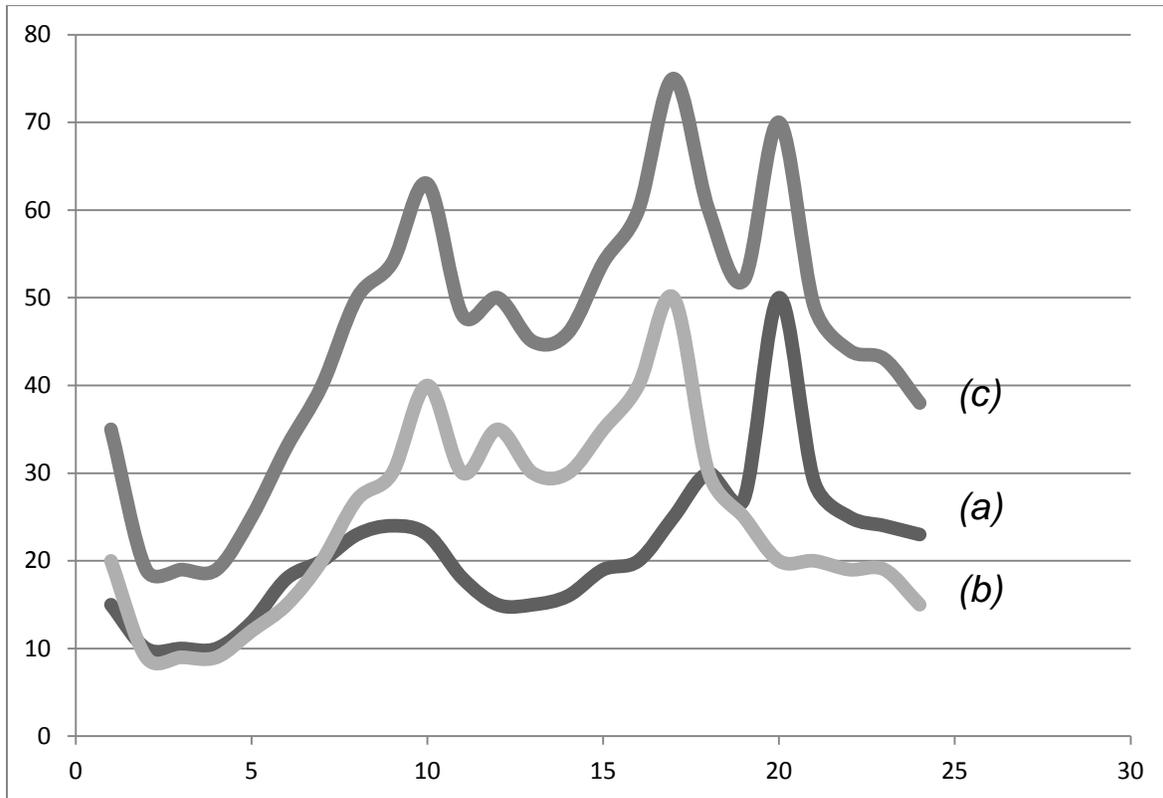
En la Gráfica 4.5 se puede apreciar que la dependencia 5SD-F1 tiene una demanda máxima de 95 kVA, si la combinamos con la carga 4SD-F1 que tiene una demanda máxima de 98 kVA. Se tiene que la suma de estas dos cargas tiene una máxima demanda de 193 kVA, por lo cual el factor de diversidad para las dos cargas es:

$$F_{div} = \frac{95 + 98}{193} = 1$$

En este caso el factor de diversidad es igual a la unidad ya que las máximas demandas de ambas dependencias ocurren al mismo tiempo y por lo mismo el factor de coincidencia también es igual a 1.

Como otro ejemplo tenemos que {B-4} si se tiene una carga (a) la cual tiene una máxima demanda de 50 kW y esta varía como se muestra en la Gráfica 4.6 y se

combina con otra carga (*b*) que también tiene una demanda máxima de 50 kW y se indica en la curva (*b*) de la misma gráfica.



Gráfica 4.6.- En cualquier instante la carga total *c* es igual a la suma de las cargas *a* y *b*. debido a la diversidad, el máximo de la carga *c* será menor que la suma de los máximos de las cargas *a* y *b*

La suma de estas dos cargas tiene una máxima demanda de 75 kW, como se indica en la curva (*c*). en cualquier instante la curva (*c*) es igual a la curva *a* más la curva (*b*); el factor de diversidad para las dos cargas es:

$$F_{div} = \frac{50 + 50}{75} = 1.33$$

El valor de demanda más alto de (*c*) resulta de la falta de coincidencia entre las demandas máximas de (*a*) y (*b*). Si las cargas (*a*) y (*b*) se deben alimentar separadamente por transformadores individuales, cada uno de ellos requerirá una

capacidad de 50 kW o una capacidad de 100 kW respectivamente. Por otro lado si a y b se alimentaran desde una fuente común, solamente se requerirían 75 kW de capacidad. Como se puede observar, se ahorrarán 25 kW de capacidad.

Del ejemplo se tendría:

$$F_{coin} = \frac{75}{50 + 50} = 0.75$$

$$F_{coin} = \frac{1}{\text{factor de diversidad}} = 0.75$$

Se puede comprobar que mientras el factor de diversidad nunca es menor que la unidad, el factor de coincidencia nunca es mayor que la unidad. El factor de coincidencia puede considerarse como el porcentaje promedio de la demanda máxima individual de un grupo que es coincidente en el momento de la demanda máxima del grupo, o la contribución de cada carga individualmente, en porciento de su demanda, para la demanda total combinada.

Los factores de diversidad y coincidencia, se afectan por el número de cargas individuales, el factor de diversidad tiende a incrementarse con el número de consumidores en un grupo con rapidez al principio y más lentamente a medida que el número es mayor; por otra parte el factor de coincidencia decrece rápidamente en un principio y con más lentitud a medida que el número de consumidores se incrementa.

4.3.5.- Cálculo para el factor de coincidencia de las Subestaciones Generales (topología actual de la red).

La siguiente ecuación sirve para encontrar el factor de coincidencia.

$$F_{coin} = \frac{D_{max}}{\sum D_{max i}} \dots (4.3)$$

Donde

F_{coin} Factor de coincidencia

D_{max} Demanda máxima del sistema

$\sum D_{max i}$ Sumatoria de las demandas máximas individuales

De la Tabla B3 (**Ver Apéndice B**) se tomó el valor máximo del último renglón, como se puede observar en su gráfica respectiva, este valor es el pico de la demanda de la Subestación General No.1 y de la Tabla B3.1 (**Ver Apéndice B**) se puede obtener la sumatoria de todos los valores ahí presentes, estos son las demandas máximas de cada dependencia en el transcurso del día. De manera análoga se puede considerar los datos de la Tabla B4 y B4.1 (**Ver Apéndice B**).

4.3.5.1.- Resultado de la fuente No.1 inciso b (topología actual de la red)

Aplicando la ecuación 4.3, con base en los datos se obtienen los siguientes resultados.

Para la SG-1:

Demanda máxima del sistema en kVA	Sumatoria de las demandas máximas individuales en kVA	Factor de coincidencia
7992	9722	0.822

Para la SG-2 se obtiene lo siguiente:

Demanda máxima del sistema en kVA	Sumatoria de las demandas máximas individuales en kVA	Factor de coincidencia
6382	6513	0.979

Si se multiplica el factor de coincidencia a la sumatoria de las demandas máximas individuales el resultado dará la demanda máxima del sistema con un valor menor. Esto indica que en lugar de solo considerar el valor más grande debido a la sumatoria de las demandas máximas para el diseño del alimentador, se puede hacer uso del factor de coincidencia para disminuir este valor y así optimizar el calibre del cable a utilizar esta situación se presentará en caso de que la fuente de información sea la adecuada para utilizar los valores presentes en ella para el diseño de los alimentadores; detalle que se discutirá más adelante.

4.3.6.- Cálculo para el factor de coincidencia de las Subestaciones Generales (basado en la topología de la nueva red).

Ya se ha explicado el método para calcular el valor de la demanda máxima a partir de del factor de coincidencia. Ahora se presenta el mismo cálculo pero a partir de un reajuste en las cargas de cada subestación. Esto se puede observar en las

Tablas B5 y B6, **Apéndice B**. De las mismas tablas también se pueden sustraer los datos de demanda máxima en conjunto de todas las dependencias y la sumatoria de demandas máximas (Ver Tabla B5.1 y B6.1, **Apéndice B**) de manera individual de todas las dependencias con respecto a su subestación asignada.

4.3.6.1.- Resultado de la fuente No.1 inciso b (topología de la nueva red)

Para la SG-1 se tiene:

Demanda máxima del sistema en kVA	Sumatoria de las demandas máximas individuales en kVA	Factor de coincidencia
6847	7987	0.8572

Para la SG-2 se tiene:

Demanda máxima del sistema en kVA	Sumatoria de las demandas máximas individuales en kVA	Factor de coincidencia
6344	6670	0.9511

4.4.- Información a partir de la fuente No. 2

En la facturación de energía de la SG-1 y SG-2 por parte de la CFE, se encuentra incluida información acerca de los antecedentes históricos de las demandas máximas de energía de las Subestaciones Generales (Ver Tablas 4.1 y 4.2).

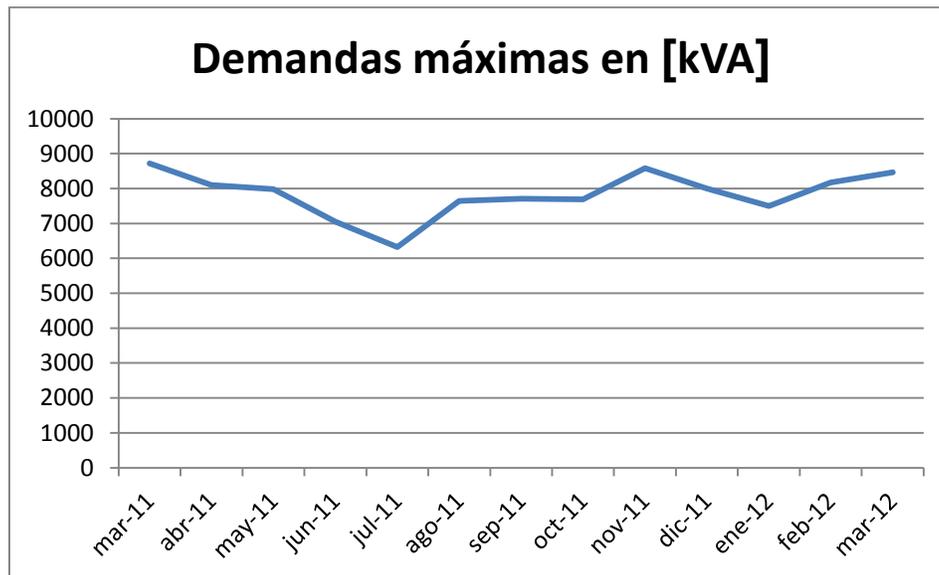
En las gráficas del recibo se muestra valores máximos de demanda por mes en kW, abarcando el periodo desde Marzo del 2011 hasta Marzo del 2012. También en el recibo se muestra una tabla con la demanda máxima por mes y su factor de

potencia. A continuación se presentan las tablas y gráficas para cada Subestación General. (Ver Tablas 4.6 y 4.7)

Tabla 4.6.- Datos históricos de las demandas máximas de la Subestación General No.2

Mes	Demanda máxima en kW	F.P. %	cos ϕ	Demanda máxima en kVA
mar-11	7931	90.97	0.9097	8718.25877
abr-11	7313	90.26	0.9026	8102.14935
may-11	7230	90.59	0.9059	7981.01336
jun-11	6421	91.05	0.9105	7052.16914
jul-11	5645	89.22	0.8922	6327.05671
ago-11	7040	92.05	0.9205	7648.01738
sep-11	7113	92.32	0.9232	7704.7227
oct-11	7076	92.03	0.9203	7688.79713
nov-11	7935	92.42	0.9242	8585.80394
dic-11	7305	91.36	0.9136	7995.84063
ene-12	6948	92.64	0.9264	7500
feb-12	7635	93.41	0.9341	8173.64308
mar-12	7841	92.62	0.9262	8465.77413

Del renglón sombreado se puede apreciar que en el periodo de noviembre existió una demanda máxima 8.58 MVA y mediante la Gráfica 4.1 se puede observar el comportamiento que tuvo la demanda de energía en el periodo de un año.



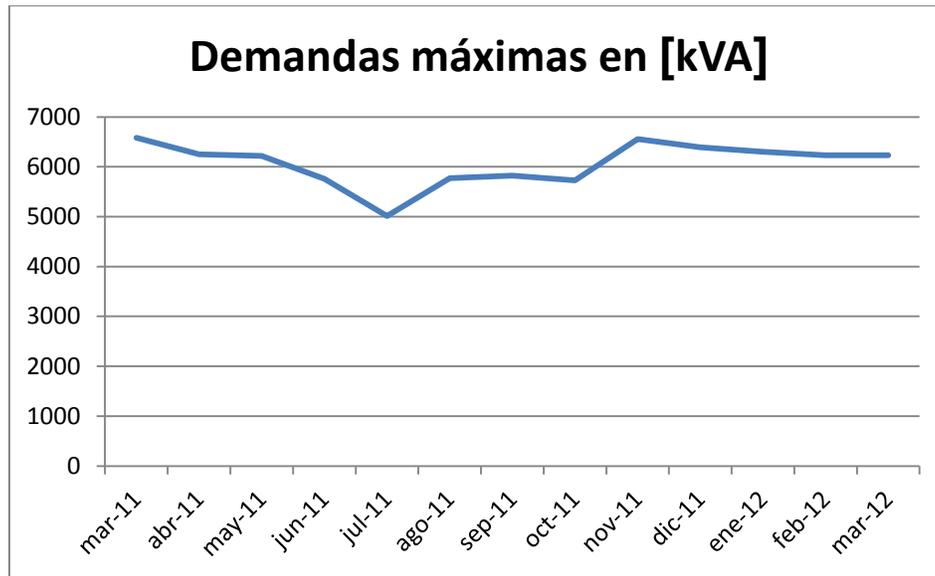
Gráfica 4.1.- Curva de comportamiento de las demandas máximas de la SG-1 en un

Tabla 4.7.- Datos históricos de las demandas máximas de la Subestación General No.1

Mes	Demanda máxima en kW	F.P.%	cos ϕ	Demanda máxima en kVA
mar-11	5743	87.22	0.8722	6584.49897
abr-11	5422	86.73	0.8673	6251.58538
may-11	5418	87.15	0.8715	6216.86747
jun-11	5015	87.07	0.8707	5759.73355
jul-11	4226	84.32	0.8432	5011.85958
ago-11	5004	86.68	0.8668	5772.95801
sep-11	5051	86.71	0.8671	5825.16434
oct-11	4982	86.94	0.8694	5730.38877
nov-11	5727	87.35	0.8735	6556.38237
dic-11	5487	85.81	0.8581	6394.35963
ene-12	5479	86.98	0.8698	6299.14923
feb-12	5475	87.89	0.8789	6229.37763
mar-12	5468	87.77	0.8777	6229.91911

De igual manera se puede observar que la demanda máxima en el renglón sombreado, fue en el mes de Marzo y tuvo una demanda de 6.58 MVA.

El comportamiento de las demandas máximas de la subestación se muestra en la Gráfica 4.2.



Gráfica 4.2.- Curva de comportamiento de las demandas máximas de la SG-2 en un

4.4.1.- Resultados de la fuente No. 2

Subestación General	Periodo	Demanda Máxima en MVA	Demanda Máxima a 30 años en MVA
SG1	Noviembre	8.58	11.15
SG2	Marzo	6.58	8.55

4.5.- Elección de datos a utilizar en el diseño de los alimentadores de las Subestaciones Generales.

De la información mencionada se puede mostrar las demandas máximas obtenidas a través de ellas:

- 👉 Las demandas máximas de la Subestaciones Generales SG-1 y SG-2 de la fuente No.1 **inciso a** son:

SG-1: 12.992 MVA

SG-2: 11.187 MVA

- 👉 Las demandas máximas resultantes de la fuente No.1 **inciso b** basada en la topología actual de la red es la siguiente:

SG-1: 7.992 MVA

SG-2: 6.382 MVA

- 👉 Las demandas máximas resultantes de la fuente No.1 **inciso b** basada en la topología de la nueva red es la siguiente:

SG-1: 6.847 MVA

SG-2: 6.344 MVA

- 👉 Las demandas máximas resultantes de la fuente No.2 son:

SG1: 8.585 MVA

SG2: 6.584 MVA

Las demandas máximas de la Subestaciones Generales SG-1 y SG-2 de la fuente No.1 **inciso a** se obtuvieron de la suma de las demandas máximas sin considerar el factor de coincidencia, por lo tanto son valores altos que no se van a presentar,

ya que en ningún instante todas las dependencias tendrán una demanda máxima en el mismo momento, debido a sus usos y costumbres. Las demandas máximas resultantes de la fuente No.1 **inciso b** basada en la topología actual, son valores muy cercanos a la realidad y esto lo podemos comprobar con los resultados de la fuente No.2, basados en la facturación de CFE; pero hay que considerar que la topología de la Nueva Red de Distribución Subterránea de Ciudad Universitaria en 23 kV será diferente a la actual. Por lo tanto, se utilizó la información de la fuente No.1 inciso b de acuerdo a la topología actual para obtener un nuevo valor tomando en cuenta la nueva topología y poder utilizarlo para determinar las características de los alimentadores.

Como ya se menciona, los valores de las demandas máximas resultantes de la fuente No.1 **inciso b** basada en la topología actual de la red son muy parecidos a los valores obtenidos en la fuente No.2, lo que hace posible obtener un valor del error de medición, y considerarlo en las demandas máximas basadas en la topología de la nueva red, como se muestra a continuación.

$$SG1 \quad \frac{7.992 \text{ MVA}}{8.585 \text{ MVA}} = 0.9309$$

$$SG2 \quad \frac{6.382 \text{ MVA}}{6.584 \text{ MVA}} = 0.9693$$

Porcentaje de error:

$$SG1 \quad 0.9309 \times 100 = 93.09 \quad 100 - 93.09 = 6.91\%$$

$$SG2 \quad 0.9693 \times 100 = 96.93 \quad 100 - 96.93 = 3.068\%$$

También se puede observar que el valor de SG-2 de la topología actual (6.382 MVA) es similar a las demandas máximas de acuerdo a la nueva topología; por lo tanto se tomó la decisión de incrementar los valores de demanda máxima un 3.068 % como se muestra enseguida.

$$SG1 = (6.847 \times 0.03068) + 6.847 = 7.057 \text{ MVA}$$

$$SG2 = (6.344 \times 0.03068) + 6.344 = 6.538 \text{ MVA}$$

Considerando un factor de crecimiento a 30 años se tienen como demandas máximas finales:

$$SG1 = 9.1 \text{ MVA}$$

$$SG2 = 8.5 \text{ MVA}$$

4.6.- Criterio por Ampacidad.

Tomando en cuenta los valores del punto anterior y la demanda máxima de la SG-4 (**Ver Apéndice C**) se pueden utilizar las tablas de capacidad de conducción de corriente (Ampacidad), de la NOM-001-SEDE-2005 para proponer el calibre de un cable y basados en sus dimensiones nominales iniciar los cálculos:

Se considerara el calibre 3/0 porque de acuerdo a la norma es el correspondiente a las corrientes $I_1=228.7 A$ e $I_2=244.99 A$ (Indicadas en la Tabla de abajo). De acuerdo a un primer cálculo la capacidad de conducción de corriente se concluyó, que por este criterio, el calibre 3/0 es el adecuado para el alimentador No. 1 así como para el alimentador No. 2, [Ver Figura 4.1] los datos resultantes se muestran a continuación.

ALIMENTADOR 1 (SG-1)	ALIMENTADOR 2 (SG-2 y SG-4)
SG-1 = 9.1 MVA	SG-2 + SG-4 = 8.5 MVA+1.26 MVA = 9.76 MVA
$I_1=228.7 A$	$I_2=244.99 A$

Valores para el cable de calibre 3/0 (ALIMENTADOR 1 y ALIMENTADOR 2) de acuerdo a los datos mostrados:

A continuación los siguientes valores, se obtuvieron a partir de las ecuaciones mostradas en el del Capítulo2 “Ampacidad” (Ver Capítulo 2).

Resistencia del conductor por corriente alterna $R_{ca} = R$.

$$R_{ca} = 0.2627 \text{ en } \Omega/m$$

Resistencia térmica del aislamiento:

$$R_i = 0.54072 \text{ en } ^\circ C m/W$$

Resistencia térmica efectiva entre el ducto y el ambiente.

$$R_e' = 1.0625 \text{ en } ^\circ\text{Cm}/\text{W}$$

Resistencia térmica entre la pantalla metálica y el ducto por unidad de longitud, en $^\circ\text{Cm}/\text{W}$.

$$R_{sc} = 1.8162 \text{ en } ^\circ\text{Cm}/\text{W}$$

Temperatura del ambiente, en $^\circ\text{C}$. Para nuestro caso esta temperatura es la del terreno a la profundidad de instalación.

$$T_a = 25 ^\circ\text{C}$$

Temperatura del conductor en $^\circ\text{C}$

$$T_c = 90 ^\circ\text{C}$$

Incremento de temperatura debido al calor generado en el aislamiento $^\circ\text{C}$

$$\Delta T_d = 0.085 ^\circ\text{C}$$

Razón de pérdidas en las pantallas o cubiertas metálicas.

$$q_s = 1.1187$$

Como el ducto no es metálico.

$$q_s = q_e$$

$$q_e = 1.1187$$

Sustituyendo los valores en la ecuación de Ampacidad.

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R(R_i + q_s R_{sc} + q_e R_e')}}}$$

$$I = 251.78 A$$

4.7.- Criterio por caída de tensión.

Valores para el cable de calibre 3/0 (ALIMENTADOR 1):

A continuación los siguientes valores, se obtuvieron de las ecuaciones del Capitulo 3 "Caída de tensión" (Ver Capitulo 3).

$$R = R_{ca} = 0.2627 \text{ en } \Omega/m$$

$$X_L = 0.1425 \text{ en } \Omega/Km$$

$$L_1 = 2.7 \text{ en } Km$$

$$\cos \phi = 0.9$$

$$\text{sen } \phi = 0.43$$

$$E_r(f - N) = 13270 \text{ en } V$$

$$I = 228.7 \text{ en } A$$

Sustituyendo los valores anteriores en la siguiente ecuación, obtenemos la diferencia de tensión existente al final del alimentador, con lo que se puede obtener el porcentaje de caída de tensión.

$$\Delta V = [(E_r \cos\phi + IRL)^2 + (E_r \sin\phi + IXL)^2]^{\frac{1}{2}} - E_r$$

$$\Delta V = 155.48 V$$

Esto equivale al 1.17% de la tensión de fase a neutro, siendo menor al valor que indica la norma.

Valores para el cable de calibre 3/0 (ALIMENTADOR 2):

A continuación los siguientes valores, se obtuvieron de las ecuaciones del Capitulo IV Caída de tensión (Ver Capitulo IV).

$$R = R_{ca} = 0.2726 \text{ en } \Omega/m$$

$$X_L = 0.135 \text{ en } \Omega/Km$$

$$L_1 = 1.4 \text{ en } Km$$

$$\cos \phi = 0.9$$

$$\sin \phi = 0.43$$

$$E_r(f - N) = 13270 V$$

$$I = 244.99 A$$

Sustituyendo los valores anteriores en la siguiente ecuación, obtenemos la diferencia de tensión existente al final del alimentador, con lo que se puede obtener el porcentaje de caída de tensión.

$$\Delta V = [(E_r \cos\phi + IRL)^2 + (E_r \sin\phi + IXL)^2]^{\frac{1}{2}} - E_r$$

$$\Delta V = 71.519 V$$

Esto equivale al 0.538 %, siendo menor al valor que indica la norma.

4.8.- Características de los alimentadores

A continuación se muestran las características de los cables seleccionados para cada alimentador y las dimensiones del banco de ductos.

Alimentador 1 y Alimentador 2

Dimensiones del cable seleccionado	
	DESCRIPCIÓN
	<p>Cable vulcanel para ambientes secos, aislamiento de XLP con nivel de aislamiento del 133%, de 5 kV a 35 k, conductor de cobre compacto y cubierta de PVC.</p> <p>Calibre: 3/0</p> <p>Área de la sección transversal en (mm²): 85.00</p> <p>Número de alambres del conductor: 19</p> <p>Diámetro del conductor (mm) :10.69</p> <p>Espesor nominal del aislamiento (mm): 8.10</p> <p>Diámetro nominal sobre el aislamiento (mm): 28.22</p> <p>Número de alambres de la pantalla metálica: 9</p> <p>Calibre de los alambres de la pantalla metálica: 20 AWG</p> <p>Área de la sección transversal de la pantalla metálica (mm²): 4.67</p> <p>Diámetro exterior nominal (mm): 36.77</p>

4.9.- Verificación de los alimentadores por Corto Circuito

Determinado el conductor por cálculo de Ampacidad y caída de tensión, se necesita probar este mismo por Corto Circuito, tomando en cuenta la corriente de corto circuito permisible en el conductor para cables con aislamiento de PE, PVC, XLPE o EPR; ya que es necesario verificar dicho cable con base en las condiciones de corto circuito del sistema (magnitud y tiempo). El área A_c del conductor requerida en estas condiciones se calcula por medio de la siguiente ecuación.

$$\left[\frac{I_{cc}}{A_c}\right]^2 t = 0.0125 \log \left[\frac{T_2 + 228}{T_1 + 228}\right]$$

Donde

I es la corriente de corto circuito en amperes.

A_c es el área del conductor en circular mils.

t es el tiempo de duración del corto circuito en segundos.

T_1 es la temperatura máxima de operación: 90 °C.

T_2 es la temperatura máxima de corto circuito: 250 °C.

De acuerdo a los Niveles de Corto Circuito en la Subestación de Distribución "Odón de Buen"(Ver Tabla 4.8), {B-8}

Tabla 4.8.- Niveles de Corto Circuito O.B.

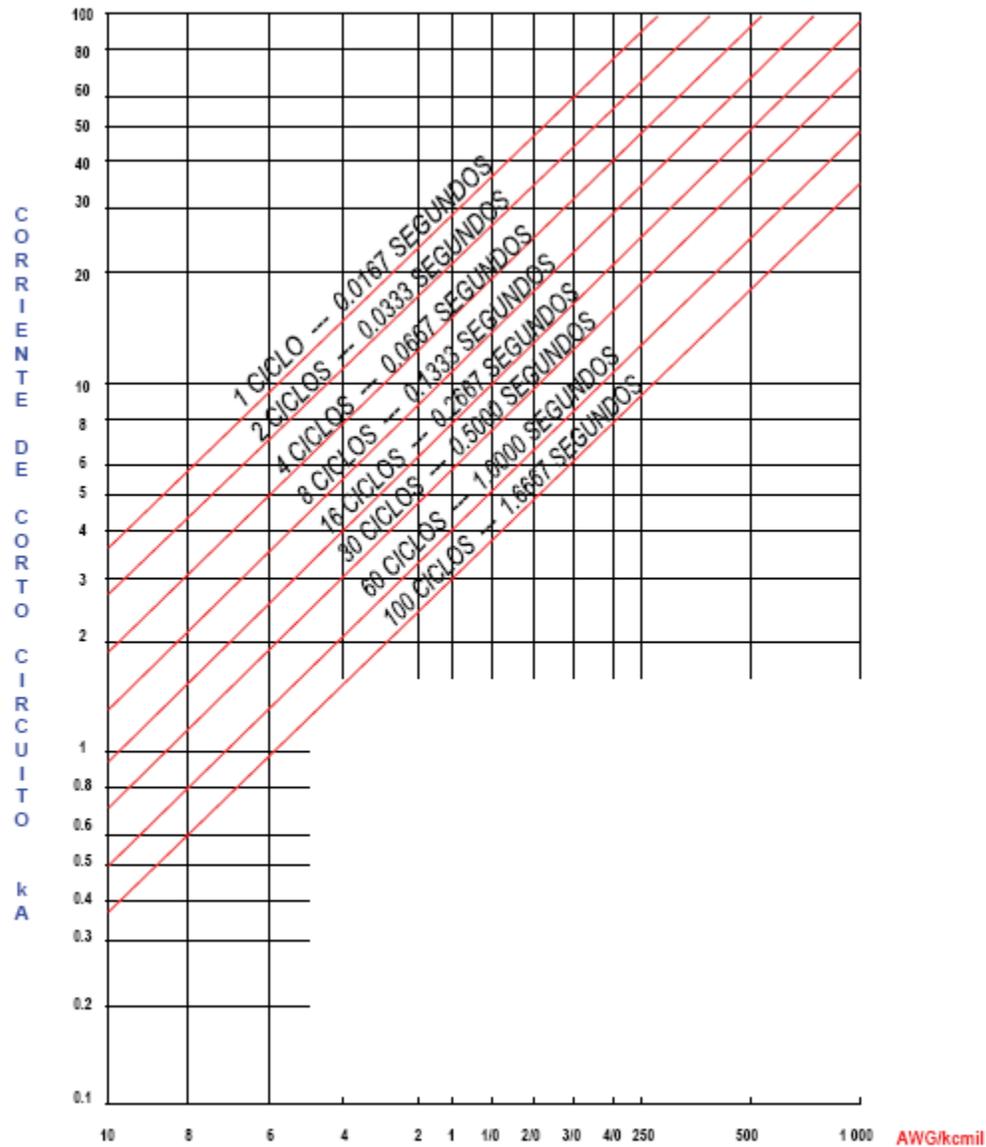
Niveles de Corto Circuito en la Subestación de Distribución "Odón de Buen en MVA	
$S_{cc\ 3\phi}$	356.41
$S_{cc\ 1\phi}$	347.65

Se tiene una corriente de corto circuito de:

$$I_{cc} = 8.9\ kA$$

Tomando la siguiente grafica en la cual nos muestra de acuerdo al tiempo de liberación de la falla y de la corriente de corto circuito mencionada, se tiene que:

$$t = 1.666 \text{ en seg}$$



De acuerdo con los datos anteriores de I_{cc} y t , despejando A_c tenemos que el área del conductor requerida para condiciones de corto circuito es:

$$A_c = 156,466.95 \text{ kcmil}$$

Que equivale a 78.21 mm^2 , lo cual para un cable de 3/0 el área es de 85.01 mm^2 , siendo aun mayor, verificando que el área del cable propuesto soportara las condiciones de corto circuito.

En el Apéndice A se muestran mas métodos para verificar el conductor por Corto Circuito (Ver **Apéndice A**)

4.10.- Sobrecarga

Los cables de energía están expuestos a condiciones anormales de operación, como son las corrientes de sobrecargas, así como las de corto circuito.

Si en un determinado momento se sobrepasa la corriente nominal del sistema, la respuesta térmica no es instantánea, es decir, la temperatura de operación del cable va aumentando poco a poco hasta alcanzar su nivel máximo de equilibrio térmico (calor disipado), por esta razón se han establecido normas que se enfocan a la posibilidad de sobrecarga durante un tiempo limitado en una emergencia, en la Tabla 4.9, se mencionan los valores de temperatura recomendados para las principales especificaciones de cables, en condiciones de operación de sobrecarga.

Tabla 4.9.- Temperatura de sobrecarga de los aislamientos de cables de energía en media tensión

Tipo de aislamiento	Temperatura máxima de sobrecarga en °C
Papel impregnado:	
1 Kv	115
2-9 kV	110
10-15 kV	100
10-29 kV	110
Vulcanel EP	130
Vulcanel XLP	130

Calculando la sobrecarga permisible, con la siguiente ecuación tenemos:

$$I_{sc} = \ln \sqrt{\frac{T_o - T_a}{T_c - T_a} \times \frac{R}{R_o}}$$

Donde

I_{sc} es el valor de la corriente de sobrecarga permisible en el cable

T_o es la temperatura máxima de sobrecarga del cable 130 °C

T_c es la temperatura de operación normal del cable 90 °C

T_a es la temperatura ambiente 30 °C

R es el factor de corrección de la resistencia del conductor, a la temperatura de operación normal.

R_o factor de corrección de la resistencia del conductor, a la temperatura máxima de sobrecarga.

Sustituyendo en la ecuación anterior tenemos para los alimentadores:

Alimentador 1

$$I_{sc} = 232.2 \times 1.218$$

Alimentador 2

$$I_{sc} = 244.99 \times 1.218$$

Para un periodo no mayor a 2 horas.

APÉNDICE A

CORTO CIRCUITO



INTRODUCCIÓN

En este apéndice se abordará el tema de cortocircuito definiendo inicialmente las fuentes que contribuyen a la corriente de cortocircuito en un sistema; se mostrará el desarrollo del estudio de sistemas eléctricos a partir de valores en por unidad y sus ventajas, además de la aplicación del método de componentes simétricas en los distintos tipos de fallas que se pueden presentar en el sistema.

Las diferentes formas de falla pueden surgir debido a las condiciones en que se encuentre situado el circuito ó a los problemas a los que se encuentre expuesto; Por ejemplo, el intento de robo de cables para la extracción de cobre (Ver Figura A.1).



Figura A.1.- Falla trifásica debida al intento de robo de cables en un sistema de media tensión.

Las corrientes de falla tienen un valor más elevado mientras más cerca se encuentre de la fuente suministradora, por lo tanto, el valor que debemos considerar para verificar el calibre del conductor que alimentara a las Subestaciones Generales 1,2, 4 y 5 de Ciudad Universitaria, no es el nivel de cortocircuito de las subestaciones mencionadas, sino que debe utilizarse el nivel de cortocircuito de la Subestación de donde proviene la energía (Odón de Buen) hacia las subestaciones generales. Para comprobar esto, posteriormente se desarrollará el cálculo de cortocircuito para cada una de las subestaciones con ayuda de las herramientas mostradas durante este Apéndice.

A.1.- Elementos que contribuyen a aumentar la corriente de corto circuito

Para los efectos de evaluar las máximas corrientes de fallas en sistemas de distribución, sólo se calculan las corrientes de cortocircuito trifásico y monofásico. Las fallas monofásicas a tierra pueden generar corrientes de falla cuya magnitud pueden superar a la corriente de falla trifásica. Sin embargo, esto es más frecuente que ocurra en sistemas de transmisión o de distribución en media tensión, sobre todo cuando la falla se ubica cerca de la subestación. Es poco frecuente que la corriente de falla monofásica supere en amplitud la corriente generada por una falla trifásica.

Para evaluar la corriente de cortocircuito de un sistema de potencia es necesario identificar los diferentes equipos que van a contribuir a la corriente de falla.

Las principales fuentes que contribuyen a aumentar las corrientes de cortocircuito son las siguientes:

- a) Empresa suministradora de energía; al ser la principal fuente de todo el sistema en cuestión.

- b) Generadores síncronos; ya que después del cortocircuito sigue recibiendo potencia por su eje mecánico, y el circuito de campo se mantiene excitado con corriente continua, la tensión inducida se mantiene constante y la corriente en el devanado estator permanece, contribuyendo a la corriente de falla hasta alcanzar su estado estacionario o ser liberado por el sistema de protecciones.
- c) Motores síncronos; al producirse un cortocircuito en la barra de alimentación de un motor sincrónico, la tensión del sistema disminuye reduciendo el flujo de potencia activa que entrega al motor. Al mismo tiempo, la tensión inducida hace que se invierta el sentido de giro de la corriente de estator, circulando por lo tanto desde el motor hacia el punto de falla. La inercia tanto del motor como de la carga, junto a la mantención de la corriente de campo, hace que el motor se comporte como un generador aportando corriente al cortocircuito.
- d) Motores de inducción; tanto los motores de inducción con rotor jaula de ardilla como los de rotor bobinado, pueden contribuir a la corriente de falla. Esta corriente se genera debido a la existencia de energía cinética almacenada en el rotor y la carga, más la presencia de la tensión inducida producto del campo magnético giratorio presente en el entrehierro. Debido a que el campo magnético inducido en el motor de inducción no es mantenido en forma externa, este se nula rápidamente, razón por la cual la corriente aportada a la falla sólo dura algunos ciclos.

A.2.- Valores en por unidad de un sistema eléctrico de potencia

Un sistema eléctrico de potencia está conformado por una gran variedad de elementos como lo son: plantas generadoras, transformadores, cargas conectadas al sistema eléctrico, líneas de transmisión y distribución, entre otros; por lo cual, en algunas ocasiones se dificulta el estudio y análisis del sistema, debido a que en el mismo existen diferentes niveles de tensión. Por lo tanto, se plantean cálculos para los sistemas, tratando de simplificar todas las cantidades eléctricas; impedancias, tensiones, corrientes, potencias, etc. Esto se puede lograr si se expresa las cantidades eléctricas como el cociente de la cantidad eléctrica dividida por una base o magnitud de referencia de la misma cantidad.

$$\text{Valor en por unidad} = \frac{\text{Cantidad eléctrica}}{\text{Cantidad eléctrica base}} \quad \dots A.1$$

Las cantidades base deben escogerse de modo que las leyes eléctricas siempre se cumplan, tanto en la red del circuito equivalente en por unidad como en el original.

Tales leyes son:

Ley de ohm

Ley de joule

Ley de kirchoff

En la metodología aplicada en sistemas en por unidad se consideran cuatro cantidades principalmente

- a) Tensión base V_B
- b) Corriente base I_B
- c) Potencia base S_B
- d) Impedancia base Z_B

Las cantidades en por unidad se obtienen de la siguiente forma:

$$V_{pu} = \frac{V}{V_B} \quad \dots A.2$$

$$I_{pu} = \frac{I}{I_B} \quad \dots A.3$$

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_B} \quad \dots A.4$$

Donde V , I y Z son las cantidades originales

Cabe mencionar que como la base de una cantidad debe estar en las mismas unidades que la cantidad original, las cantidades en por unidad son números adimensionales.

Si se seleccionan las bases adecuadas debe cumplirse que:

$$V_B = I_B Z_B \quad \dots A.5$$

Y

$$S_B = V_B I_B \quad \dots A. 6$$

Para poder trabajar los sistemas eléctricos en por unidad se necesita elegir dos cantidades base.

Seleccionadas las bases y si se trata de un circuito trifásico se pueden obtener las otras dos restantes de la manera siguiente:

$$I_B = \frac{S_{3\phi B}}{\sqrt{3} V_{lB}} \quad \dots A. 7$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} = \frac{V_{lB}^2}{S_{3\phi B}} \quad \dots A. 8$$

Donde

$S_{3\phi B}$ es la potencia base trifásica.

V_{lB} es la tensión entre fases.

Los demás términos son los ya mencionados.

Generalmente S_B se da en MVA y V_B en k, por lo tanto las corrientes y las impedancias bases puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones en sus unidades correspondientes:

$$I_B = \frac{kVA_B}{\sqrt{3} kV_B} [A] \quad \dots A. 9$$

$$Z_B = \frac{(kV_B \times 10^3)^2}{MVA_B \times 10^6} = \frac{kV_B^2}{MVA_B} [\Omega] \quad \dots A. 10$$

A.2.1 Conversión de impedancias y reactancias en por unidad a nuevas bases.

Como ya se mencionó en sistemas en por unidad se puede obtener un valor en por unidad mediante la siguiente ecuación.

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_B} \quad \dots A.11$$

Teniendo una tensión base V_B y una potencia base S_B , la impedancia base Z_B se puede definir como:

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} \quad \dots A.12$$

Por lo tanto, la impedancia en por unidad puede expresarse de la manera siguiente:

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_B} = \frac{Z S_B}{V_B^2} \quad \dots A.13$$

En algunos elementos del sistema eléctrico como generadores y transformadores se presentan los datos de impedancia o de la reactancia del aparato en la información contenida en la placa. Esta impedancia de placa suele estar referida a una base de potencia igual a la capacidad del equipo y a una base de tensión igual a la tensión nominal del equipo.

En ocasiones se presenta el caso en el que los equipos que se encuentran conectados a una misma red están referenciados a distintas bases ó que las bases a las que están referenciadas las impedancias por unidad no son las adecuadas para un problema determinado. En estos casos es necesario referenciar algunas o todas las impedancias a nuevas bases.

De manera directa se puede realizar el cambio de base como se muestra a continuación.

$$Z = Z_{PU} * Z_B = Z'_{PU} * Z'_B \quad \dots A.14$$

Donde

Z es la impedancia en Ω

Z_{PU} es la impedancia en por unidad referida a la base Z_B

Z_B es la impedancia base original

Z'_{PU} es la impedancia en por unidad referida a la base Z'_B

Z'_B es la impedancia base nueva

Despejando Z'_{PU} de la ecuación anterior obtenemos:

$$Z'_{PU} = Z_{PU} * \frac{Z_B}{Z'_B} \quad \dots A.15$$

$$Z'_{PU} = Z_{PU} * \left(\frac{V_B}{V'_B}\right)^2 * \frac{S'_B}{S_B} \quad \dots A.16$$

Es más usual encontrar esta ecuación (A.16) en la forma siguiente:

$$Z_{PU_2} = Z_{PU_1} \left(\frac{MVA_{BASE_2}}{MVA_{BASE_1}} \right) \left(\frac{kV_{BASE_1}}{kV_{BASE_2}} \right)^2 \quad A. 17$$

Para hacer más práctica la determinación del cambio de bases, a continuación se presentan las ecuaciones utilizadas para el cambio de base de las reactancias de los principales elementos de un sistema eléctrico de potencia, para que posteriormente con ayuda de algunos de los datos obtenidos a través de estas ecuaciones se puedan calcular las corrientes de falla mediante el método de componentes simétricas mostrado en el desarrollo de este apéndice {B-9}

a) Cambios de base

Compañía suministradora.

$$X_1 = X_2 = \frac{E_{a1}^2}{SCC_{3\phi}} x S_B \quad \dots A. 18$$

$$X_0 = \frac{3 x S_B x E_{a1}^2}{SCC_{1\phi}} - 2X_1 \quad \dots A. 19$$

Línea de transmisión o distribución.

$$Z_B = \frac{kV^2}{MVA_B} \quad \dots A. 20$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X \Omega}{Z_B \Omega} \quad \dots A. 21$$

$$X_2 = \frac{X \Omega}{Z_B \Omega} \quad \dots A. 22$$

Transformadores.

$$X_1 = X_2 = X_0 = X_{1,2,0 \text{ original}} \left(\frac{MVA_{BASE2}}{MVA_{BASE1}} \right) \left(\frac{kV_{BASE1}}{kV_{BASE2}} \right)^2 \quad \dots A. 23$$

$$Z_B = \frac{kV^2}{MVA_B} \quad \dots A. 24$$

$$X_n = \frac{X \Omega}{Z_B \Omega} \quad \dots A. 25$$

Motores.

$$P = P_{HP} \left(\frac{0.746 \text{ kW}}{1HP} \right) \quad \dots A. 26$$

$$S = \left(\frac{P}{\eta \times fp} \right) \quad \dots A. 27$$

$$X_1 = X_2 = X_{1,2 \text{ original}} \left(\frac{MVA_{BASE2}}{MVA_{BASE1}} \right) \left(\frac{kV_{BASE1}}{kV_{BASE2}} \right)^2 \quad \dots A. 28$$

$$X_0 = X_{0 \text{ original}} \left(\frac{MVA_{BASE2}}{MVA_{BASE1}} \right) \left(\frac{kV_{BASE1}}{kV_{BASE2}} \right)^2 \quad \dots A. 29$$

A.2.2.- Ventajas de las Cantidades en por unidad.

Algunas de las ventajas de usar cantidades en por unidad son:

- 1.- Su representación resulta ser una forma más directa de comparar datos, ya que las magnitudes relativas se pueden comparar directamente.
- 2.- El valor en por unidad para un transformador, es el mismo, ya sea que se refiera al lado primario o al lado secundario.
- 3.- La impedancia en por unidad de un transformador en un sistema trifásico, es la misma, independientemente del tipo de conexión que tenga (delta-estrella, delta-delta, etc.).
- 4.- El método en por unidad, es independiente de los cambios de tensión y de los desfasamientos.
- 5.- Los fabricantes de equipos eléctricos, por lo general, especifican la impedancia en por unidad a la base de sus datos de placa (potencia en kVA, tensión en kV) por lo que estos valores se pueden usar directamente en sus propias bases.
- 6.- Los valores en por unidad de impedancia de los equipos caen dentro de una banda muy estrecha, en tanto que los valores en Ω lo hacen en un rango muy amplio. Por esta razón, es más frecuente encontrar valores característicos de impedancias de los equipos en por unidad.

7. Hay menos posibilidad de confusión entre valores trifásicos o monofásicos o entre valores de fases o de fase a neutro.
8. Los valores en por unidad, resultan ideales para los estudios en simuladores digitales.
9. Para los estudios de corto circuito, las tensiones de las fuentes se pueden tomar como 1.0 por unidad.
10. El producto de cantidades en por unidad, da como resultado una cantidad en por unidad.

A.3.- Cálculo de fallas en sistemas trifásicos de potencia

A.3.1 Método de componentes simétricas en sistemas trifásicos desequilibrados

Para la solución de un sistema desequilibrado se puede recurrir a una sustitución muy práctica, la cual consiste en sustituir al sistema original por dos sistemas trifásicos equilibrados y un sistema en el que los tres fasores son iguales y están en fase. A este método se le conoce como método de componentes simétricas. {B-7}.

Para iniciar con la explicación de este método se puede aplicar un operador definido como: a siendo este un número complejo de magnitud unitaria y un argumento de 120° , lo que es igual a $\frac{2\pi}{3}$.

Cuando hacemos uso del operador a multiplicándolo por un fasor cualquiera, dará como resultado un fasor de igual magnitud pero desfasado 120° en sentido positivo.

Aplicando la propiedad de multiplicación de fasores al operador a podemos obtener lo siguiente:

La multiplicación de fasores se define de la siguiente manera:

$$Z_1 Z_2 = |Z_1| e^{j\theta_1} * |Z_2| e^{j\theta_2} \quad \dots A.30$$

$$Z_1 Z_2 = |Z_1| |Z_2| e^{j(\theta_1 + \theta_2)} \quad \dots A.31$$

Aplicándola al operador a obtenemos:

$$a = 1 \angle 120^\circ = \cos 120^\circ + j \operatorname{sen} 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ} \quad \dots A.32$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = \cos 240^\circ + j \operatorname{sen} 240^\circ = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j240^\circ} \quad \dots A.33$$

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = \cos 360^\circ + j \operatorname{sen} 360^\circ = 1 + j0 = e^{j360^\circ} \quad \dots A.34$$

Esto lo podemos representar como se ve en la Figura A.2

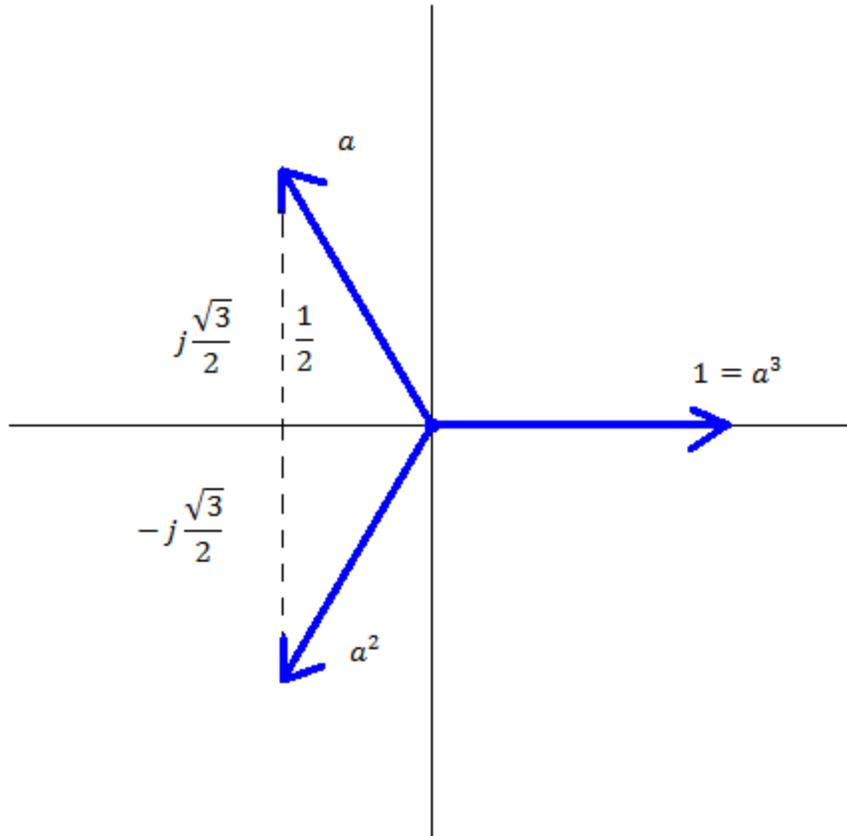


Figura A.2.- Representación gráfica del operador a

Tomando en cuenta las características del operador a , podemos hacer uso del mismo para describir un sistema trifásico senoidal equilibrado como se muestra en la Figura A.3

$$\tilde{V}_a = 1 \tilde{V}_a \quad \dots A.35$$

$$\tilde{V}_b = a^2 \tilde{V}_a \quad \dots A.36$$

$$\tilde{V}_c = a \tilde{V}_a \quad \dots A.37$$

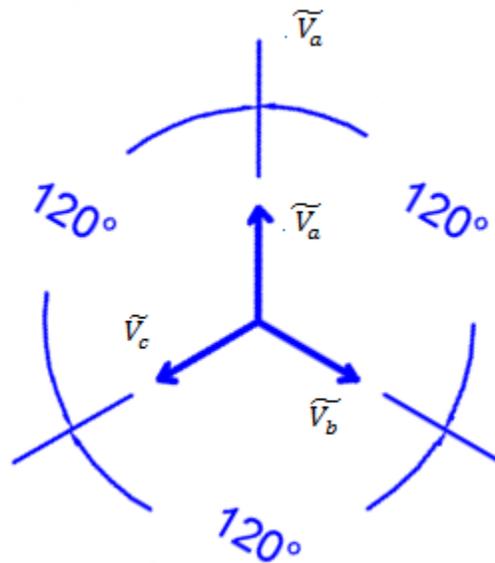


Figura A.3.- Sistema de tres fasores que representa los voltajes de un sistema trifásico equilibrado.

A.3.2.- Componentes simétricas de un sistema trifásico desequilibrado.

Cualquier sistema trifásico desequilibrado puede remplazarse por la suma de tres sistemas de fasores simétricos tales como:

- a) Sistema de secuencia positiva.
- b) Sistema de secuencia negativa

c) Sistema de secuencia cero.

a) Sistema de secuencia positiva

El sistema de secuencia positiva es un sistema trifásico equilibrado que puede representarse por tres fasores de igual modulo, que forman un ángulo entre dos fasores consecutivos de 120° y que tienen una secuencia de fase a, b, c.

A continuación se representa con ayuda del operador a un sistema de fasores de secuencia positiva.

$$\tilde{I}_{b1} = a^2 \tilde{I}_{a1} \quad \dots A.38$$

$$\tilde{I}_{c1} = a \tilde{I}_{a1} \quad \dots A.39$$

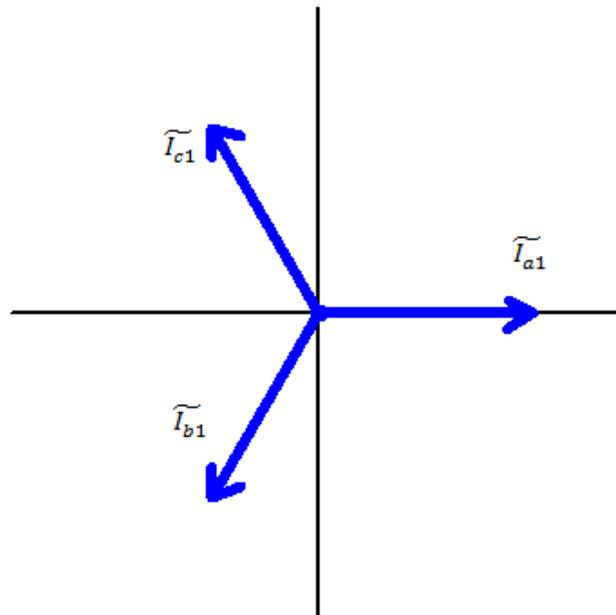


Figura A.4.- Sistema de fasores de secuencia positiva

b) Sistema de secuencia negativa

Es un sistema trifásico que puede representarse por tres fasores de igual modulo, que forman un ángulo entre dos fasores consecutivos de 120° y que tienen una secuencia de fase a, c, b.

De igual manera que en el sistema de secuencia positiva, podemos representar un sistema de fasores de secuencia negativa con ayuda de el operador a .

$$\tilde{I}_{b2} = a^2 \tilde{I}_{a2} \quad \dots A.40$$

$$\tilde{I}_{c2} = a \tilde{I}_{a2} \quad \dots A.41$$

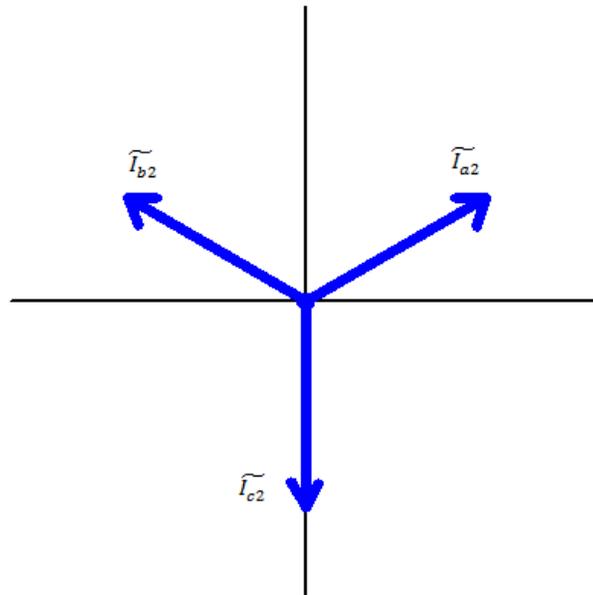


Figura A.5.- Sistema de fasores de secuencia negativa

c) Sistema de secuencia cero

Es un sistema trifásico que puede representarse por tres fasores de igual modulo y en fase. Como se muestra en la Figura A.6

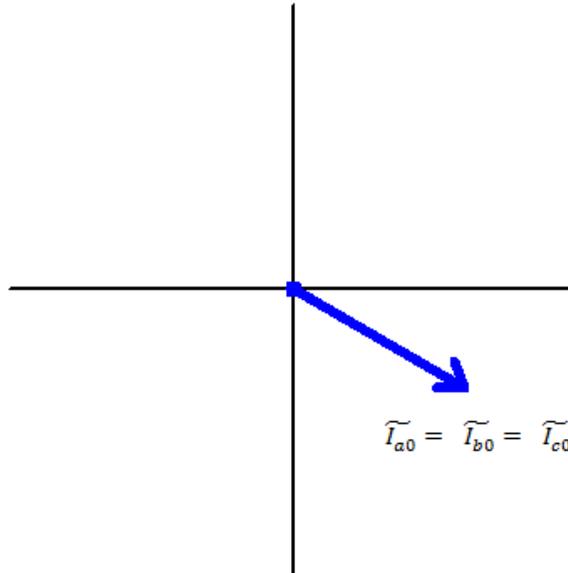


Figura A.6.- Sistema de fasores de secuencia cero

En general, cualquier sistema de tres fasores desequilibrados puede expresarse como la suma de tres sistemas de fasores: secuencia positiva, negativa y cero.

$$\tilde{I}_a = \tilde{I}_{a1} + \tilde{I}_{a2} + \tilde{I}_{a0} \quad \dots A.42$$

$$\tilde{I}_b = \tilde{I}_{b1} + \tilde{I}_{b2} + \tilde{I}_{b0} \quad \dots A.43$$

$$\tilde{I}_c = \tilde{I}_{c1} + \tilde{I}_{c2} + \tilde{I}_{c0} \quad \dots A.44$$

Cuando sumamos los tres sistemas; de secuencia positiva, secuencia negativa y de secuencia cero obtenemos los siguientes gráficos.

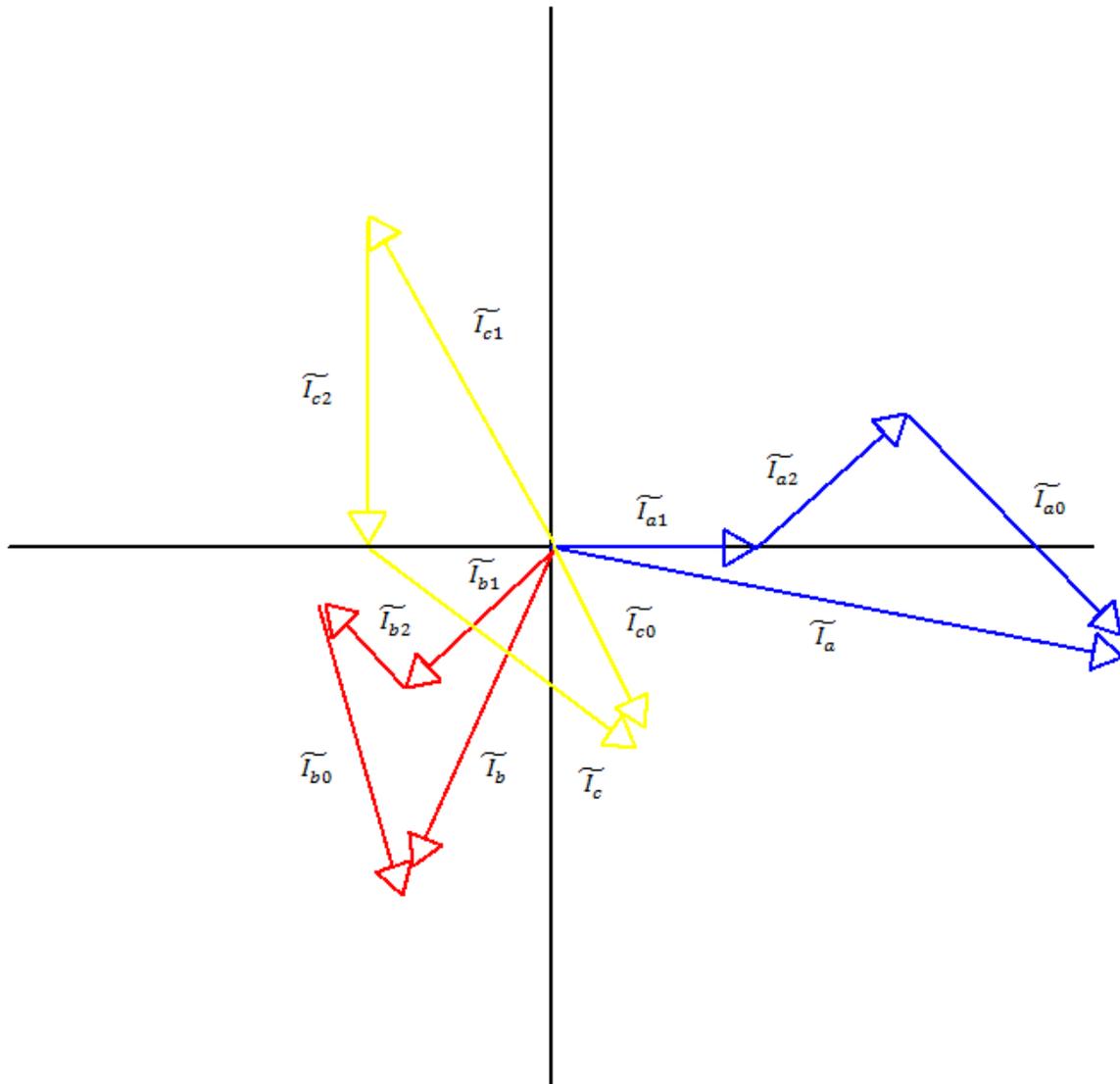


Figura A.7.- Sistema de fasores desequilibrados obtenidos sumando los sistemas de secuencia positiva, negativa y cero

A.3.2.1.- Obtención de las componentes simétricas de secuencia positiva, negativa y cero a partir de los tres fasores desequilibrados

Para obtener las componentes de secuencia positiva, negativa y cero podemos partir de las ecuaciones (A.42, A.43, A.44) y aplicando el operador a obtenemos:

$$\widetilde{I}_a = \widetilde{I}_{a1} + \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0} \quad \dots A.45$$

$$\widetilde{I}_b = a^2 \widetilde{I}_{a1} + a \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0} \quad \dots A.46$$

$$\widetilde{I}_c = a \widetilde{I}_{a1} + a^2 \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0} \quad \dots A.47$$

Después podemos expresar estas mismas ecuaciones en forma matricial obteniendo:

$$\begin{bmatrix} \widetilde{I}_a \\ \widetilde{I}_b \\ \widetilde{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widetilde{I}_{a1} \\ \widetilde{I}_{a2} \\ \widetilde{I}_{a0} \end{bmatrix} \quad \dots M1$$

Sumando las ecuaciones (A.45, A.46, A.47) y tomando en cuenta que $1 + a + a^2 = 0$ se conseguimos el siguiente conjunto de matrices:

$$\begin{bmatrix} \widetilde{I}_{a1} \\ \widetilde{I}_{a2} \\ \widetilde{I}_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widetilde{I}_a \\ \widetilde{I}_b \\ \widetilde{I}_c \end{bmatrix} \quad \dots M2$$

Podemos denominar la siguiente matriz de esta forma:

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots M3$$

Y podemos aplicarla para relacionar las tensiones con sus componentes simétricas.

$$[\widetilde{V}_{abc}] = [A][\widetilde{V}_{a_{120}}] \quad \dots A.48$$

Entonces obtenemos:

$$\begin{bmatrix} \widetilde{V}_a \\ \widetilde{V}_b \\ \widetilde{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widetilde{V}_{a1} \\ \widetilde{V}_{a2} \\ \widetilde{V}_{a0} \end{bmatrix} \quad \dots M4$$

A.3.2.2 Impedancia de secuencia positiva, negativa y cero de circuitos trifásicos simétricos.

Como se menciona con anterioridad se puede sustituir el cálculo de un sistema trifásico desequilibrado por el cálculo de tres sistemas trifásicos, dos de ellos equilibrados y el tercero con las tres corrientes de la misma magnitud y el mismo ángulo.

Si un sistema es simétrico, las corrientes de cada secuencia producen únicamente caídas de tensión de la misma secuencia. En este caso se tienen tres sistemas trifásicos independientes que pueden ser descritos por las siguientes ecuaciones.

$$\widetilde{E}_{a1} - \widetilde{V}_{a1} = Z_1 \widetilde{I}_{a1} \quad \dots A.49$$

$$\widetilde{E}_{a2} - \widetilde{V}_{a2} = Z_2 \widetilde{I}_{a2} \quad \dots A.50$$

$$\widetilde{E}_{a0} - \widetilde{V}_{a0} = Z_0 \widetilde{I}_{a0} \quad \dots A.51$$

Teniendo en cuenta que, en un sistema de energía eléctrica, las fuerzas electromotrices generadas constituyen sistemas trifásicos equilibrados de secuencia positiva y que los desequilibrios en el sistema se deben generalmente a la asimetría en la configuración del sistema, causadas por ejemplo, por una falla de aislamiento o porque la carga esta desequilibrada. Siempre que no haya desequilibrio en las fuerzas electromotrices, se tiene $\widetilde{E}_{a2} = 0$ y $\widetilde{E}_{a0} = 0$; y las ecuaciones se reducen a {B-7}:

$$\widetilde{E}_{a1} - \widetilde{V}_{a1} = Z_1 \widetilde{I}_{a1} \quad \dots A.52$$

$$-\widetilde{V}_{a2} = Z_2 \widetilde{I}_{a2} \quad \dots A.53$$

$$-\widetilde{V}_{a0} = Z_0 \widetilde{I}_{a0} \quad \dots A.54$$

Las tres ecuaciones anteriores pueden representarse mediante los tres circuitos equivalentes que se muestran a continuación.

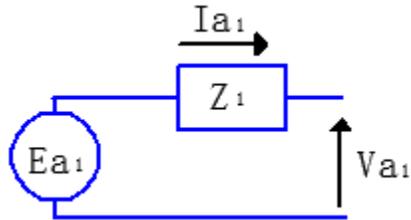


Figura A.8.- Circuito equivalente de secuencia positiva

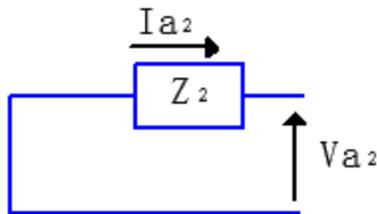


Figura A.9.- Circuito equivalente de secuencia negativa

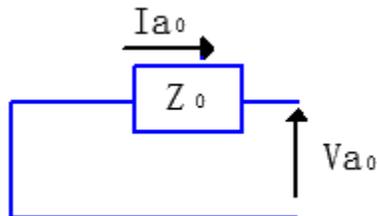


Figura A.10.- Circuito equivalente de secuencia cero

A.3.3.- Fallas en los sistemas eléctricos

A.3.3.1.- Falla monofásica a tierra a través de una impedancia

La falla de la fase a en conjunto con una impedancia, a tierra, queda representada en la Figura A.11 y enseguida se muestra la Tabla A.1 de los valores de corrientes y tensiones del sistema. Recordemos que en un cortocircuito la ó las tensiones en el punto de falla tienden a un valor nulo, mientras que la ó las corrientes tienden a elevarse de manera muy considerable.

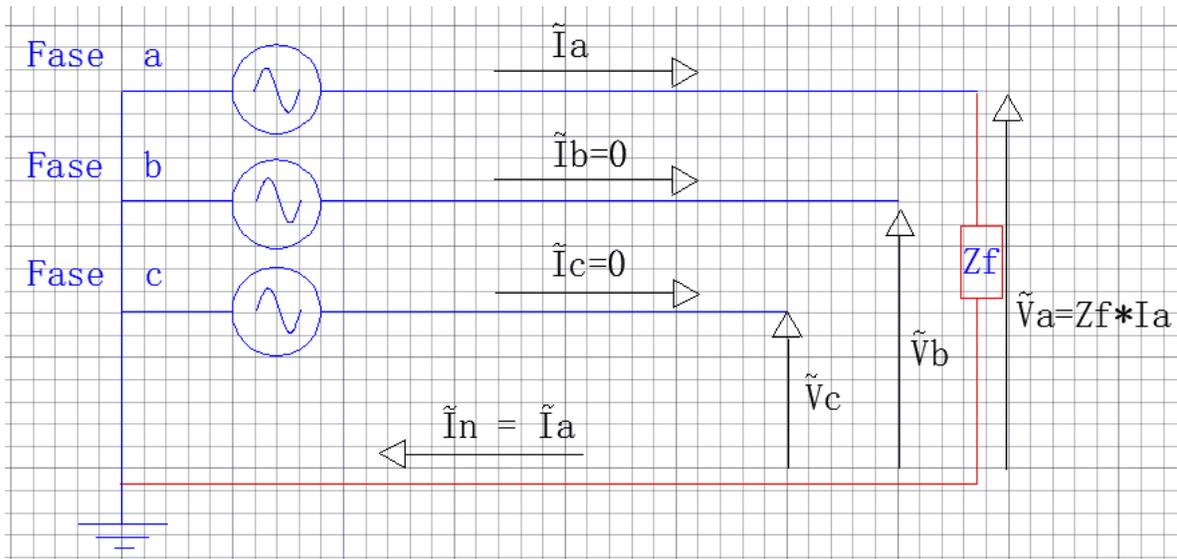


Figura A.11.- Falla monofásica a tierra a través de una impedancia.

$\tilde{I}_a \neq$	0	$\tilde{V}_a =$	$Z_f \tilde{I}_a$
$\tilde{I}_b =$	0	$\tilde{V}_b \neq$	0
$\tilde{I}_c =$	0	$\tilde{V}_c \neq$	0

Tabla A.1.- Falla monofásica a tierra a través de una impedancia.

Colocando los valores en la matriz queda la siguiente operación.

$$\begin{bmatrix} \widetilde{I}_{a1} \\ \widetilde{I}_{a2} \\ \widetilde{I}_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widetilde{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots M5$$

Resolviendo tenemos que:

$$\widetilde{I}_{a1} = \widetilde{I}_{a2} = \widetilde{I}_{a0} = \frac{\widetilde{I}_a}{3} \quad \dots A.55$$

$$\widetilde{I}_a = 3 \widetilde{I}_{a1} \quad \dots A.56$$

Ahora deben conectarse en serie las redes de secuencia (circuitos equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero) como se muestra a continuación.

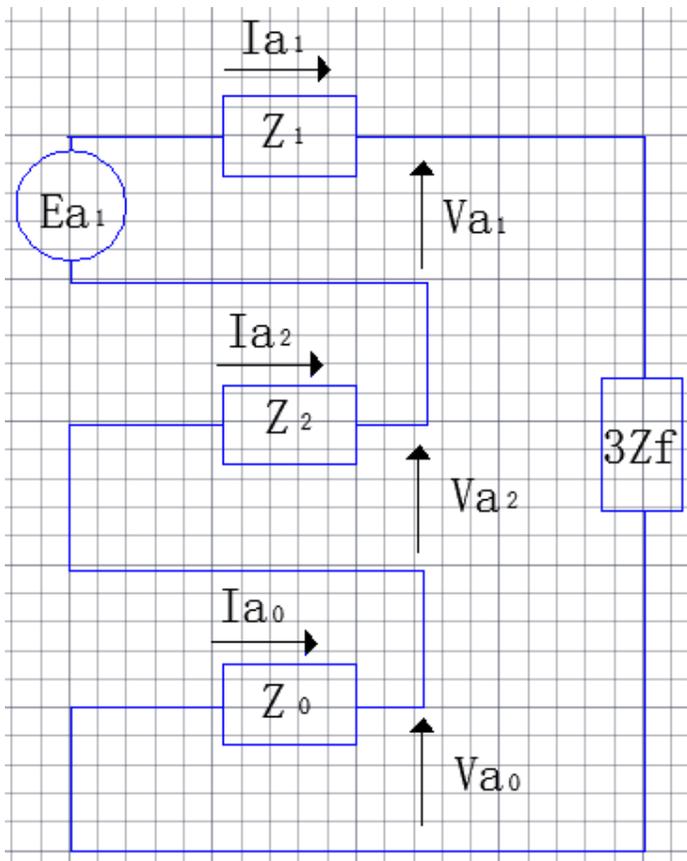


Figura A.12.- Conexión de los circuitos de secuencia positiva, negativa y cero para el caso de una falla monofásica a tierra a través de una impedancia.

En base a la Figura A.12 podemos ver que:

$$\tilde{V}_a = \tilde{V}_{a1} + \tilde{V}_{a2} + \tilde{V}_{a0} = Zf \ 3 \tilde{I}_{a1} \quad \dots A.57$$

Y también

$$\tilde{I}_{a1} = \tilde{I}_{a2} = \tilde{I}_{a0} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Zf} \quad \dots A.58$$

Por lo tanto, como:

$$\tilde{I}_a = \tilde{I}_{a1} + \tilde{I}_{a2} + \tilde{I}_{a0} = \frac{3E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Zf} \quad \dots A.59$$

$$\tilde{I}_a = \frac{3E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Zf} \quad \dots A.60$$

A.3.3.2.- Falla monofásica a tierra

La siguiente Figura (A.13) muestra una falla monofásica con conexión directa a tierra sin la intervención de una impedancia como en el caso anterior.

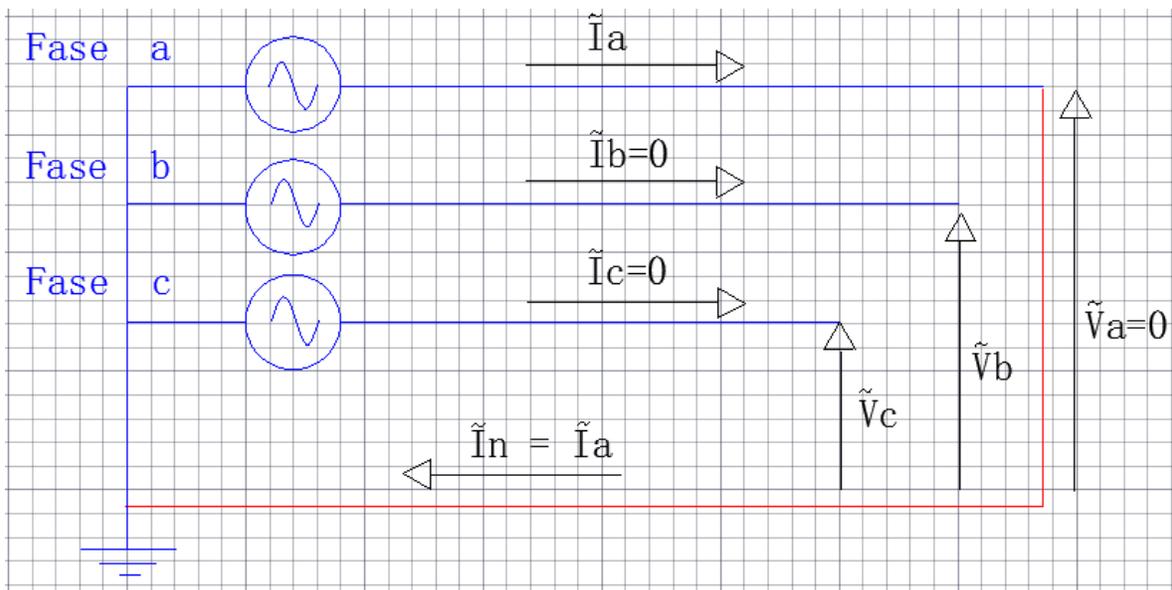


Figura A.13.- Falla monofásica a tierra

De acuerdo a la Figura (A.13) tenemos la Tabla A.2

$\tilde{I}_a \neq$	0	$\tilde{V}_a =$	0
$\tilde{I}_b =$	0	$\tilde{V}_b \neq$	0
$\tilde{I}_c =$	0	$\tilde{V}_c \neq$	0

Tabla A.2.- *Falla monofásica a tierra.*

Es fácil visualizar que la única diferencia al caso anterior es que no existe una impedancia de por medio en la falla. Por lo que podemos expresar directamente esta ecuación.

$$\tilde{I}_a = \frac{3E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad A.61$$

A.3.3.3.- *Falla bifásica a tierra a través de una impedancia*

En la siguiente figura se muestra el esquema de una falla de dos fases (a y b) a través de una impedancia con tierra; de tal manera que puedan observarse el comportamiento del sistema cuando ocurre la falla.

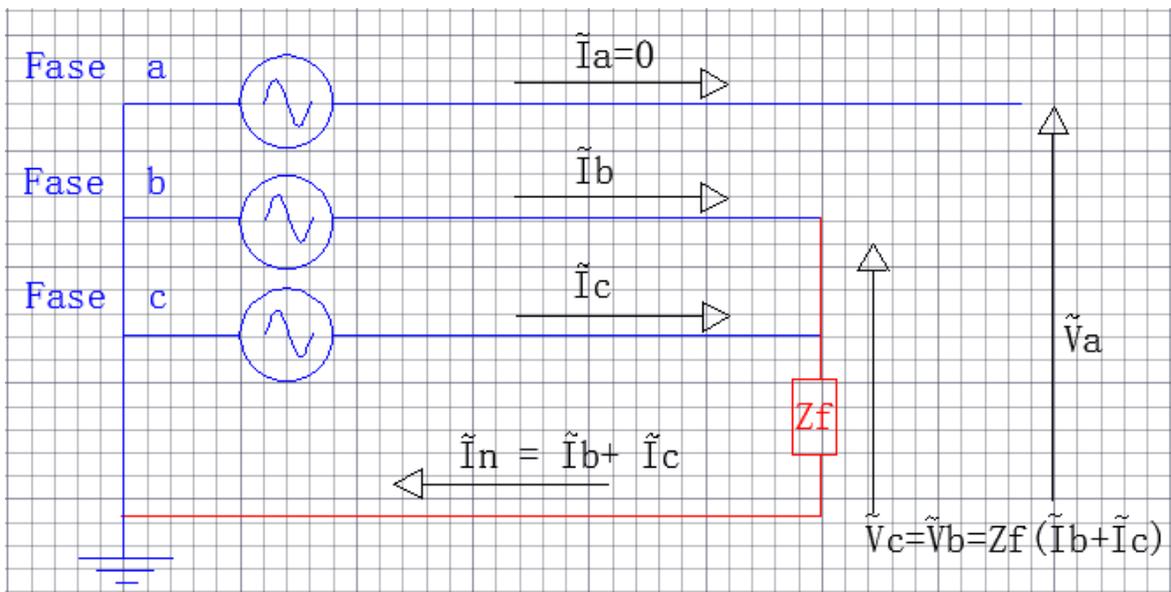


Figura A.14.- *Z1 Falla bifásica a través de una impedancia.*

Para este tipo de falla, el sistema tiene los siguientes valores de corriente y tensión. Como se indica en la Tabla A.3

$\widetilde{I}_a =$	0	$\widetilde{V}_a \neq$	0
$\widetilde{I}_b \neq$	0	$\widetilde{V}_b =$	$Zf(\widetilde{I}_b + \widetilde{I}_c)$
$\widetilde{I}_c \neq$	0	$\widetilde{V}_c =$	$Zf(\widetilde{I}_b + \widetilde{I}_c)$

Tabla A.3.- Falla bifásica a tierra a través de una impedancia.

$$\widetilde{I}_a = \widetilde{I}_{a1} + \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0} = 0 \quad \dots A.62$$

Como $\widetilde{V}_b = \widetilde{V}_c$ tenemos que:

$$(V_{a0} + a^2V_{a1} + aV_{a2}) = (V_{a0} + aV_{a1} + a^2V_{a2}) \quad \dots A.63$$

Simplificando obtenemos lo siguiente:

$$V_{a1} = V_{a2} \quad \dots A.64$$

Entonces si

$$\widetilde{V}_b = (V_{a0} + a^2V_{a1} + aV_{a2}) \quad \dots A.65$$

Podemos expresar \widetilde{V}_b asi:

$$\widetilde{V}_b = V_{a0} + (a^2 + a)V_{a1} \quad \dots A.66$$

Ahora, de la figura (z1) sabemos que:

$$\widetilde{V}_b = Zf(\widetilde{I}_b + \widetilde{I}_c) \quad \dots A.67$$

Y de a cuerdo a la (matriz 1) sabemos que:

$$\widetilde{I}_b = a^2 \widetilde{I}_{a1} + a \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0} \quad \dots A.68$$

$$\widetilde{I}_c = a \widetilde{I}_{a1} + a^2 \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0} \quad \dots A.69$$

Sustituyendo las ecuaciones A.66, A.68, A.69 en A.67 obtenemos:

$$V_{a0} + (a^2 + a)V_{a1} = Zf(a^2 \widetilde{I}_{a1} + a \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0} + a \widetilde{I}_{a1} + a^2 \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0}) \dots A.70$$

Agrupando términos

$$V_{a0} - V_{a1} = Zf(2 \widetilde{I}_{a0} - \widetilde{I}_{a1} - \widetilde{I}_{a2}) \quad A.71$$

Como

$$\widetilde{I}_{a0} = -\widetilde{I}_{a1} + \widetilde{I}_{a2} \quad \dots A.72$$

Entonces:

$$V_{a0} - V_{a1} = 3Zf \widetilde{I}_{a0} \quad \dots A.73$$

Para cumplir las condiciones impuestas por las ecuaciones anteriores (A.72 y A.73) se deben plantear los circuitos equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero como se muestra a continuación.

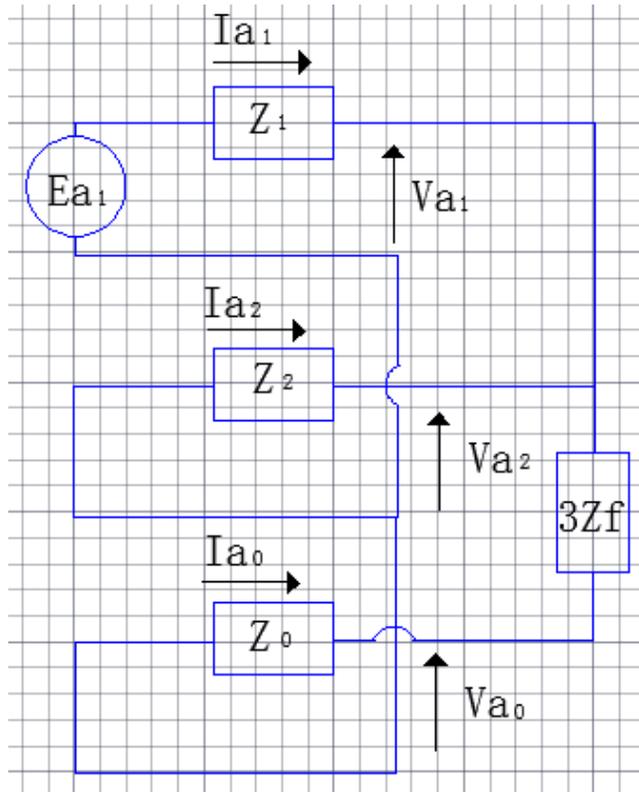


Figura A.15.- Conexión de los circuitos de secuencia positiva, negativa y cero para el caso de una falla bifásica a tierra a través de una impedancia.

De la figura A.15 podemos plantear

$$\tilde{I}_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Zf)}{Z_0 + Z_2 + 3Zf}} \quad \dots A.74$$

Y como

$$\tilde{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\tilde{I}_a + \tilde{I}_b + \tilde{I}_c) \quad \dots A.75$$

Además $\tilde{I}_a = 0$

$$\tilde{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\tilde{I}_b + \tilde{I}_c) \quad \dots A.76$$

$$\tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 3\tilde{I}_{a0} \quad \dots A.77$$

A.3.3.4.- Falla bifásica a través de una impedancia

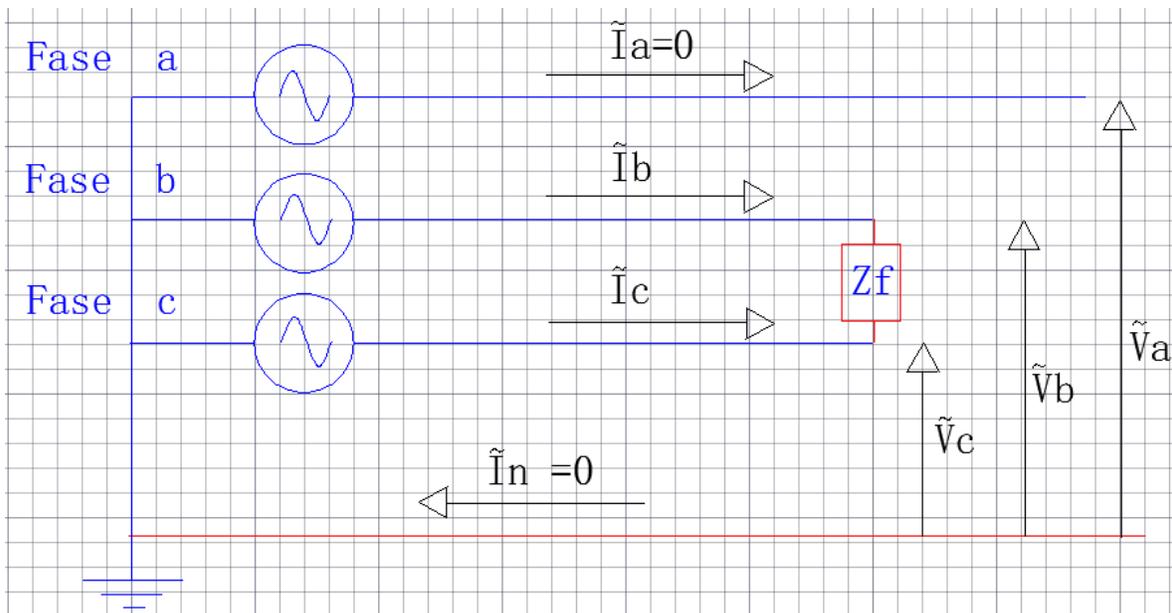


Figura A.16.- Falla bifásica a través de una impedancia.

$\widetilde{I}_a =$	0	$\widetilde{V}_a \neq$	0
$\widetilde{I}_b =$	$-\widetilde{I}_c$	$\widetilde{V}_b =$	$\widetilde{V}_c + Zf\widetilde{I}_b$
$\widetilde{I}_c =$	$-\widetilde{I}_b$	$\widetilde{V}_c =$	$\widetilde{V}_b - Zf\widetilde{I}_b$

Tabla A.4.- Falla bifásica a través de una impedancia.

Si $\widetilde{I}_a = 0$ entonces

$$\widetilde{I}_a = \widetilde{I}_{a1} + \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0} = 0 \quad \dots A.78$$

Se debe tomar en cuenta que no hay conexión a tierra por lo tanto $\widetilde{I}_{a0} = 0$ entonces:

$$\widetilde{I}_{a1} = -\widetilde{I}_{a2} \quad \dots A.79$$

Por lo que resulta de la (M1)

$$\widetilde{I}_b = a^2 \widetilde{I}_{a1} + a \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0} = (a^2 - a) \widetilde{I}_{a1} = -j\sqrt{3} \widetilde{I}_{a1} \quad \dots A.80$$

También:

$$(V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2}) - (V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2}) = Zf(a^2 \widetilde{I}_{a1} + a \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0}) \quad \dots A.81$$

Agrupando términos tenemos:

$$(a^2 - a)V_{a1} - (a^2 - a)V_{a2} = Zf(a^2 - a)I_{a1} \quad \dots A.82$$

Y

$$V_{a1} - V_{a2} = ZfI_{a1} \quad \dots A.83$$

Ahora puede establecerse un circuito equivalente para que se verifiquen esta ecuación. Esto se logra conectando en serie los circuitos equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero en la Figura A.17.

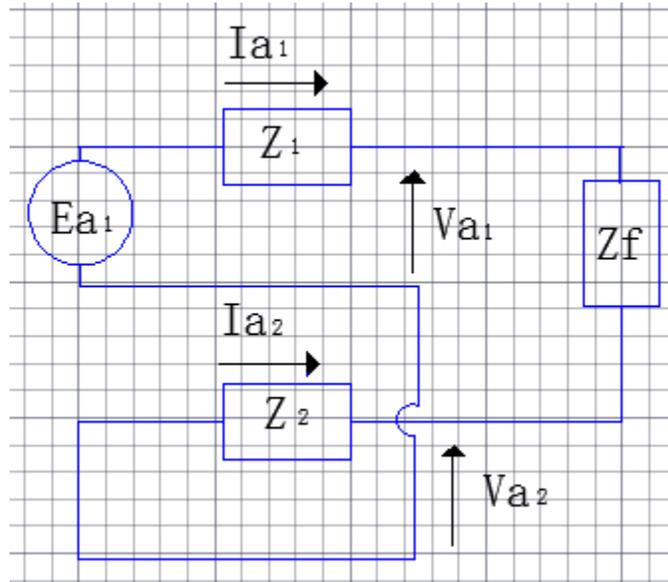


Figura A.17.- Conexión de los circuitos de secuencia positiva y negativa para el caso de una falla bifásica a través de una impedancia.

De la figura A.17 podemos obtener \tilde{I}_{a1} y en consecuencia \tilde{I}_b

$$\tilde{I}_{a1} = -\tilde{I}_{a2} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad \dots A.84$$

Entonces de la ecuación A.80 obtenemos:

$$\tilde{I}_b = -\tilde{I}_c = \frac{-j\sqrt{3}E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad \dots A.85$$

A.3.3.5.- Falla bifásica a tierra

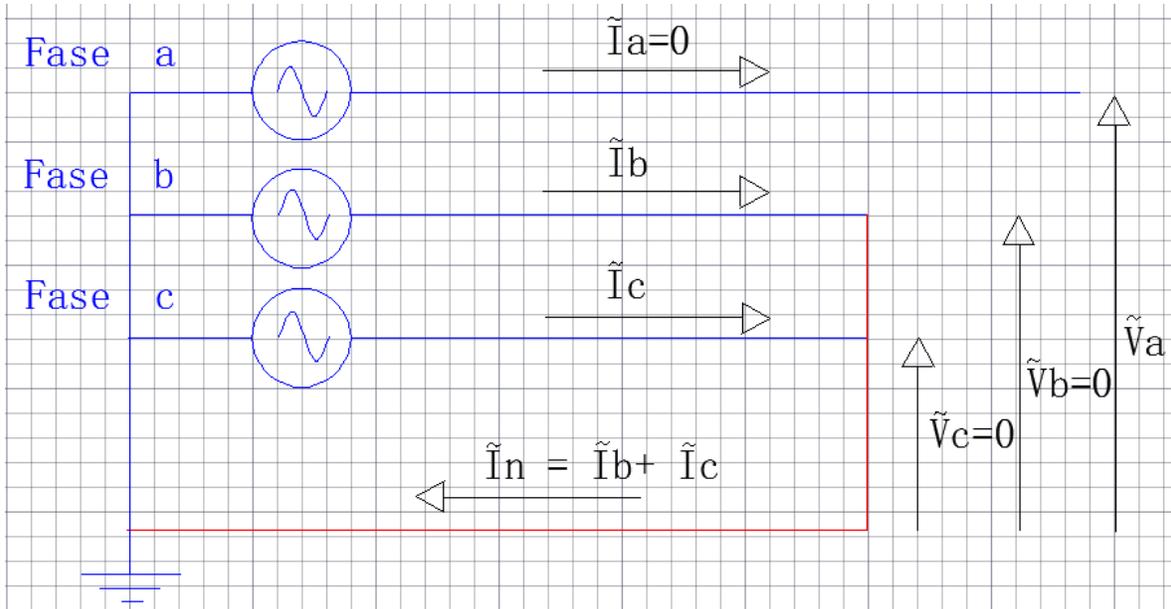


Figura A.18.- Falla bifásica a tierra.

$\tilde{I}_a =$	0	$\tilde{V}_a \neq$	0
$\tilde{I}_b \neq$	0	$\tilde{V}_b =$	0
$\tilde{I}_c \neq$	0	$\tilde{V}_c =$	0

Tabla A.5.- Falla bifásica a tierra

A partir de la forma de la falla se pueden escribir las siguientes relaciones entre las cantidades de fase y sus componentes simétricas.

$$\tilde{I}_{a1} + \tilde{I}_{a2} + \tilde{I}_{a0} = 0 \quad \dots A.86$$

$$\tilde{V}_{a1} = \tilde{V}_{a2} = \frac{\tilde{V}_a}{3} \quad \dots A.87$$

$$\tilde{V}_{a0} = \frac{\tilde{V}_a}{3} \quad \dots A.88$$

A continuación se muestra el circuito equivalente de secuencia positiva, negativa y cero de una falla bifásica a tierra.

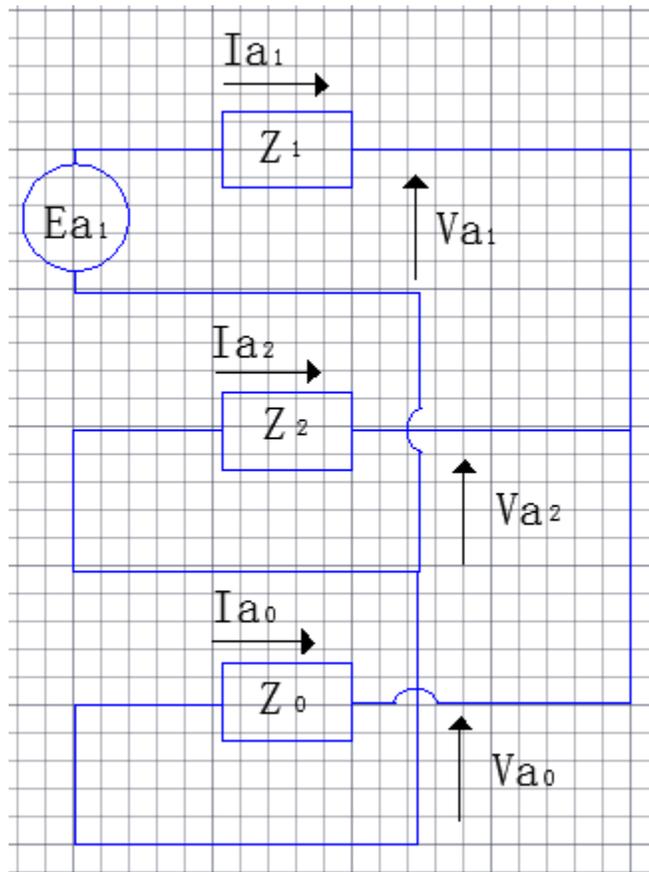


Figura A.19.- Conexión de los circuitos de secuencia positiva, negativa y cero para el caso de una falla bifásica a

De la figura anterior podemos deducir lo siguiente

$$\widetilde{I}_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_0 + Z_2}} \quad \dots A.89$$

$$\widetilde{I}_{a2} = -\widetilde{I}_{a1} \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2} \quad \dots A.90$$

$$\widetilde{I}_{a0} = -\widetilde{I}_{a1} \frac{Z_2}{Z_0 + Z_2} \quad \dots A.91$$

Para obtener directamente \widetilde{I}_b e \widetilde{I}_c se sustituyen las ecuaciones anteriores en las que a continuación se muestran:

$$\widetilde{I}_b = a^2 \widetilde{I}_{a1} + a \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0} \quad \dots A.92$$

$$\widetilde{I}_c = a \widetilde{I}_{a1} + a^2 \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0} \quad \dots A.93$$

A.3.3.6.- Falla bifásica

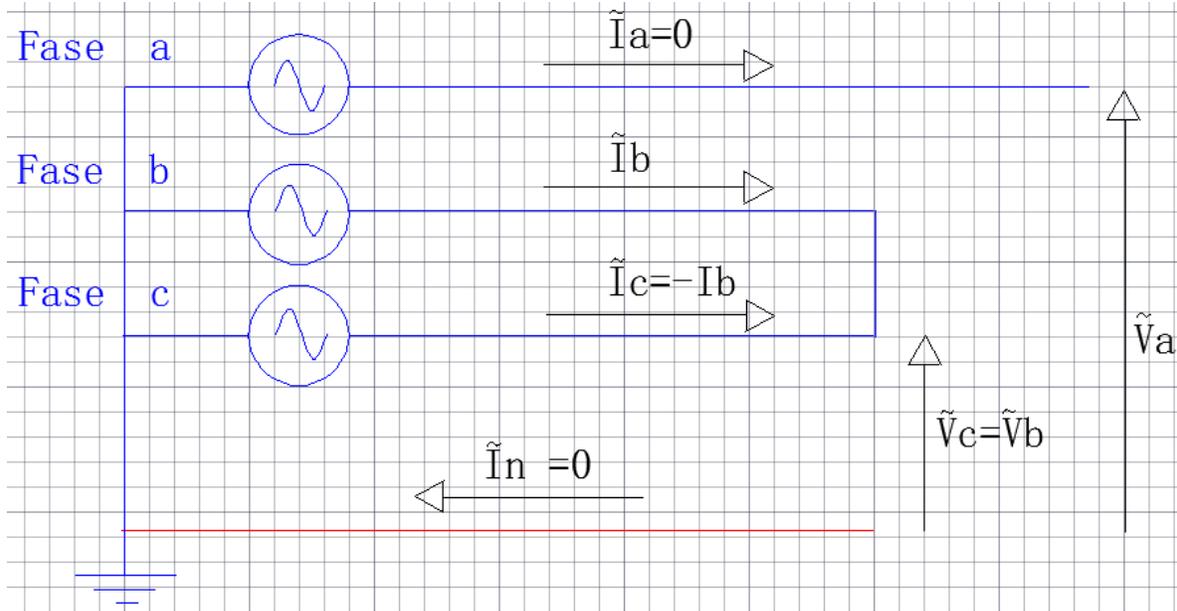


Figura A.20.- Falla bifásica.

$\tilde{I}_a =$	0	$\tilde{V}_a \neq$	0
$\tilde{I}_b \neq$	$-\tilde{I}_c$	$\tilde{V}_b \neq$	0
$\tilde{I}_c \neq$	$-\tilde{I}_b$	$\tilde{V}_c \neq$	0

Tabla A.6.- Falla bifásica

En el punto de falla pueden escribirse las siguientes relaciones entre las cantidades de fase y sus componentes simétricas.

Puesto que no hay conexión con tierra en el punto de falla:

$$\tilde{I}_{a0} = 0 \quad \dots A. 94$$

Se tiene que

$$\widetilde{I}_a = \widetilde{I}_{a1} + \widetilde{I}_{a2} + \widetilde{I}_{a0} = 0 \quad \dots A.95$$

Entonces

$$-\widetilde{I}_{a1} = \widetilde{I}_{a2} \quad \dots A.96$$

Por lo tanto se puede plantear el siguiente esquema.

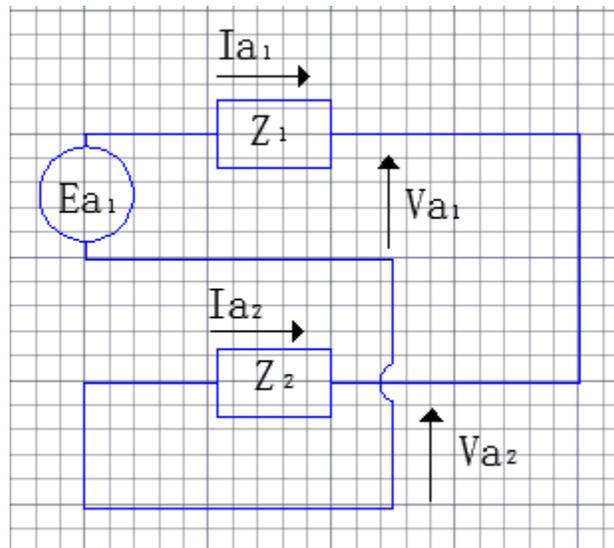


Figura A.21.- Conexión de los circuitos de secuencia positiva y negativa para el caso de una falla bifásica.

De la Figura A.21 se puede escribir la siguiente ecuación:

$$\widetilde{I}_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2} \quad \dots A.97$$

$$\widetilde{I}_{a2} = -\frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2} \quad \dots A.98$$

$$\widetilde{I}_b = a^2 \widetilde{I}_{a1} + a \widetilde{I}_{a2} \quad \dots A.99$$

$$\tilde{I}_a = a \tilde{I}_{a1} + a^2 \tilde{I}_{a2} \quad \dots A.100$$

A.3.3.7.- Falla trifásica

Cabe mencionar que en este tipo de falla no se introduce ningún desequilibrio en el sistema trifásico y por tanto no existen ni corrientes ni voltajes de secuencia negativa ni de secuencia cero, independiente de que la falla trifásica este conectada a tierra o no. Todas las cantidades que intervienen en el cálculo son de secuencia positiva.

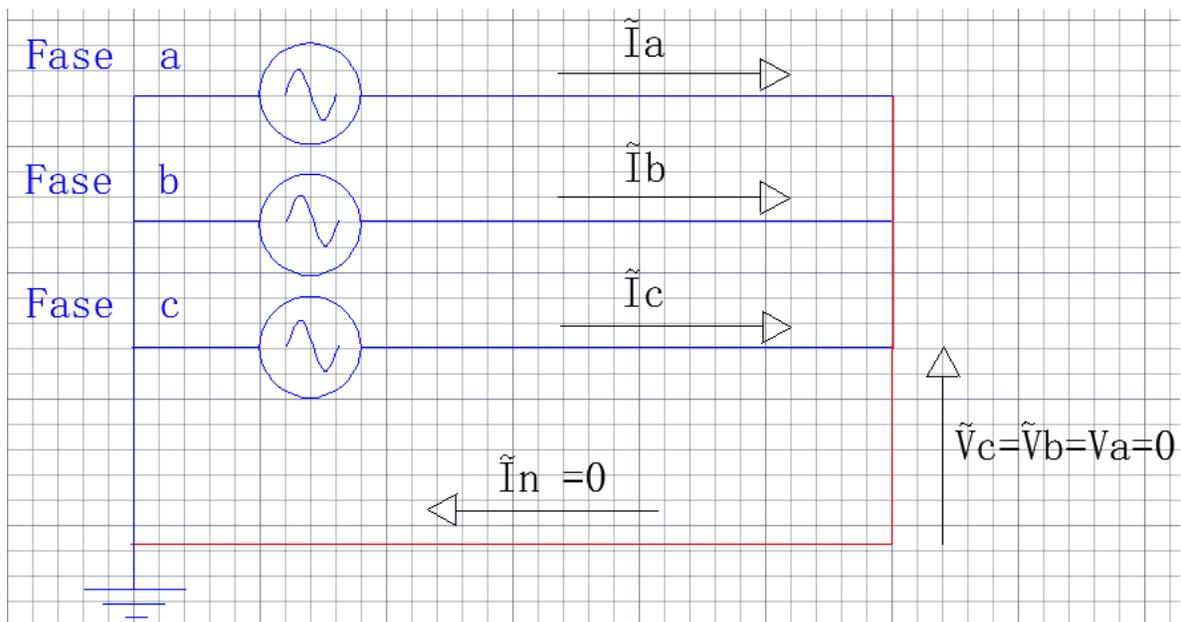


Figura A.22.- Falla trifásica a tierra.

A partir de la figura anterior se puede describir las siguientes expresiones:

$$\widetilde{I}_a + \widetilde{I}_b + \widetilde{I}_c = 0 \quad \dots A.101$$

$$\widetilde{I}_b = a^2 \widetilde{I}_a \quad \dots A.102$$

$$\widetilde{I}_c = a \widetilde{I}_a \quad \dots A.103$$

$$\widetilde{V}_a = \widetilde{V}_b = \widetilde{V}_c = 0 \quad \dots A.104$$

Además se pueden plantear las siguientes igualdades:

$$\widetilde{I}_{a1} = \widetilde{I}_a \quad \dots A.105$$

$$\widetilde{I}_{b1} = \widetilde{I}_b \quad \dots A.106$$

$$\widetilde{I}_{c1} = \widetilde{I}_c \quad \dots A.107$$

$$\widetilde{V}_{a1} = \widetilde{V}_a = 0 \quad \dots A.108$$

$$\widetilde{V}_{b1} = \widetilde{V}_b = 0 \quad \dots A.109$$

$$\widetilde{V}_{c1} = \widetilde{V}_c = 0 \quad \dots A.110$$

Las condiciones impuestas por la falla trifásica se satisfacen conectando el circuito de secuencia positiva como se ve en la Figura A.23

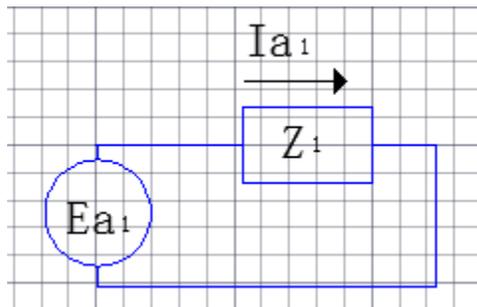


Figura A.23.- Conexión de los circuitos de secuencia positiva para el caso de una falla trifásica a tierra.

De la Figura A.23 se puede obtener la siguiente ecuación:

$$\widetilde{I}_{a1} = \frac{\widetilde{E}_{a1}}{Z_1} \quad \dots A.111$$

Como no existen componentes de secuencia negativa y cero tenemos que:

$$\widetilde{I}_a = \widetilde{I}_{a1} \quad \dots A.112$$

$$\widetilde{I}_b = a^2 \widetilde{I}_{a1} \quad \dots A.113$$

$$\widetilde{I}_c = a \widetilde{I}_{a1} \quad \dots A.114$$

APÉNDICE B

SUBESTACIONES GENERALES 1 y 2



1.- La información de las demandas máximas de las Subestaciones Generales 1 y 2.

Tabla B1.- Demanda máxima de la Subestación General 1

SUBESTACION ELECTRICA GENERAL 1				
No.	NOMENCLATURA	DEPENDENCIA	DEMANDA MAXIMA [KVA]	DEMANDA F.C = 1.3
			ACTUAL	
1	2SD-A1	DIRECCION GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS	115	149,5
2	3SD-A1	DIRECCION GENERAL DE OBRAS Y CONSERVACIÓN	54	70,2
3	4SD-A1	TALLERES DE CONSERVACIÓN	300	390
4	9SD-A1	INVESTIGACIÓN Y MEDICINA DEL DEPORTE	81	105,3
5	10SD-A1	TANQUE BAJO	84	109,2
			48	62,4
6	8SD-A1	MULTIFAMILIAR	63	81,9
7	9SD-A1	INCINERADOR DE BASURA	49	63,7
			56	72,8
8	10SD-A1	BOMBAS DE RIEGO	49	63,7
9	2SD-F1	INSTITUTO DE ECOLOGÍA	140	182
10	3SD-F1	INSTITUTO DE BIOLOGÍA, BOTÁNICO	69	89,7
11	4SD-F1	INSTITUTO DE BIOLOGÍA, EDIF. C Y D	124	161,2
4	5SD-F1	INSTITUTO DE BIOLOGÍA, EDIF. A Y B	104	135,2
13	6SD-F1	JARDÍN BOTÁNICO EXTERIOR	46	59,8
14	7SD-F1	MESA VIBRADORA	194	252,2
15	8SD-F1	UNIDAD DE SEMINARIOS	43	55,9
16	9SD-F1	VIVERO ALTO, POZO 3	115	149,5
17	10SD-F1	VIVERO ALTO, CABAÑA	30	39

APÉNDICE B

Tabla B1.- Demanda máxima de la Subestación General 1 (Continuación)

18	1SD-G1	BIBLIOTECA CENTRAL	261	339,3
19	2SD-G1	DIRECCION GENERAL DE CCH	74	96,2
20	3SD-G1	CONSEJOS ACADEMICOS	93	120,9
21	4SD-G1	ESTADIO DE PRÁCTICAS	165	214,5
22	5SD-G1	FRONTON CERRADO	83	107,9
23	6SD-G1	ESCUELA NACIONAL DE TRABAJO SOCIAL	122	158,6
24	7SD-G1	FACULTAD DE CONTADURIA Y ADMINISTRACIÓN	318	413,4
25	8SD-G1	FACULTAD DE CONTADURIA Y ADMINISTRACIÓN, EDIF A	75	97,5
26	9SD-G1	LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS	141	183,3
27	10SD-G1	FACULTAD DE INGENIERIA, ANEXO	168	218,4
28	11SD-G1	FACULTAD DE INGENIERIA, ANEXO TALLERES	147	191,1
29	12SD-G1	FACULTAD DE INGENIERIA, VALDÉS VALLEJO	93	120,9
			542	704,6
30	13SD-G1	FACULTAD DE INGENIERIA, DIV. DE EST. DE POSGRADO A	67	87,1
31	14SD-G1	INSTITUTO DE INGENIERIA, EDIF. 12 Y 18	83	107,9
32	15SD-G1	FAC. DE INGENIERIA, DIV. DE EST. DE POSGRADO B Y C	84	109,2
33	16SD-G1	NAVE HIDRÁULICA	346	449,8
34	17SD-G1	TORRE DE INGENIERIA	294	382,2
35	18SD-G1	VIVERO BAJO	65	84,5
36	1SD-H1	TORRE DE HUMANIDADES I, F.F Y L	226	293,8
37	2SD-H1	FAC. DE ODONTOLOGIA II, CAFETERIA	109	141,7
38	3SD-H1	FAC. DE ODONTOLOGIA B, SOTANO	247	321,1
39	4SD-H1	FACULTAD DE MEDICINA A, AUTOCLAVE	138	179,4
40	5SD-H1	FACULTAD DE MEDICINA A	328	426,4
			82	106,6
41	6SD-H1	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	393	510,9

APÉNDICE B

Tabla B1.- Demanda máxima de la Subestación General 1 (Continuación)

42	7SD-H1	FACULTAD DE MEDICINA INVESTIGACION	284	369,2
			121	157,3
43	8SD-H1	FACULTAD DE MEDICINA D	348	452,4
44	9SD-H1	FACULTAD DE MEDICINA B Y C	260	338
45	10SD-H1	FAC. DE MEDICINA, DPTO. DE PSIQ. Y SALUD MENTAL	46	59,8
46	11SD-H1	UNIDAD DE SERVICIOS DE APOYO A LA INVESTIGACION	352	457,6
47	1SD-I1	CENTRO MEDICO	123	159,9
48	2SD-I1	FACULTAD DE ARQUITECTURA I	253	328,9
49	3SD-I1	FACULTAD DE ARQUITECTURA II	250	325
50	4SD-I1	ALBERCA OLIMPICA	158	205,4
51	5SD-I1	FACULTAD DE QUIMICA C, POZO 1	111	144,3
			94	122,2
52	6SD-I1	INSTITUTO DE INGENIERIA 1 Y 2	239	310,7
			63	81,9
53	7SD-I1	FACULTAD DE QUIMICA B	283	367,9
54	8SD-I1	IIMAS	194	252,2
55	9SD-I1	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOMEDICAS I	212	275,6
56	10SD-I1	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOMEDICAS II	340	442
57	1SD-J1	F. F Y L, BIBLIOTECA SAMUEL RAMOS	62	80,6
58	2SD-J1	F. DE DERECHO, BIBLIOTECA ANTONIO CASO	52	67,6
59	3SD-J1	FACULTAD DE DERECHO	166	215,8
60	4SD-J1	FACULTAD DE ECONOMIA	234	304,2
61	5SD-J1	FACULTAD DE DERECHO, ANEXO	134	174,2
62	6SD-J1	TORRE DE HUMANIDADES II	183	237,9
63	7SD-J1	UNIDAD DE POSGRADO	266	345,8
64	8SD-J1	DISEÑO INDUSTRIAL	84	109,2

APÉNDICE B

Tabla B1.- Demanda máxima de la Subestación General 1 (Continuación)

65	9SD-J1	FACULTAD DE QUIMICA A	304	395,2
66	10SD-J1	CELE	110	143
67	11SD-J1	FACULTAD DE INGENIERIA	349	453,7
68	1SD-K1	FACULTAD DE PSICOLOGIA A	131	170,3
69	2SD-K1	FACULTAD DE PSICOLOGIA B Y C	78	101,4
70	3SD-K1	DIRECCION GENERAL DE PUBLICACIONES	360	468
71	4SD-K1	POSGRADO DE PSICOLOGIA	240	312

TOTAL SG1 ACTUAL [KVA]	TOTAL SG1 CON F.C =1.3 [KVA]
12992	16889,6

Tabla B2.- Demanda máxima de la Subestación General 2

SUBESTACION ELECTRICA GENERAL 2				
No.	NOMENCLATURA	DEPENDENCIA	DEMANDA MAXIMA [KVA]	DEMANDA F.C = 1.3
			ACTUAL	
1	1SD-I2	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ANTROPOLOGICAS	91	118,3
2	2SD-I2	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA Y ALUMBRADO	70	91
3	3SD-I2	TIENDA DE AUTOSERVICIO UNAM	603	783,9
4	4SD-I2	FILMOTECA UNAM	263	341,9
5	5SD-I2	FACULTAD DE CIENCIAS POLITICAS Y SOCIALES	317	412,1
6	1SD-II2	CUAED	141	183,3
7	2SD-II2	CCADET	165	214,5
8	3SD-II2	DGSCA	716	930,8
9	4SD-II2	FACULTAD DE CIENCIAS I Y II	278	361,4
			384	499,2
10	5SD-II2	INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES	493	640,9
11	6SD-II2	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES I	346	449,8
12	7SD-II2	GEOS	135	175,5
13	8SD-II2	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES II	563	731,9
14	9SD-II2	UNIDAD DE BIBLIOTECAS	387	503,1
15	10SD-II2	INSTITUTO DE QUIMICA A	172	223,6
16	11SD-II2	INSTITUTO DE GEOLOGIA	155	201,5
17	12SD-II2	PLANTA HOMOGENIZADORA	65	84,5
18	13SD-II2	INSTITUTO DE GEOGRAFIA	229	297,7
19	14SD-II2	INSTITUTO DE FISIOLOGIA CELULAR	229	297,7
20	15SD-II2	FACULTAD DE VETERINARIA I	402	522,6
21	16SD-II2	FACULTAD DE VETERINARIA II	347	451,1

APÉNDICE B

Tabla B2.- Demanda máxima de la Subestación General 2 (Continuación)

22	1SD-III2	FACULTAD DE CIENCIAS, TLAHUISCALPAN	245	318,5
			209	271,7
23	2SD-III2	FACULTAD DE CIENCIAS, AMOXCALLI	106	137,8
			427	555,1
24	3SD-III2	QUIMICA D, AULAS	113	146,9
25	4SD-III2	QUIMICA D, TALLERES	128	166,4
26	5SD-III2	QUIMICA E, ALIMENTOS	220	286
27	6SD-III2	QUIMICA D, GOBIERNO	150	195
28	7SD-III2	INSTITUTO DE FISICA	321	417,3
29	1SD-IV2	POSGRADO DE CONTADURIA Y ADMINISTRACION	111	144,3
30	2SD-IV2	INSTITUTO DE QUIMICA B	160	208
31	3SD-IV2	INST. DE FIS. CELULAR, BIOFISICA Y NEUROCIENCIAS	700	910
32	4SD-IV2	INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LINOLOGIA	282	366,6
33	5SD-IV2	INSTITUTO DE FISIOLOGIA, BIOTERIO	147	191,1
34	6SD-IV2	FACULTAD DE ODONTOLOGIA POSGRADO	211	274,3
35	7SD-IV2	BIBLIOTECA DE VETERINARIA	86	111,8
36	8SD-IV2	DIRECCION GENERAL DE ADMINISTRACION ESCOLAR	103	133,9
37	9SD-IV2	INSTITUTO DE GEOFISICA	232	301,6
38	SD-ENLACE	TORRE DE RECTORIA	359	466,7
39		RELACIONES LABORALES	56	72,8
40		INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOMEDICAS EDIFICIO NUEVO	155	201,5
41		EXTIENDA UNAM	115	149,5

TOTAL SG1 ACTUAL [KVA]	TOTAL SG1 CON F.C =1.3[KVA]
11187	14543,1

2.- Información general del suministro eléctrico a cada una de las dependencias que se encuentran conectadas a las Subestaciones Generales 1 y 2. (Orden de cargas de acuerdo a la situación actual de la Red de Distribución Subterránea en Ciudad Universitaria).

Tabla B3.- Demandas en un periodo de un día de las subestaciones derivadas SG-1

hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1SD-I1	40	40	40	40	40	200	200	200	200	200	190	190	190	200	200	200	200	195	195	195	195	40	40	40	
2SD-I1	75	75	75	75	75	75	90	150	160	170	180	180	180	180	170	170	170	170	170	170	150	80	75	75	
3SD-I1	70	70	70	70	70	70	180	190	200	230	230	230	230	230	230	230	230	230	220	220	220	220	70	70	
4SD-I1	70	70	70	70	70	70	150	150	120	120	120	120	100	100	100	120	120	120	120	70	70	70	70	70	
5SD-I1	30	30	30	30	30	75	70	70	70	75	75	70	75	70	70	70	70	70	65	65	65	30	30	30	
6SD-I1	45	45	45	45	45	45	60	60	70	80	90	90	90	80	80	80	80	70	80	60	45	45	45	45	
7SD-I1	70	70	70	70	70	100	100	130	150	200	250	260	260	260	230	230	230	190	180	150	130	70	70	70	
8SD-I1	120	120	120	120	120	120	150	170	180	180	180	180	180	180	165	165	165	165	150	150	150	120	120	120	
9SD-I1	110	110	110	110	110	110	150	160	175	175	175	175	175	175	150	150	150	125	125	125	110	110	110	110	
10SD-I1	65	65	65	65	65	65	80	70	75	75	75	90	100	100	100	100	85	85	85	85	65	65	65	65	
1SD-J1	7	7	7	7	7	25	25	25	30	30	34	34	34	34	34	30	30	30	30	27	27	30	7	7	
2SD-J1	7	7	7	7	7	7	40	40	40	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	7	7	7
3SD-J1	5	5	5	5	5	5	45	45	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	5	5	5
4SD-J1	60	60	60	60	60	60	140	140	180	180	185	185	190	190	150	150	170	170	200	190	100	80	60	60	
5SD-J1	55	55	55	55	55	55	85	858	90	85	80	80	70	75	85	85	90	90	95	90	55	55	55	55	
6SD-J1	75	75	75	75	75	75	90	75	120	120	125	125	130	130	110	110	90	120	120	90	75	75	75	75	
7SD-J1	70	70	70	70	70	85	100	130	180	190	190	190	190	190	165	165	165	165	165	120	100	70	70	70	
8SD-J1	10	10	10	10	10	10	30	45	55	70	72	70	72	70	60	60	60	60	45	45	10	10	10	10	

APÉNDICE B

Tabla B3.- Demandas en un periodo de un día de las subestaciones derivadas SG-1 (Continuación)

9SD-J1	80	80	80	80	80	80	150	200	220	250	255	260	260	260	300	300	250	220	200	200	100	80	80	80
10SD-J1	30	30	30	30	30	60	65	85	90	90	95	95	98	98	90	90	90	90	90	80	80	30	30	30
11SD-J1	9	9	9	9	9	9	9	175	180	195	250	250	250	200	200	200	200	180	180	180	9	9	9	
1SD-K1	50	50	50	50	50	50	70	85	90	95	90	95	95	95	90	90	85	85	95	90	50	50	50	
2SD-K1	20	20	20	20	20	20	30	45	60	60	65	65	65	65	65	65	65	52	50	30	30	20	20	
3SD-K1	80	80	80	80	150	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	170	170	170	170	80	80	80	
4SD-K1	40	40	40	40	35	35	40	50	60	70	65	60	65	60	60	70	75	75	70	60	45	45	40	40
B-C	75	50	50	50	75	125	140	150	150	160	160	170	170	250	240	230	230	230	230	200	200	75	75	75
2SD-A1	35	35	35	35	35	35	35	55	75	85	100	105	110	110	85	70	70	95	100	80	55	50	35	39
3SD-A1	63	63	63	65	65	74	25	25	25	20	20	18	18	14	14	14	14	65	70	60	65	63	63	63
4SD-A1	40	40	40	40	40	25	30	25	25	25	20	20	60	65	55	55	50	45	60	80	90	75	45	45
9SD-A1	63	63	65	68	74	23	23	23	20	20	18	18	15	14	15	15	14	15	65	65	62	63	63	63
10SD-A1	63	63	63	63	63	63	65	74	20	24	24	24	20	14	14	15	15	14	15	67	65	62	63	63
11SD-A1	63	63	63	63	65	68	74	20	23	23	23	25	25	20	15	15	15	14	68	65	65	60	63	63
12SD-A1	63	63	63	63	65	68	74	20	23	23	23	20	20	20	15	15	15	14	68	65	63	63	63	63
13SD-A1	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9
1SD-ENLACE	170	170	170	170	170	220	180	200	220	240	250	280	310	300	230	230	250	210	240	200	180	170	170	170
2SD-F1	100	85	85	85	90	85	115	120	125	125	125	125	130	130	125	120	115	120	120	110	90	90	100	80
3SD-F1	20	20	20	20	20	18	20	20	20	20	20	25	29	27	30	27	27	25	25	23	27	24	23	23
4SD-F1	50	55	55	60	65	70	65	80	85	85	90	95	95	98	85	80	80	70	60	60	50	45	45	45
5SD-F1	30	30	35	40	40	50	60	70	80	85	90	95	95	99	90	90	70	65	60	30	30	30	30	
6SD-F1	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18
7SD-F1	10	9	10	10	10	10	4	5	5	5	6	6	7	4	5	6	6	8	10	10	11	9	10	10
8SD-F1	90	85	90	85	90	90	78	105	110	119	120	125	131	130	120	118	118	118	120	113	98	95	100	80
9SD-F1	0	0	0	0	0	99	98	98	98	98	98	98	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10SD-F1	85	90	85	80	90	90	78	110	118	118	120	125	131	130	130	120	118	115	110	100	95	100	85	90

APÉNDICE B

Tabla B3.- Demandas en un periodo de un día de las subestaciones derivadas SG-1 (Continuación)

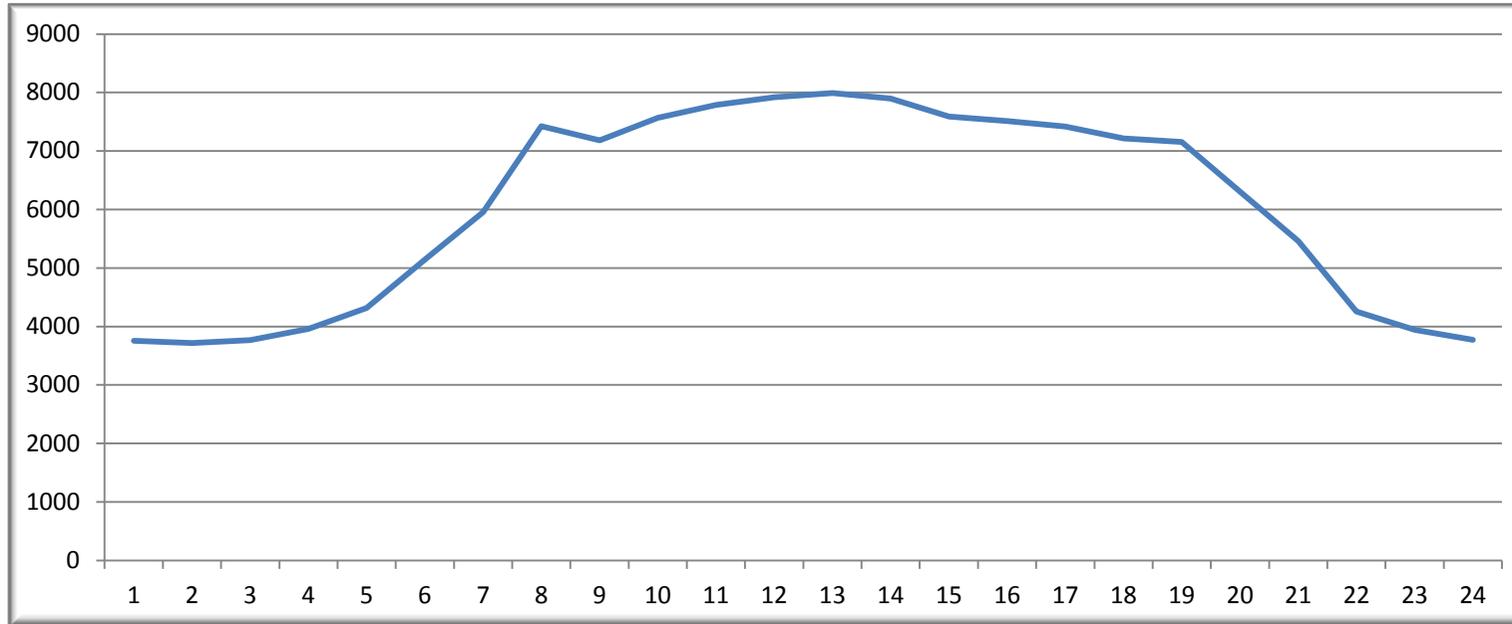
1SD-G1	65	50	50	75	75	100	130	150	160	165	170	175	180	250	240	230	200	220	200	75	65	65	65	65
2SD-G1	23	23	23	23	24	29	25	30	34	35	38	35	40	37	35	38	40	40	35	30	27	25	23	23
3SD-G1	30	30	30	35	38	45	40	74	70	70	70	73	70	70	50	65	70	65	60	45	40	35	35	30
4SD-G1	15	7	7	10	7	7	5	5	5	8	10	15	17	9	5	6	14	7	7	10	7	7	7	10
5SD-G1	40	40	40	60	65	60	40	25	20	30	30	35	40	45	55	60	60	45	60	75	65	40	40	40
6SD-G1	50	50	45	45	60	70	60	70	80	85	100	100	90	85	100	110	115	100	95	80	45	50	50	50
7SD-G1	100	100	150	250	275	270	300	300	300	280	270	270	275	280	300	300	310	310	275	200	150	100	100	100
8SD-G1	20	20	20	20	20	27	34	25	35	43	43	45	34	25	20	40	45	48	45	40	20	20	20	20
9SD-G1	14	14	14	15	17	15	14	14	14	14	14	15	15	13	13	18	18	15	14	14	14	14	14	14
10SD-G1	60	60	60	60	80	110	120	142	150	159	158	140	160	125	142	142	140	140	161	60	60	60	60	60
11SD-G1	40	40	40	45	60	70	70	80	90	100	110	128	118	115	118	115	115	100	80	60	42	40	40	40
12SD-G1	30	25	20	17	17	20	25	49	50	55	60	60	70	65	65	60	60	60	55	55	50	45	40	35
13SD-G1	13	13	13	15	20	25	29	34	35	40	45	49	45	37	37	41	38	38	30	25	20	15	12	13
14SD-G1	53	53	53	53	55	60	65	65	65	70	74	74	75	73	80	75	75	80	60	55	55	53	53	53
15SD-G1	18	17	18	17	20	29	25	30	33	30	29	30	25	23	25	27	27	30	23	25	20	17	17	17
16SD-G1	10	9	12	9	9	13	14	14	12	11	11	12	11	11	15	17	16	14	10	10	9	9	9	9
17SD-G1	60	90	90	120	150	170	200	210	215	200	180	170	170	160	140	140	130	120	110	160	140	140	140	80
18SD-G1	23	23	23	23	25	29	33	35	37	37	37	38	40	35	37	34	40	37	35	30	27	25	23	23
1SD-H1	40	40	40	50	100	130	140	150	170	175	170	170	170	160	150	180	190	170	150	100	50	40	40	40
2SD-H1	35	35	35	35	35	35	60	60	100	105	90	90	90	75	110	95	80	80	80	70	50	40	40	35
3SD-H1	40	40	40	40	40	180	180	170	180	180	170	180	170	170	160	160	160	150	160	40	40	40	40	40
4SD-H1	10	10	10	10	10	13	23	30	27	37	35	35	35	35	30	40	35	25	35	25	20	20	20	10
5SD-H1	3	2	4	3	2	4	2	3	4	3	3	6	6	7	6	13	13	3	5	3	3	1	3	2
	140	140	140	140	140	150	175	225	230	250	275	275	300	280	275	250	230	230	225	200	175	175	175	150
6SD-H1	64	64	65	63	60	64	64	59	60	60	55	55	50	56	56	50	50	55	60	63	63	64	64	64

APÉNDICE B

Tabla B3.- Demandas en un periodo de un día de las subestaciones derivadas SG-1 (Continuación)

7SD-H1	47	47	47	47	90	85	60	60	80	60	65	85	60	60	60	60	60	65	65	60	55	47	47	47
	160	160	150	150	160	165	170	175	180	220	215	225	225	228	225	218	225	215	180	180	175	170	170	165
8SD-H1	25	25	25	25	25	25	100	125	150	150	165	165	150	175	127	125	125	125	125	125	75	50	50	25
9SD-H1	125	124	124	124	124	125	127	150	200	250	277	260	250	230	250	230	225	200	175	175	175	175	125	125
10SD-H1	13	13	13	13	13	13	23	20	28	35	35	37	37	37	27	23	24	24	21	20	14	13	13	13
11SD-H1	50	50	50	50	55	55	60	70	75	75	75	80	82	75	80	75	75	70	60	55	55	55	55	50
TOTAL [kVA]	3758	3718	3765	3959	4315	5139	5955	7424	7180	7569	7786	7922	7992	7900	7589	7514	7416	7216	7153	6307	5458	4257	3945	3770

APÉNDICE B



Grafica B.1.- Demanda máxima de la SG1

Tabla B4.- Demandas en un periodo de un día de las subestaciones derivadas SG-2

hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1SD-IV2	20	20	20	20	20	20	40	50	20	68	20	20	75	20	72	20	20	78	20	96	75	20	20	20
2SD-IV2	80	80	80	80	80	100	110	110	110	100	100	140	140	140	140	140	140	140	110	90	80	80	80	80
3SD-IV2	60	60	60	60	60	70	80	80	90	10	120	120	120	120	120	120	120	120	120	100	80	60	60	60
4SD-IV2	120	120	120	120	120	120	200	250	260	280	280	280	280	280	280	250	230	200	150	100	100	100	100	100
5SD-IV2	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	100	135	135	135	120	120	110	100	90	90	75	75	75

APÉNDICE B

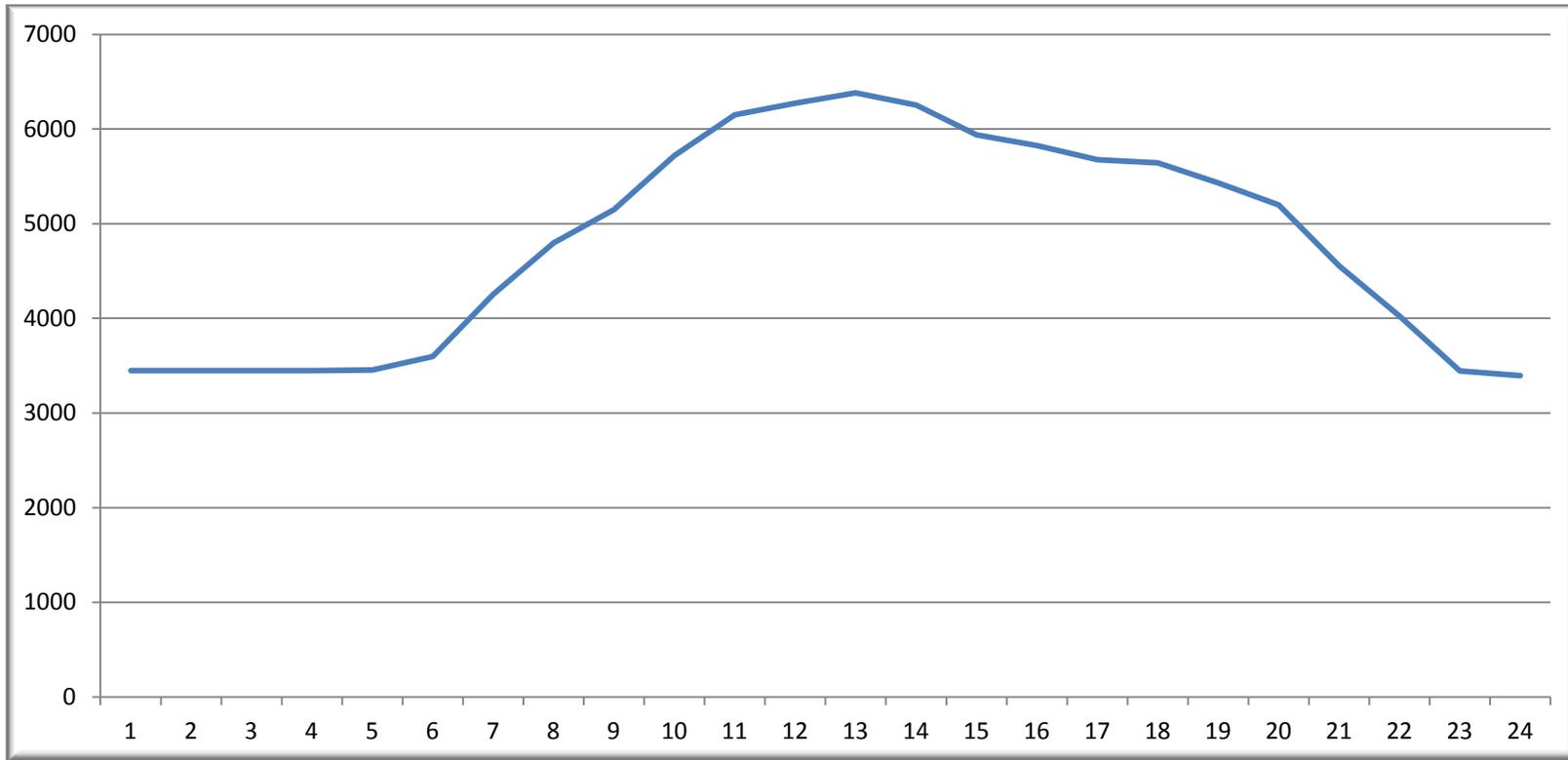
Tabla B4.- Demandas en un periodo de un día de las subestaciones derivadas SG-2 (Continuación)

6SD-IV2	50	50	50	50	50	50	50	140	140	140	140	140	140	140	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
7SD-IV2	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	45	45	45	45	80	80	80	80	30	30
8SD-IV2	12	12	12	12	12	12	24	26	27	27	27	27	27	24	20	25	25	25	25	12	12	12	12	12
9SD-IV2	70	70	70	70	70	70	70	90	100	120	140	140	140	140	140	130	120	100	100	70	70	70	70	70
1SD-II2	35	35	35	35	40	50	60	75	75	80	83	85	85	75	70	60	60	60	40	40	35	35	35	35
2SD-II2	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	14	18	18	18	18	15	15	14	7	7	12	12	8	8
3SD-II2	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	350	350	350	350	300	300	300	400	400	400	400	400	160	160
4SD-II2	8	8	8	8	8	8	8	14	14	14	17	17	17	17	14	14	14	14	14	8	12	12	8	8
5SD-II2	130	130	130	130	130	130	200	200	250	280	280	280	280	280	250	250	250	250	250	150	130	130	130	130
1SD-II2	50	50	50	50	50	50	70	70	80	95	110	110	110	110	110	110	110	90	90	90	50	50	50	50
2SD-II2	35	35	35	35	35	35	60	70	100	130	140	140	140	140	140	140	100	100	100	100	100	100	35	35
3SD-II2	525	525	525	525	525	525	525	525	580	580	630	630	630	630	630	630	630	600	600	600	525	525	525	525
4SD-II2	100	100	100	100	100	100	225	225	240	240	250	250	250	250	250	250	250	200	200	175	150	150	100	100
5SD-II2	65	65	65	65	65	70	80	90	110	110	110	110	110	110	110	110	110	100	100	65	65	65	65	65
6SD-II2	240	240	240	240	240	240	240	240	270	330	330	330	330	270	260	260	260	260	320	320	320	240	240	240
7SD-II2	200	200	200	200	200	200	280	280	280	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	200	200	200	200
8SD-II2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	150	170	190	190	190	190	190	190	190	190	200	100	100	100	100
9SD-II2	110	110	110	110	110	110	110	110	110	260	260	260	260	260	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
10SD-II2	60	60	60	60	60	60	90	110	130	150	150	150	150	150	150	150	150	150	130	80	60	60	60	60
11SD-II2	70	70	70	70	70	70	70	100	120	140	160	160	160	160	150	130	100	120	120	120	70	70	70	70
12SD-II2	8	8	8	8	8	8	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	8	8
13SD-II2	40	40	40	40	40	40	40	40	40	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	40	40
14SD-II2	110	110	110	110	110	110	130	170	180	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	110	110	110	110	110
15SD-II2	65	65	65	65	65	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	60	60	60
16SD-II2	200	200	200	200	200	200	270	270	270	330	330	330	330	330	330	330	270	250	250	220	200	200	200	200

APÉNDICE B

Tabla B4.- Demandas en un periodo de un día de las subestaciones derivadas SG-2 (Continuación)

1SD-III2	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	110	110
	50	50	50	50	50	50	50	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	70	70	50	50	50	50
2SD-III2	15	15	15	15	15	15	15	40	45	45	45	45	45	45	45	45	15	15	15	15	15	15	15	15
	25	25	25	25	25	25	25	100	100	100	100	100	100	100	100	90	90	90	50	50	25	25	25	25
3SD-III2	35	35	35	35	35	35	35	75	75	75	75	75	95	95	85	85	85	85	85	85	65	65	35	35
4SD-III2	35	35	35	35	35	35	35	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	35	35
5SD-III2	100	100	100	100	100	140	140	170	170	180	180	200	200	200	180	180	170	170	170	170	130	130	100	100
6SD-III2	32	32	32	32	32	32	45	50	55	60	60	62	62	62	62	62	62	62	62	62	50	45	32	32
7SD-III2	180	180	180	180	180	180	220	220	250	270	290	300	300	300	290	290	270	250	250	250	200	180	180	180
TOTAL [kVA]	3448	3448	3448	3448	3453	3598	4253	4796	5147	5720	6149	6272	6382	6254	5939	5824	5674	5641	5431	5198	4554	4024	3443	3393



Grafica B2.- Demanda máxima de la SG2

3.- Tablas con los valores máximos de demanda por dependencia de cada SG.
(Orden de cargas de acuerdo a la situación actual de la Red de Distribución Subterránea en Ciudad Universitaria).

Tabla B3.1 Valores máximos de demanda de la SG-1

NOMENCLATURA	DEPENDENCIA	DEMANDAS MAXIMAS
1SD-I1	CENTRO MEDICO	200
2SD-I1	FACULTAD DE ARQUITECTURA I	180
3SD-I1	FACULTAD DE ARQUITECTURA II	230
4SD-I1	ALBERCA OLIMPICA	150
5SD-I1	FACULTAD DE QUIMICA C, POZO 1	75
6SD-I1	INSTITUTO DE INGENIERIA 1 Y 2	90
7SD-I1	FACULTAD DE QUIMICA B	260
8SD-I1	IIMAS	180
9SD-I1	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOMEDICAS I	175
10SD-I1	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOMEDICAS II	100
1SD-J1	F. F Y L, BIBLIOTECA SAMUEL RAMOS	34
2SD-J1	F. DE DERECHO, BIBLIOTECA ANTONIO CASO	50
3SD-J1	FACULTAD DE DERECHO	50
4SD-J1	FACULTAD DE ECONOMIA	200
5SD-J1	FACULTAD DE DERECHO, ANEXO	858
6SD-J1	TORRE DE HUMANIDADES II	130
7SD-J1	UNIDAD DE POSGRADO	190
8SD-J1	DISEÑO INDUSTRIAL	72
9SD-J1	FACULTAD DE QUIMICA A	300
10SD-J1	CELE	98
11SD-J1	FACULTAD DE INGENIERIA	250
1SD-K1	FACULTAD DE PSICOLOGIA A	95
2SD-K1	FACULTAD DE PSICOLOGIA B Y C	65
3SD-K1	DIRECCION GENERAL DE PUBLICACIONES	200
4SD-K1	POSGRADO DE PSICOLOGIA	75
B-C		250
2SD-A1	DIRECCION GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS	110
3SD-A1	DIRECCION GENERAL DE OBRAS Y CONSERVACIÓN	74
4SD-A1	TALLERES DE CONSERVACIÓN	90
9SD-A1	INVESTIGACIÓN Y MEDICINA DEL DEPORTE	74
10SD-A1	TANQUE BAJO	74
11SD-A1		74
12SD-A1		74
13SD-A1		10
1SD-ENLACE 1-2		310

APÉNDICE B

Tabla B3.1 Valores máximos de demanda de la SG-1 (Continuación)

2SD-F1	INSTITUTO DE ECOLOGÍA	130
3SD-F1	INSTITUTO DE BIOLOGÍA, BOTÁNICO	30
4SD-F1	INSTITUTO DE BIOLOGÍA, EDIF. C Y D	98
5SD-F1	INSTITUTO DE BIOLOGÍA, EDIF. A Y B	99
6SD-F1	JARDÍN BOTÁNICO EXTERIOR	19
7SD-F1	MESA VIBRADORA	11
8SD-F1	UNIDAD DE SEMINARIOS	131
9SD-F1	VIVERO ALTO, POZO 3	99
10SD-F1	VIVERO ALTO, CABAÑA	131
1SD-G1	BIBLIOTECA CENTRAL	250
2SD-G1	DIRECCION GENERAL DE CCH	40
3SD-G1	CONSEJOS ACADEMICOS	74
4SD-G1	ESTADIO DE PRÁCTICAS	17
5SD-G1	FRONTON CERRADO	75
6SD-G1	ESCUELA NACIONAL DE TRABAJO SOCIAL	115
7SD-G1	FACULTAD DE CONTADURIA Y ADMINISTRACIÓN	310
8SD-G1	FACULTAD DE CONTADURIA Y ADMINISTRACIÓN, EDIF A	48
9SD-G1	LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS	18
10SD-G1	FACULTAD DE INGENIERIA, ANEXO	161
11SD-G1	FACULTAD DE INGENIERIA, ANEXO TALLERES	128
12SD-G1	FACULTAD DE INGENIERIA, VALDÉS VALLEJO	70
13SD-G1	FACULTAD DE INGENIERIA, DIV. DE EST. DE POSGRADO A	49
14SD-G1	INSTITUTO DE INGENIERIA, EDIF. 12 Y 18	80
15SD-G1	FAC. DE INGENIERIA, DIV. DE EST. DE POSGRADO B Y C	33
16SD-G1	NAVE HIDRÁULICA	17
17SD-G1	TORRE DE INGENIERIA	215
18SD-G1	VIVERO BAJO	40
1SD-H1	TORRE DE HUMANIDADES I, F.F Y L	190
2SD-H1	FAC. DE ODONTOLOGIA II, CAFETERIA	110
3SD-H1	FAC. DE ODONTOLOGIA B, SOTANO	180
4SD-H1	FACULTAD DE MEDICINA A, AUTOCLAVE	40
5SD-H1	FACULTAD DE MEDICINA A	13
		300
6SD-H1	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	65
7SD-H1	FACULTAD DE MEDICINA INVESTIGACION	90
		228
8SD-H1	FACULTAD DE MEDICINA D	175
9SD-H1	FACULTAD DE MEDICINA B Y C	277
10SD-H1	FAC. DE MEDICINA, DPTO. DE PSIQ. Y SALUD MENTAL	37
11SD-H1	UNIDAD DE SERVICIOS DE APOYO A LA INVESTIGACION	82
TOTAL [kVA]		9722

Tabla B3.2.- Valores máximos de demandas de la SG-2

NOMENCLATURA	DEPENDENCIA	DEMANDAS MAXIMAS [kVA]
1SD-IV2	POSGRADO DE CONTADURIA Y ADMINISTRACION	96
2SD-IV2	INSTITUTO DE QUIMICA B	140
3SD-IV2	INST. DE FIS. CELULAR, BIOFISICA Y NEUROCIENCIAS	120
4SD-IV2	INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LINOLOGIA	280
5SD-IV2	INSTITUTO DE FISIOLOGIA, BIOTERIO	135
6SD-IV2	FACULTAD DE ODONTOLOGIA POSGRADO	140
7SD-IV2	BIBLIOTECA DE VETERINARIA	80
8SD-IV2	DIRECCION GENERAL DE ADMINISTRACION ESCOLAR	27
9SD-IV2	INSTITUTO DE GEOFISICA	140
1SD-II2	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ANTROPOLOGICAS	85
2SD-II2	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA Y ALUMBRADO	18
3SD-II2	TIENDA DE AUTOSERVICIO UNAM	400
4SD-II2	FILMOTECA UNAM	17
5SD-II2	FACULTAD DE CIENCIAS POLITICAS Y SOCIALES	280
1SD-II2	CUAED	110
2SD-II2	CCADET	140
3SD-II2	DGSCA	630
4SD-II2	FACULTAD DE CIENCIAS I Y II	250
5SD-II2	INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES	110
6SD-II2	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES I	330
7SD-II2	GEOS	330
8SD-II2	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES II	200
9SD-II2	UNIDAD DE BIBLIOTECAS	260
10SD-II2	INSTITUTO DE QUIMICA A	150
11SD-II2	INSTITUTO DE GEOLOGIA	160
12SD-II2	PLANTA HOMOGENIZADORA	18
13SD-II2	INSTITUTO DE GEOGRAFIA	70
14SD-II2	INSTITUTO DE FISIOLOGIA CELULAR	190
15SD-II2	FACULTAD DE VETERINARIA I	125
16SD-II2	FACULTAD DE VETERINARIA II	330
1SD-III2	FACULTAD DE CIENCIAS, TLAHUISCALPAN	150
		100
2SD-III2	FACULTAD DE CIENCIAS, AMOXCALLI	45
		100
3SD-III2	QUIMICA D, AULAS	95
4SD-III2	QUIMICA D, TALLERES	100
5SD-III2	QUIMICA E, ALIMENTOS	200
6SD-III2	QUIMICA D, GOBIERNO	62
7SD-III2	INSTITUTO DE FISICA	300
TOTAL [kVA]		6513

4.- Información general del suministro eléctrico a cada una de las dependencias que se encuentran conectadas a las Subestaciones Generales 1 y 2. (Orden de cargas de acuerdo a la Nueva Red de Distribución Subterránea en Ciudad Universitaria).

Tabla B5.- Demanda diaria de acuerdo a la Nueva Topología de la Red SG-1

hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1SD-ENLACE 1-2	170	170	170	170	170	220	180	200	220	240	250	280	310	300	230	230	250	210	240	200	180	170	170	170
1SD-B1	65	50	50	75	75	100	130	150	160	165	170	175	180	250	240	230	200	220	200	75	65	65	65	65
2SD-B1	23	23	23	23	24	29	25	30	34	35	38	35	40	37	35	38	40	40	35	30	27	25	23	23
1SD-C1	75	75	75	75	75	75	90	150	160	170	180	180	180	180	170	170	170	170	170	170	150	80	75	75
2SD-C1	70	70	70	70	70	70	180	190	200	230	230	230	230	230	230	230	230	230	220	220	220	220	70	70
3SD-C1	40	40	40	40	40	200	200	200	200	200	190	190	190	200	200	200	200	195	195	195	195	40	40	40
4SD-C1	70	70	70	70	70	70	150	150	120	120	120	120	100	100	100	120	120	120	120	70	70	70	70	70
5SD-C1	30	30	30	30	30	75	70	70	70	75	75	70	75	70	70	70	70	70	65	65	65	30	30	30
6SD-C1	65	65	65	65	65	65	80	70	75	75	75	90	100	100	100	100	85	85	85	85	65	65	65	65
7SD-C1	70	70	70	70	70	100	100	130	150	200	250	260	260	260	230	230	230	190	180	150	130	70	70	70
8SD-C1	110	110	110	110	110	110	150	160	175	175	175	175	175	175	175	150	150	150	125	125	125	110	110	110
9SD-C1	23	23	23	23	25	29	33	35	37	37	37	38	40	35	37	34	40	37	35	30	27	25	23	23
1SD-D1	45	45	45	45	45	45	60	60	70	80	90	90	90	90	80	80	80	70	80	60	45	45	45	45
2SD-D1	120	120	120	120	120	120	150	170	180	180	180	180	180	180	180	165	165	165	165	150	150	120	120	120
3SD-D1	65	65	65	65	65	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	60	60	60
4SD-D1	120	120	120	120	120	120	200	250	260	280	280	280	280	280	280	250	230	200	150	100	100	100	100	100
5SD-D1	200	200	200	200	200	200	270	270	270	330	330	330	330	330	330	330	270	250	250	220	200	200	200	200
6SD-D1	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	100	135	135	135	120	120	110	100	90	90	75	75	75

APÉNDICE B

Tabla B5.- Demanda diaria de acuerdo a la Nueva Topología de la Red SG-1 (Continuación)

1SD-E1	40	40	40	50	100	130	140	150	170	175	170	170	170	160	150	180	190	170	150	100	50	40	40	40
2SD-E1	7	7	7	7	7	25	25	25	30	30	34	34	34	34	34	30	30	30	30	27	27	30	7	7
3SD-E1	7	7	7	7	7	7	40	40	40	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	7	7	7
4SD-E1	5	5	5	5	5	5	45	45	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	5	5	5
5SD-E1	60	60	60	60	60	60	140	140	180	180	185	185	190	190	150	150	170	170	200	190	100	80	60	60
6SD-E1	55	55	55	55	55	55	85	85	90	85	80	80	70	75	85	85	90	90	95	90	55	55	55	55
7SD-E1	75	75	75	75	75	75	90	75	120	120	125	125	130	130	110	110	90	120	120	90	75	75	75	75
8SD-E1	70	70	70	70	70	85	100	130	180	190	190	190	190	190	165	165	165	165	165	120	100	70	70	70
9SD-E1	9	9	9	9	9	9	9	175	180	195	250	250	250	250	200	200	200	200	180	180	180	9	9	9
10SD-E1	10	10	10	10	10	10	30	45	55	70	72	70	72	70	60	60	60	60	45	45	10	10	10	10
11SD-E1	80	80	80	80	80	80	150	200	220	250	255	260	260	260	300	300	250	220	200	200	100	80	80	80
12SD-E1	30	30	30	30	30	60	65	85	90	90	95	95	98	98	90	90	90	90	90	80	80	30	30	30
1SD-F1	125	124	124	124	124	125	127	150	200	250	277	260	250	230	250	230	225	200	175	175	175	175	125	125
2SD-F1	25	25	25	25	25	25	100	125	150	150	165	165	150	175	127	125	125	125	125	125	75	50	50	25
3SD-F1	47	47	47	47	90	85	60	60	80	60	65	85	60	60	60	60	60	65	65	60	55	47	47	47
	160	160	150	150	160	165	170	175	180	220	215	225	225	228	225	218	225	215	180	180	175	170	170	165
4SD-F1	70	70	70	70	70	70	70	90	100	120	140	140	140	140	140	130	120	100	100	70	70	70	70	
5SD-F1	70	70	70	70	70	70	70	100	120	140	160	160	160	160	150	130	100	120	120	120	70	70	70	
6SD-F1	8	8	8	8	8	8	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	8	8	
7SD-F1	40	40	40	40	40	40	40	40	40	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	40	40	
8SD-F1	110	110	110	110	110	110	110	110	110	260	260	260	260	260	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
1SD-G1	35	35	35	35	35	35	60	60	100	105	90	90	90	75	110	95	80	80	80	70	50	40	40	35
2SD-G1	40	40	40	40	40	180	180	170	180	180	170	180	170	170	160	160	160	150	160	40	40	40	40	40
3SD-G1	10	10	10	10	10	13	23	30	27	37	35	35	35	35	30	40	35	25	35	25	20	20	20	10
4SD-G1	3	2	4	3	2	4	2	3	4	3	3	6	6	7	6	13	13	3	5	3	3	1	3	2
	140	140	140	140	140	150	175	225	230	250	275	275	300	280	275	250	230	230	225	200	175	175	175	150

APÉNDICE B

Tabla B5.- Demanda diaria de acuerdo a la Nueva Topología de la Red SG-1 (Continuación)

5SD-G1	64	64	65	63	60	64	64	59	60	60	55	55	50	56	56	50	50	55	60	63	63	64	64	64
6SD-G1	13	13	13	13	13	13	23	20	28	35	35	37	37	37	27	23	24	24	21	20	14	13	13	13
7SD-G1	50	50	50	50	55	55	60	70	75	75	75	80	82	75	80	75	75	70	60	55	55	55	55	50
1SD-H1	50	50	50	50	50	50	70	85	90	95	90	95	95	95	95	90	90	85	85	95	90	50	50	50
2SD-H1	40	40	40	40	35	35	40	50	60	70	65	60	65	60	60	70	75	75	70	60	45	45	40	40
TOTAL [kVA]	2984	2967	2960	2992	3094	3726	4649	6093	5833	6470	6689	6803	6847	6865	6460	6329	6135	5872	5679	4971	4329	3344	3049	2973

APÉNDICE B

Grafica B3.- Demanda máxima de la SG1

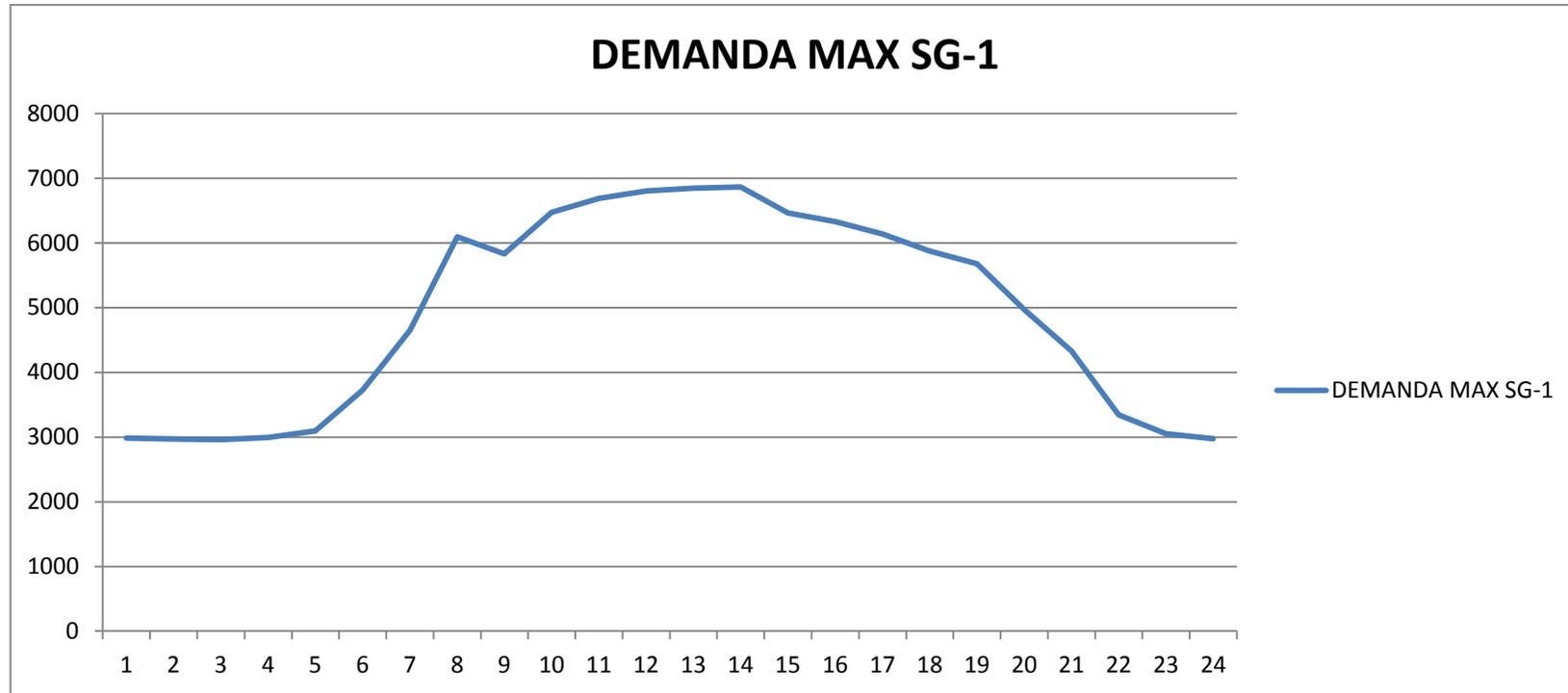


Tabla B6.- Demanda diaria de acuerdo a la Nueva Topología de la Red SG-2

hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
3SD-B2	30	30	30	35	38	45	40	74	70	70	70	73	70	70	50	65	70	65	60	45	40	35	35	30
4SD-B2	15	7	7	10	7	7	5	5	5	8	10	15	17	9	5	6	14	7	7	10	7	7	7	10
5SD-B2	40	40	40	60	65	60	40	25	20	30	30	35	40	45	55	60	60	45	60	75	65	40	40	40
6SD-B2	50	50	45	45	60	70	60	70	80	85	100	100	90	85	100	110	115	100	95	80	45	50	50	50
10SD-C2	60	90	90	120	150	170	200	210	215	200	180	170	170	160	140	140	130	120	110	160	140	140	140	80

APÉNDICE B

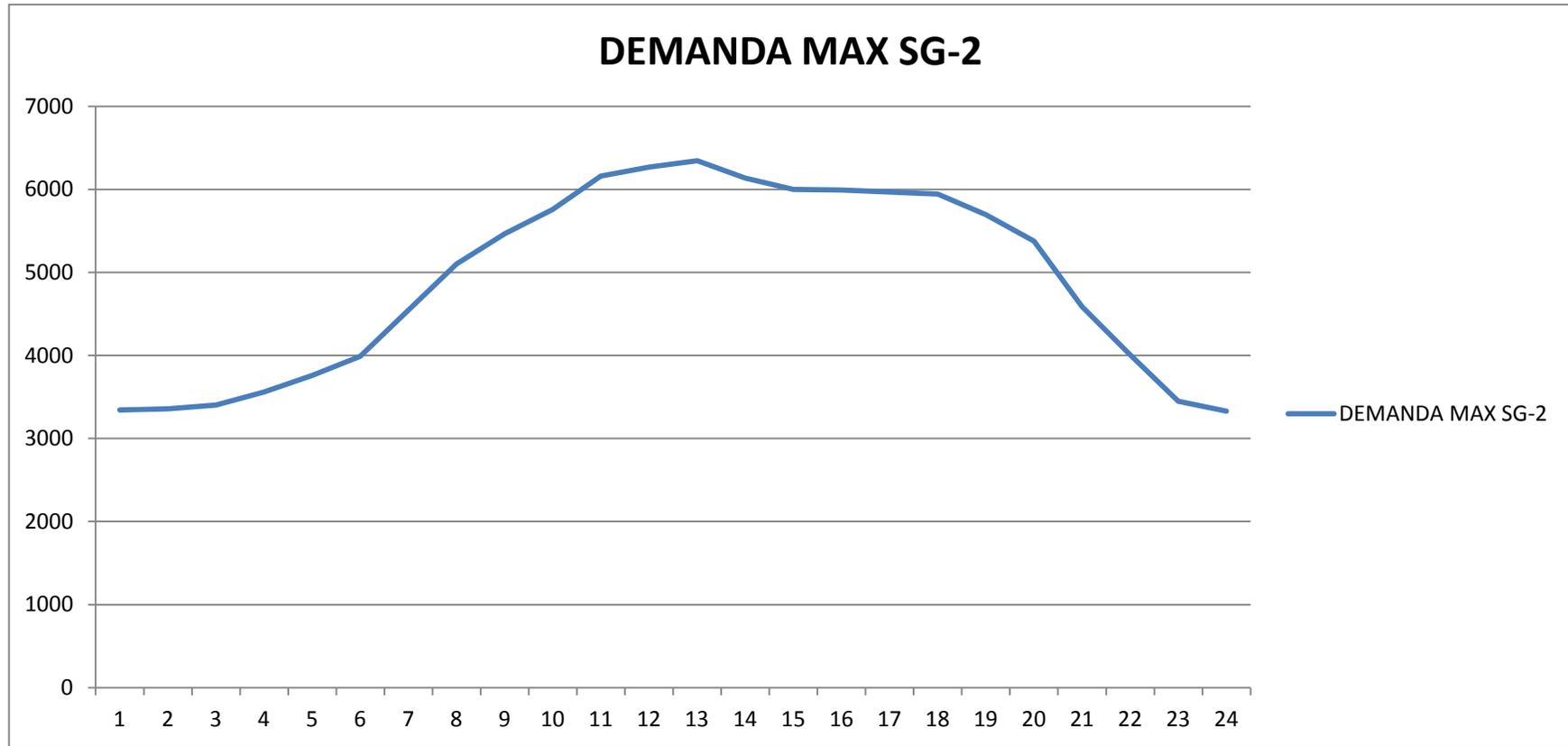
Tabla B6.- Demanda diaria de acuerdo a la Nueva Topología de la Red SG-2 (Continuación)

11SD-C2	10	9	12	9	9	13	14	14	12	11	11	12	11	11	15	17	16	14	10	10	9	9	9	9
12SD-C2	18	17	18	17	20	29	25	30	33	30	29	30	25	23	25	27	27	30	23	25	20	17	17	17
13SD-C2	53	53	53	53	55	60	65	65	65	70	74	74	75	73	80	75	75	80	60	55	55	53	53	53
14SD-C2	13	13	13	15	20	25	29	34	35	40	45	49	45	37	37	41	38	38	30	25	20	15	12	13
15SD-C2	30	25	20	17	17	20	25	49	50	55	60	60	70	65	65	60	60	60	55	55	50	45	40	35
16SD-C2	40	40	40	45	60	70	70	80	90	100	110	128	118	115	118	115	115	100	80	60	42	40	40	40
17SD-C2	14	14	14	15	17	15	14	14	14	14	14	15	15	13	13	18	18	15	14	14	14	14	14	14
18SD-C2	60	60	60	60	80	110	120	142	150	159	158	140	160	125	142	142	140	140	161	60	60	60	60	60
19SD-C2	20	20	20	20	20	27	34	25	35	43	43	45	34	25	20	40	45	48	45	40	20	20	20	20
20SD-C2	100	100	150	250	275	270	300	300	300	280	270	270	275	280	300	300	310	310	275	200	150	100	100	100
7SD-D2	60	60	60	60	60	70	80	80	90	10	120	120	120	120	120	120	120	120	120	100	80	60	60	60
8SD-D2	110	110	110	110	110	110	130	170	180	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	110	110	110	110
9SD-D2	80	80	80	80	80	100	110	110	110	100	100	140	140	140	140	140	140	140	110	90	80	80	80	80
10SD-D2	65	65	65	65	65	70	80	90	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	100	100	65	65	65
11SD-D2	100	100	100	100	100	100	225	225	240	240	250	250	250	250	250	250	250	250	200	200	175	150	150	100
13SD-E2	180	180	180	180	180	180	220	220	250	270	290	300	300	300	290	290	270	250	250	250	200	180	180	180
14SD-E2	15	15	15	15	15	15	15	40	45	45	45	45	45	45	45	45	15	15	15	15	15	15	15	15
	25	25	25	25	25	25	25	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	90	90	50	50	25	25	25
15SD-E2	35	35	35	35	35	35	35	75	75	75	75	75	95	95	85	85	85	85	85	85	65	65	35	35
16SD-E2	35	35	35	35	35	35	35	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	35	35
17SD-E2	140	140	140	140	140	140	140	140	140	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	110	110
	50	50	50	50	50	50	50	50	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	70	70	50	50	50
18SD-E2	32	32	32	32	32	32	45	50	55	60	60	62	62	62	62	62	62	62	62	62	50	45	32	32
19SD-E2	100	100	100	100	100	140	140	170	170	180	180	200	200	200	180	180	170	170	170	170	130	130	100	100
20SD-E2	20	20	20	20	20	20	40	50	20	68	20	20	75	20	72	20	20	78	20	96	75	20	20	20
9SD-F2	200	200	200	200	200	200	280	280	280	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	200	200	200	200

APÉNDICE B

Tabla B6.- Demanda diaria de acuerdo a la Nueva Topología de la Red SG-2 (Continuación)

10SD-F2	60	60	60	60	60	60	90	110	130	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	130	80	60	60	60
11SD-F2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	150	170	190	190	190	190	190	190	190	190	200	100	100	100	100
12SD-F2	240	240	240	240	240	240	240	240	270	330	330	330	330	270	260	260	260	260	320	320	320	240	240	240
13SD-F2	525	525	525	525	525	525	525	525	580	580	630	630	630	630	630	630	630	630	600	600	600	525	525	525
14SD-F2	35	35	35	35	35	35	60	70	100	130	140	140	140	140	140	140	140	100	100	100	100	100	35	35
15SD-F2	50	50	50	50	50	50	70	70	80	95	110	110	110	110	110	110	110	110	90	90	90	50	50	50
8SD-G2	50	50	50	50	50	50	50	140	140	140	140	140	140	140	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
9SD-G2	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	45	45	45	45	80	80	80	80	30	30
10SD-G2	12	12	12	12	12	12	24	26	27	27	27	27	27	24	20	25	25	25	25	12	12	12	12	12
11SD-G2	130	130	130	130	130	130	200	200	250	280	280	280	280	280	250	250	250	250	250	150	130	130	130	130
12SD-G2	8	8	8	8	8	8	8	14	14	14	17	17	17	14	14	14	14	14	14	8	12	12	8	8
13SD-G2	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	14	18	18	18	18	15	15	14	7	7	12	12	8	8
14SD-G2	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	350	350	350	350	300	300	300	400	400	400	400	400	160	160
15SD-G2	35	35	35	35	40	50	60	75	75	80	83	85	85	75	70	60	60	60	40	40	35	35	35	35
3SD-H2	20	20	20	20	20	20	30	45	60	60	65	65	65	65	65	65	65	52	50	30	30	20	20	
4SD-H2	80	80	80	80	150	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	170	170	170	170	80	80	80
TOTAL [kVA]	3343	3358	3402	3561	3758	3991	4546	5100	5463	5757	6160	6270	6344	6137	6001	5992	5969	5945	5695	5379	4588	4006	3447	3331



Grafica B4.- Demanda máxima de la SG2

4.- Tablas con los valores máximos de demanda por dependencia de cada SG.
(Orden de cargas de acuerdo a la situación futura de la Red de Distribución Subterránea en Ciudad Universitaria).

Tabla B6.1.- Valores máximos de demanda de la SG-1, Nueva Topología

NOMENCLATURA	DEPENDENCIA	DEMANDAS MAXIMAS
1SD-ENLACE 1-2	TORRE DE RECTORIA	310
1SD-B1	BIBLIOTECA CENTRAL	250
2SD-B1	DIRECCION GENERAL DE CCH	40
1SD-C1	FACULTAD DE ARQUITECTURA I	180
2SD-C1	FACULTAD DE ARQUITECTURA II	230
3SD-C1	CENTRO MEDICO	200
4SD-C1	ALBERCA OLIMPICA	150
5SD-C1	FACULTAD DE QUIMICA C, POZO 1	75
6SD-C1	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOMEDICAS II	100
7SD-C1	FACULTAD DE QUIMICA B	260
8SD-C1	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOMEDICAS I	175
9SD-C1	VIVERO BAJO	40
1SD-D1	INSTITUTO DE INGENIERIA 1 Y 2	90
2SD-D1	IIMAS	180
3SD-D1	FACULTAD DE VETERINARIA I	125
4SD-D1	INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LINOLOGIA	280
5SD-D1	FACULTAD DE VETERINARIA II	330
6SD-D1	INSTITUTO DE FISIOLOGIA, BIOTERIO	135
1SD-E1	TORRE DE HUMANIDADES I, F.F Y L	190
2SD-E1	F. F Y L, BIBLIOTECA SAMUEL RAMOS	34
3SD-E1	F. DE DERECHO, BIBLIOTECA ANTONIO CASO	50
4SD-E1	FACULTAD DE DERECHO	50
5SD-E1	FACULTAD DE ECONOMIA	200
6SD-E1	FACULTAD DE DERECHO, ANEXO	858
7SD-E1	TORRE DE HUMANIDADES II	130
8SD-E1	UNIDAD DE POSGRADO	190
9SD-E1	FACULTAD DE INGENIERIA	250
10SD-E1	DISEÑO INDUSTRIAL	72
11SD-E1	FACULTAD DE QUIMICA A	300
12SD-E1	CELE	98
1SD-F1	FACULTAD DE MEDICINA B Y C	277
2SD-F1	FACULTAD DE MEDICINA D	175
3SD-F1	FACULTAD DE MEDICINA INVESTIGACION	90
		228

APÉNDICE B

Tabla B6.1.- Valores máximos de demanda de la SG-1, Nueva Topología (Continuación)

4SD-F1	INSTITUTO DE GEOFISICA	140
5SD-F1	INSTITUTO DE GEOLOGIA	160
6SD-F1	PLANTA HOMOGENIZADORA	18
7SD-F1	INSTITUTO DE GEOGRAFIA	70
8SD-F1	UNIDAD DE BIBLIOTECAS	260
1SD-G1	FAC. DE ODONTOLOGIA II, CAFETERIA	110
2SD-G1	FAC. DE ODONTOLOGIA B, SOTANO	180
3SD-G1	FACULTAD DE MEDICINA A, AUTOCLAVE	40
4SD-G1	FACULTAD DE MEDICINA A	13
		300
5SD-G1	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	65
6SD-G1	FAC. DE MEDICINA, DPTO. DE PSIQ. Y SALUD MENTAL	37
7SD-G1	UNIDAD DE SERVICIOS DE APOYO A LA INVESTIGACION	82
1SD-H1	FACULTAD DE PSICOLOGIA A	95
2SD-H1	POSGRADO DE PSICOLOGIA	75
	DEMANDA MAXIMA TOTAL	7987

APÉNDICE B

Tabla B6.2.- Valores máximos de demanda de la SG-2, Nueva Topología

NOMENCLATURA	DEPENDENCIA	DEMANDAS MAXIMAS
3SD-B2	CONSEJOS ACADEMICOS	74
4SD-B2	ESTADIO DE PRÁCTICAS	17
5SD-B2	FRONTON CERRADO	75
6SD-B2	ESCUELA NACIONAL DE TRABAJO SOCIAL	115
10SD-C2	TORRE DE INGENIERIA	215
11SD-C2	NAVE HIDRÁULICA	17
12SD-C2	FAC. DE INGENIERIA, DIV. DE EST. DE POSGRADO B Y C	33
13SD-C2	INSTITUTO DE INGENIERIA, EDIF. 12 Y 18	80
14SD-C2	FACULTAD DE INGENIERIA, DIV. DE EST. DE POSGRADO A	49
15SD-C2	FACULTAD DE INGENIERIA, VALDÉS VALLEJO	70
16SD-C2	FACULTAD DE INGENIERIA, ANEXO TALLERES	128
17SD-C2	LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS	18
18SD-C2	FACULTAD DE INGENIERIA, ANEXO	161
19SD-C2	FACULTAD DE CONTADURIA Y ADMINISTRACIÓN, EDIF A	48
20SD-C2	FACULTAD DE CONTADURIA Y ADMINISTRACIÓN	310
7SD-D2	INST. DE FIS. CELULAR, BIOFISICA Y NEUROCIENCIAS	120
8SD-D2	INSTITUTO DE FISILOGIA CELULAR	190
9SD-D2	INSTITUTO DE QUIMICA B	140
10SD-D2	INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES	110
11SD-D2	FACULTAD DE CIENCIAS I Y II	250
13SD-E2	INSTITUTO DE FISICA	300
14SD-E2	FACULTAD DE CIENCIAS, AMOXCALLI	45
		100
15SD-E2	QUIMICA D, AULAS	95
16SD-E2	QUIMICA D, TALLERES	100
17SD-E2	FACULTAD DE CIENCIAS, TLAHUISCALPAN	150
		100
18SD-E2	QUIMICA D, GOBIERNO	62
19SD-E2	QUIMICA E, ALIMENTOS	200
20SD-E2	POSGRADO DE CONTADURIA Y ADMINISTRACION	96
9SD-F2	GEOS	330
10SD-F2	INSTITUTO DE QUIMICA A	150
11SD-F2	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES II	200
12SD-F2	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES I	330
13SD-F2	DGSCA	630
14SD-F2	CCADET	140
15SD-F2	CUAED	110
8SD-G2	FACULTAD DE ODONTOLOGIA POSGRADO	140
9SD-G2	BIBLIOTECA DE VETERINARIA	80

APÉNDICE B

Tabla B6.2.- Valores máximos de demanda de la SG-2, Nueva Topología (Continuación)

10SD-G2	DIRECCION GENERAL DE ADMINISTRACION ESCOLAR	27
11SD-G2	FACULTAD DE CIENCIAS POLITICAS Y SOCIALES	280
12SD-G2	FILMOTECA UNAM	17
13SD-G2	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA Y ALUMBRADO	18
14SD-G2	TIENDA DE AUTOSERVICIO UNAM	400
15SD-G2	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ANTROPOLOGICAS	85
3SD-H2	FACULTAD DE PSICOLOGIA B Y C	65
4SD-H2	DIRECCION GENERAL DE PUBLICACIONES	200
	TOTAL [kVA]	6670

APÉNDICE C

SUBESTACIONES GENERALES 4 y 5



APÉNDICE C

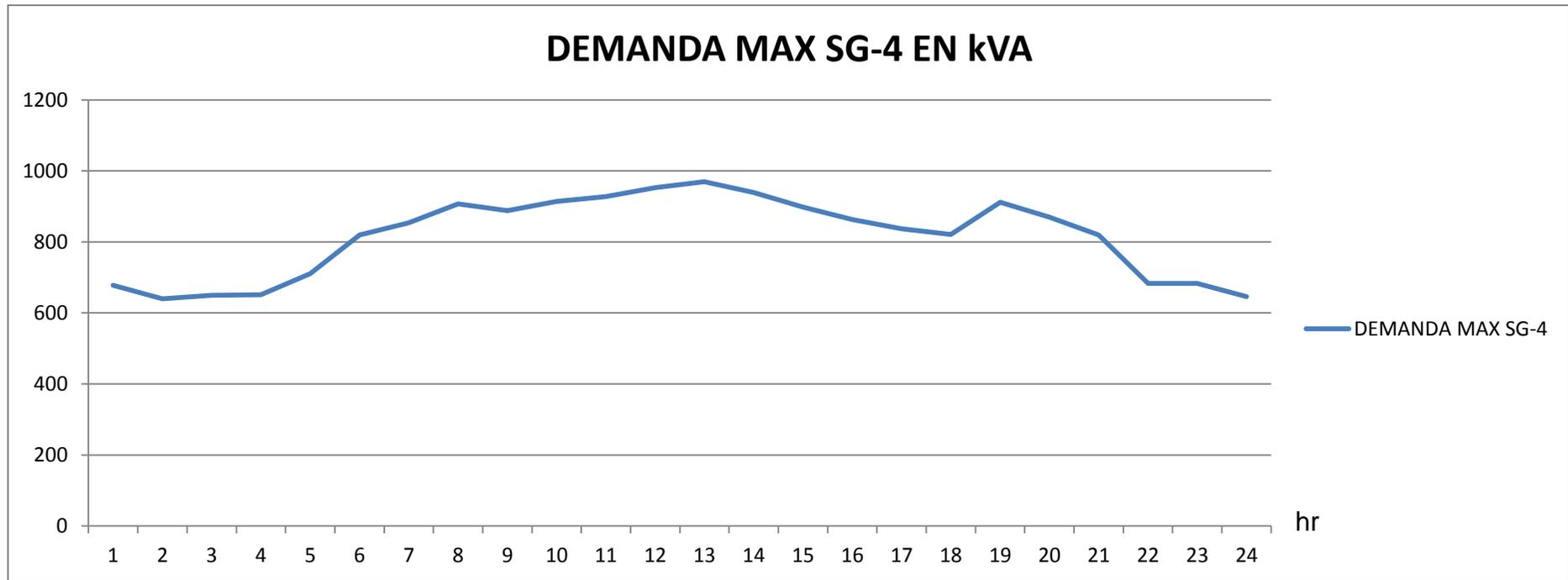
En este apéndice se muestra información acerca de las demandas máximas de las Subestaciones Generales 4 y 5 de acuerdo a la nueva topología de la Red Subterránea de Ciudad Universitaria. Esta información se obtuvo a partir de las carpetas proporcionadas por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de Potencia.

Tabla C.1.- Demanda diaria de la Subestación General 4

hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1SD-J4	63	63	63	63	65	68	74	20	23	23	23	20	20	20	15	15	15	14	68	65	63	63	63	63
2SD-J4	63	63	65	68	74	23	23	23	20	20	18	18	15	14	15	15	14	15	65	65	62	63	63	63
3SD-J4	63	63	63	63	63	63	65	74	20	24	24	24	20	14	14	15	15	14	15	67	65	62	63	63
4SD-J4	75	50	50	50	75	125	140	150	150	160	160	170	170	250	240	230	230	230	230	200	200	75	75	75
5SD-J4	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9	10	9
6SD-J4	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18	19	18
7SD-J4	85	90	85	80	90	90	78	110	118	118	120	125	131	130	130	120	118	115	110	100	95	100	85	90
8SD-J4	0	0	0	0	0	99	98	98	98	98	98	98	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9SD-J4	90	85	90	85	90	90	78	105	110	119	120	125	131	130	120	118	118	118	120	113	98	95	100	80
10SD-J4	10	9	10	10	10	10	4	5	5	5	6	6	7	4	5	6	6	8	10	10	11	9	10	10
7SD-K4	100	85	85	85	90	85	115	120	125	125	125	125	130	130	125	120	115	120	120	110	90	90	100	80
8SD-K4	30	30	35	40	40	50	60	70	80	85	90	95	95	95	90	90	70	65	60	30	30	30	30	30
9SD-K4	50	55	55	60	65	70	65	80	85	85	90	95	95	98	85	80	80	70	60	60	50	45	45	45
10SD-K4	20	20	20	20	20	20	25	25	25	25	25	25	29	27	30	27	27	25	25	23	27	24	20	20
TOTAL	678	640	650	651	711	820	854	907	888	914	928	953	970	939	898	863	837	821	912	870	820	683	683	646

Los datos de las dependencias que son abastecidas por la Subestación General 4 (de acuerdo a la nueva topología) son los siguientes en kVA:

La grafica de la demanda total de la Subestación General 4 es la que se muestra a continuación.



Tablas con los valores máximos de demanda por dependencia de la Subestación General 4. (Orden de cargas de acuerdo a la topología de la nueva Red de Distribución Subterránea en Ciudad Universitaria).

Tabla C.2.- Demandas máximas de las dependencias de la SG-4

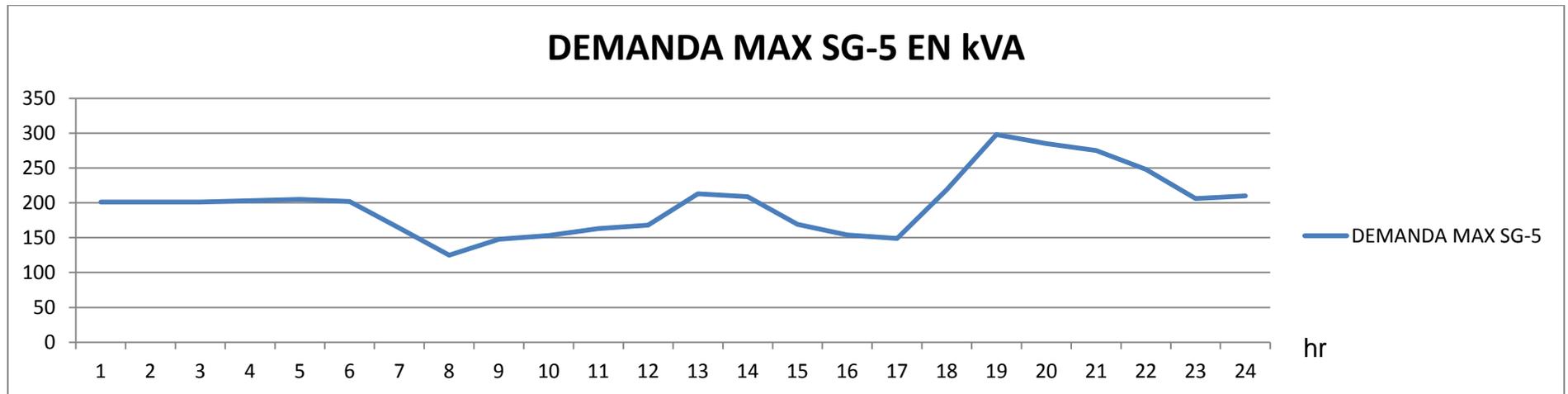
NOMENCLATURA	DEPENDENCIA	DEMANDAS MAXIMAS[kVA]
1SD-J4	INCINERADOR DE BASURA	74
2SD-J4	INVESTIGACIÓN Y MEDICINA DEL DEPORTE	74
3SD-J4	BOMBAS TANQUE BAJO	74
4SD-J4	MULTIFAMILIAR	250
5SD-J4	BOMBAS DE RIEGO	10
6SD-J4	JARDÍN BOTÁNICO EXTERIOR	19
7SD-J4	VIVERO ALTO, CABAÑA	131
8SD-J4	VIVERO ALTO, POZO 3	99
9SD-J4	UNIDAD DE SEMINARIOS	131
10SD-J4	MESA VIBRADORA	11
7SD-K4	INSTITUTO DE ECOLOGÍA	130
8SD-K4	INSTITUTO DE BIOLOGÍA, EDIF. A Y B	95
9SD-K4	INSTITUTO DE BIOLOGÍA, EDIF. C Y D	98
10SD-K4	INSTITUTO DE BIOLOGÍA, BOTÁNICO	30
	DEMANDA MAXIMA TOTAL [kVA]	1226

Los datos de las dependencias que son abastecidas por la Subestación General 5 (de acuerdo a la nueva topología) son los siguientes en kVA:

Tabla C.3.- Demanda diaria de la Subestación General 5

hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1SD-I5	35	35	35	35	35	35	35	55	75	85	100	105	110	110	85	70	70	95	100	80	55	50	35	39
2SD-I5	63	63	63	65	65	74	25	25	25	20	20	18	18	14	14	14	14	65	70	60	65	63	63	63
3SD-I5	63	63	63	63	65	68	74	20	23	23	23	25	25	20	15	15	15	14	68	65	65	60	63	63
4SD-I5	40	40	40	40	40	25	30	25	25	25	20	20	60	65	55	55	50	45	60	80	90	75	45	45
TOTAL	201	201	201	203	205	202	164	125	148	153	163	168	213	209	169	154	149	219	298	285	275	248	206	210

La grafica para la demanda total de la Subestación General 4 es la que se muestra a continuación.



Tablas con los valores máximos de demanda por dependencia de la Subestación General 5. (Orden de cargas de acuerdo a la topología de la nueva Red de Distribución Subterránea en Ciudad Universitaria).

Tabla C.4.- Demandas máximas de las dependencias de la SG-5

NOMENCLATURA	DEPENDENCIA	DEMANDAS MAXIMAS [kVA]
1SD-I5	DIRECCION GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS	110
2SD-I5	DIRECCION GENERAL DE OBRAS Y CONSERVACIÓN	74
3SD-I5	DIRECCION GENERAL DE PERSONAL	74
4SD-I5	TALLERES DE CONSERVACIÓN	90
	DEMANDA MAXIMA TOTAL [kVA]	348

Cálculo para el factor de coincidencia de las Subestaciones Generales 4 y 5 (basado en la topología de la nueva de la red).

La siguiente ecuación sirve para encontrar el factor de coincidencia.

$$F_{coin} = \frac{D_{max}}{\sum D_{maxi}} \dots (C.1)$$

Donde:

F_{coin} es el factor de coincidencia

D_{max} es la demanda máxima del sistema

$\sum D_{maxi}$ es la sumatoria de las demandas máximas individuales

Aplicando la ecuación No. C.1, con base en los datos se obtienen los siguientes resultados.

Para la SG-4 se obtiene lo siguiente:

Demanda máxima del sistema en kVA:	Sumatoria de las demandas máximas individuales en kVA	Factor de coincidencia
970	1226	0.7911

Para la SG-5 se obtiene:

Demanda máxima del sistema en kVA	Sumatoria de las demandas máximas individuales en kVA	Factor de coincidencia
275	348	0.7902

Se puede observar que las demandas máximas de las subestaciones son de valores pequeños y que aplicando el factor de coincidencia disminuyen los mismos:

$$SG4 = 1226 \times 0.7911 = 970 \text{ kVA}$$

$$SG5 = 348 \times 0.7902 = 275 \text{ kVA}$$

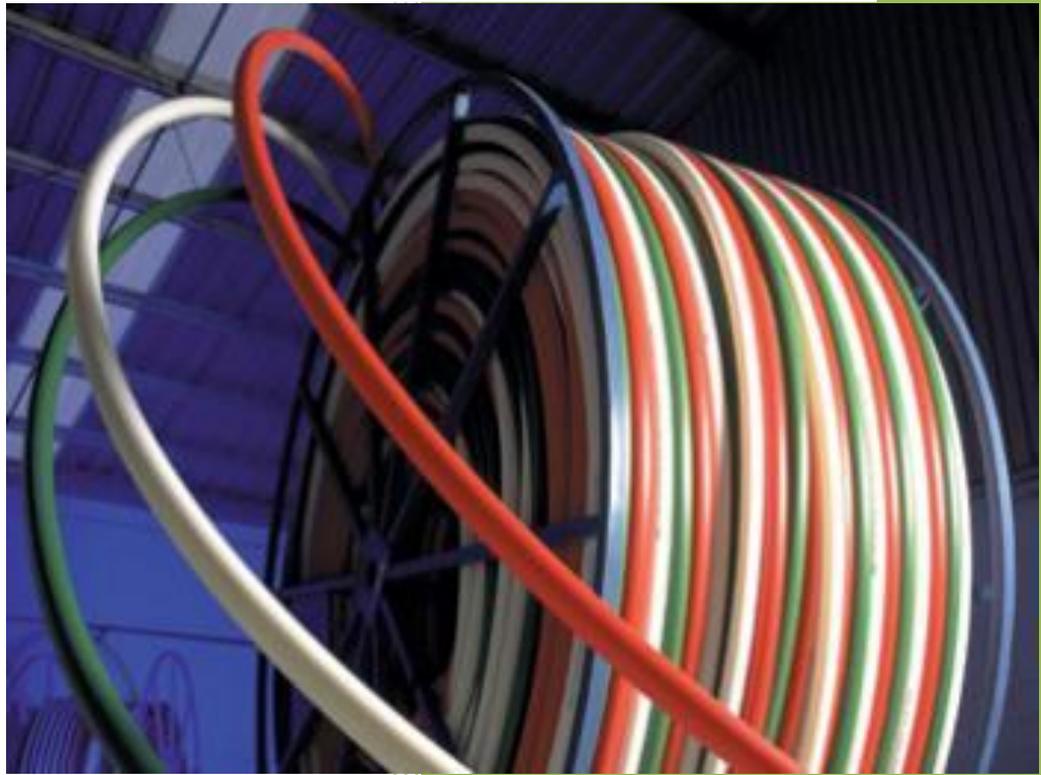
Aplicando el factor de crecimiento de 1.3 tenemos que la demanda máxima para las subestaciones es:

$$SG4 = 970 \times 1.3 = 1261 \text{ kVA}$$

$$SG5 = 275 \times 1.3 = 357.5 \text{ kVA}$$

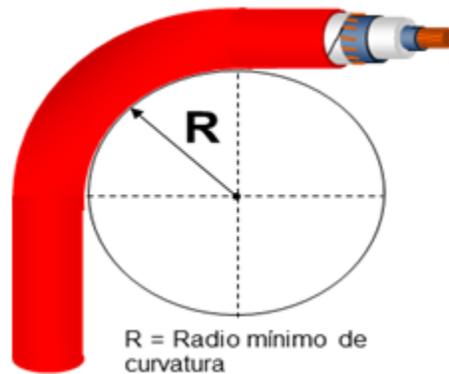
APÉNDICE D

TENSIÓN DE JALADO



A continuación se presentan las ecuaciones más importantes para el cálculo de tensión de jalado.

D.1.- RADIO MINIMO DE CURVATURA DURANTE Y DESPUES DE INSTALACION.



RADIOS MINIMOS DE CURVATURA PARA CABLES MAYORES A 600 V Y MENORES O IGUALES A 35 kV DE ACUERDO A NOM-001-SEDE-2005

TIPO DE CABLE	RADIO MÍNIMO DE CURVATURA
Monoconductor sin pantalla metálica	8D
Monoconductor con pantalla metálica o con cubierta de plomo	12D
Multiconductores o multiplexados con pantalla metálica individual	el mayor de 12d ó 7D

Para el caso de cable con cubiertas de aluminio lisa o corrugada las normas indican un radio mínimo de curvatura de 15D.

Para cables de más de 35 kV se recomienda lo siguiente:

ESTRUCTURA DE PANTALLA O CUBIERTA METÁLICAS	RADIO MÍNIMO DE CURVATURA	
	MÍNIMO	PREFERIBLE
Alambres redondos o planos aplicados helicoidalmente	14D	16D
Cinta traslapada aplicada helicoidalmente	16D	18D
Cinta longitudinal traslapada corrugada transversalmente (pantalla "LC")	18D	20D
Cubierta de plomo	12D	14D

Donde

D es el diámetro exterior del cable

d es el diámetro exterior de una de las almas

D.2.- TENSION MÁXIMA DE JALADO DEL CONDUCTOR



$$T_m = NTA$$

Donde

T_m es la tensión máxima permisible en kg

N es el número de conductores (para jalados de 3 monoconductores en configuración paralela se considera que solo dos conductores comparten la carga).

A es el area de la sección transversal de cada conductor en mm^2 .

T es el esfuerzo máximo permisible kg/mm^2

CONDUCTOR - METAL Y TIPO	Esfuerzo máximo "T" kgf/mm ²
Cobre	9.8
Aluminio	
Sólido (de 1/2 duro a temple duro)	5.6
Cableado (3/4 duro a temple duro)	7

D.3.- TENSION MAXIMA DE JALADO CON CALCETIN.

TIPO DE CABLE	TENSION MÁXIMA "Tm" kg	
	Monoconductor	Multiconductor
600V con aislamiento de XLPE, EPR ó Neopreno	907	907
Aislamiento de XLPE ó PE, pantalla de alambres concéntricos, con o sin cubierta embebiendo alambres	2268	2268
Aislamiento de XLPE ó PE, pantalla "LC", cubierta de LDPE -15, 25 Y 35 kV	3629	1814
- 69 y 138 kV.	1814	1134
Aislamiento de XLPE ó PE, pantalla de alambres concéntricos o cintas, cubierta tubulada de LDPE ó PVC.	4536	2268

Aislamiento de EPR, pantalla de alambres concéntricos o cintas, cubierta tubulada de LDPE ó PVC	4536	4536
Cable con cubierta de plomo, con o sin cubierta exterior polimérica (2)	11.2	11.2
Aislamiento de XLPE	-	-
Aislamiento de EPR.	5.6	5.6
Aislamiento de XLPE, pantalla de alambres o cintas, cubierta tubulada de MDPE.	8165	4082
Notas:		
1.- Este valor de tensión no debe ser mayor que el calculado para el jalado del conductor.		
2.- Los valores indicados son el esfuerzo máximo en kg/mm ² , el valor de tensión máxima se calcula multiplicando este esfuerzo por el área transversal de la cubierta de plomo.		

$$A = \frac{\pi}{4}(D_e^2 - D_i^2)$$

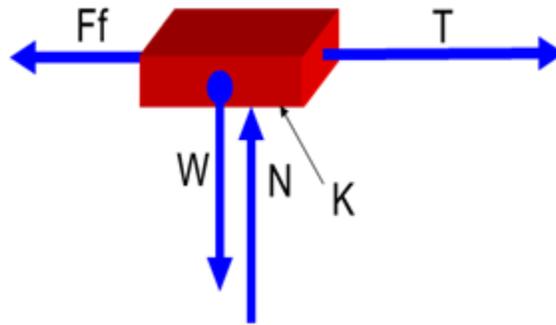
Donde

A es el área transversal de la cubierta de plomo, en mm²

D_e es el diámetro exterior de la cubierta de plomo, en mm

D_i es el diámetro interior de la cubierta de plomo, en mm

D.4.- PRINCIPIO BASICO DE JALADO DE CABLE EN DUCTO



$$T = KW$$

Donde:

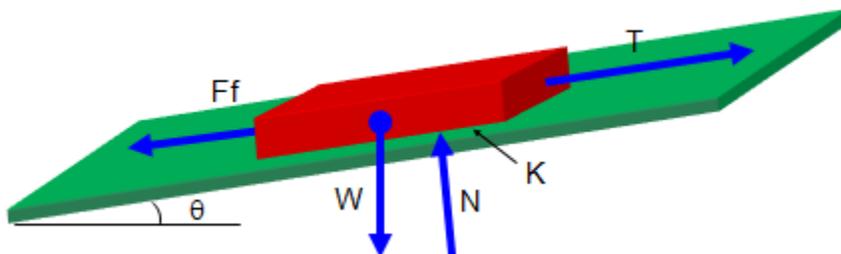
T es la tensión de jalado

W es el peso del objeto

N es la fuerza Normal

F_f es la fuerza de fricción

K es el coeficiente de fricción que depende de las dos superficies en contacto.



$$T = W(K \cos \theta + \sin \theta)$$

Donde:

T es la tensión de jalado.

W es el peso del objeto.

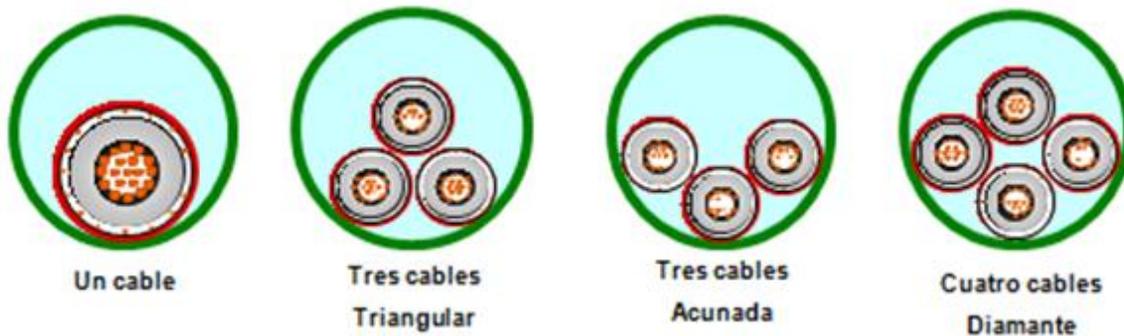
N es la fuerza Normal.

F_f es la fuerza de fricción

K es el coeficiente de fricción que depende de las dos superficies en contacto.

θ = Angulo del plano con la horizontal.

D.5.- FACTOR DE CORRECCION DEL PESO O DE LA FUERZA NORMAL



$$W_c = 1 \text{ un cable}$$

$$W_c = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D-d}\right)^2}} \text{ tres cables triangular}$$

$$W_c = 1 + \frac{4}{3} \left(\frac{d}{D-d}\right)^2 \text{ tres cables acunada}$$

$$W_c = 1 + 2 \left(\frac{d}{D-d}\right)^2 \text{ cuatro cables diamante}$$

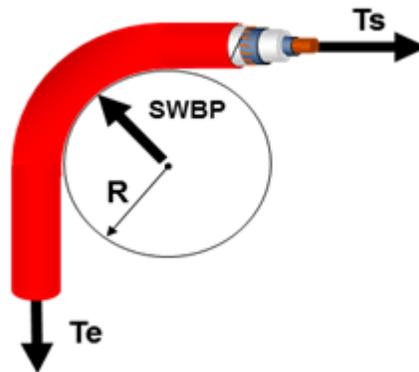
Donde

W_c es el factor de corrección del peso o de la fuerza normal debido al acomodo de los cables en el ducto.

D es el diámetro interno del ducto, en mm

d es el diámetro de cada cable, en mm

D.6.- PRESION LATERAL

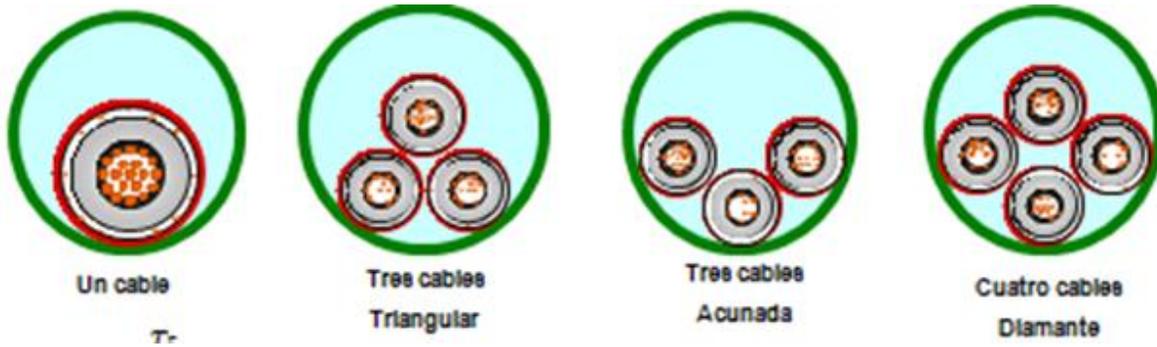


SWBP es la presión lateral en kg/m

T_s es la tensión de jalado a la salida de la curva en kg

T_e es la tensión a la entrada de la curva en kg

R es el radio de la curva en m



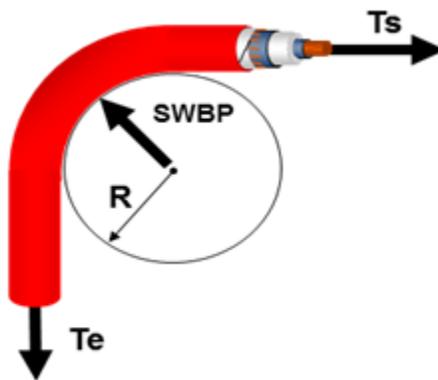
$$PL = \frac{T_s}{R} \text{ un cable}$$

$$PL = \frac{W_c T_s}{2R} \text{ tres cables triangular}$$

$$PL = (3W_c - 2) \frac{T_s}{3R} \text{ tres cables acunada}$$

$$PL = (W_c - 1) \frac{T_s}{R} \text{ cuatro cables diamante}$$

W_c es el factor de corrección del peso o de la fuerza normal debido al acomodo de los cables en el ducto.



SWBP es la presión lateral kg/m

T_s es la tensión de jalado a la salida de la curva kg

T_s es la tensión a la entrada de la curva kg

R es el radio de la curva m

TIPO DE CABLE	PRESIÓN LATERAL MÁXIMA Kg/m
600V con aislamiento de XLPE	1786
600V con aislamiento de EPR ó neopreno	1488
Aislamiento de XLPE ó PE, pantalla de alambres concéntricos:	
Sin cubierta (2)	1786
Con cubierta embebiendo alambres	2976
Aislamiento de XLPE, EPR ó PE, pantalla de alambres concéntricos o cintas, cubierta tubulada de LDPE ó PVC (3)	2976
Cable con cubierta de plomo, con o sin cubierta exterior polimérica:	
Aislamiento de XLPE	2976
Aislamiento de EPR	2076
Aislamiento de XLPE , pantalla de alambres o cintas, cubierta tubulada de MDPE	2976
NOTAS:	
1.- Para considerar el uso de estos valores, el valor de tensión de jalado no debe ser mayor que el calculado para cuando los cables se jalen del conductor	
2.- Para el jalado de tres cables en un ducto, una presión lateral máxima de 1116 kg/m debe considerarse	
3.- El límite de presión lateral máxima debe ser reducido a 2232 kg/m cuando la cubierta no sea aplicada apretadamente sobre el núcleo del cable.	

D.7.- Valores del coeficiente de fricción dinámicos recomendados para tramos rectos y curvas con presiones laterales menores a 223 kg/m para lubricantes a base de agua y jabón

Este valor depende del material del ducto, del material de la cubierta del cable

APÉNDICE D

Material del ducto	Material de la cubierta exterior del cable	un cable por ducto		tres cables por ducto *
		Temperatura de instalación	24 °C	-7 °C
PVC	XLPE	0.40	0.40	0.60
	PE	0.40	0.35	0.45
	PVC	0.50	0.25	0.60
	N	0.90	0.55	1.50
	CN	0.40	0.40	--
PE	Pb	0.25	0.25	--
	XLPE	0.45	0.35	0.55
	PE	0.25	0.20	0.85
	PVC	0.30	0.20	0.45
	N	0.65	0.45	--
FIBRA	CN	0.20	0.20	--
	Pb	0.20	0.25	--
	XLPE	0.30	0.20	0.65
	PE	0.25	0.35	0.60
	PVC	0.40	0.20	0.45
CONCRETO	N	0.40	0.30	0.55
	CN	0.40	0.35	--
	Pb	--	--	--
	XLPE	0.30	--	--
	PE	0.35	--	--
TRANSITE	PVC	0.55	--	--
	N	0.50	--	--
	CN	--	--	--
	Pb	0.55	--	--
	XLPE	0.70	--	0.70
ACERO	PE	0.70	0.35	--
	PVC	0.70	0.35	0.70
	N	1.00	0.95	1.80
	CN	--	--	--
	Pb	--	--	--
ACERO	XLPE	0.60	0.45	0.65
	PE	0.50	0.50	--
	PVC	0.65	0.40	--
	N	1.05	0.70	1.75
	CN	0.50	0.50	--
ACERO	Pb	--	--	--

Notas:

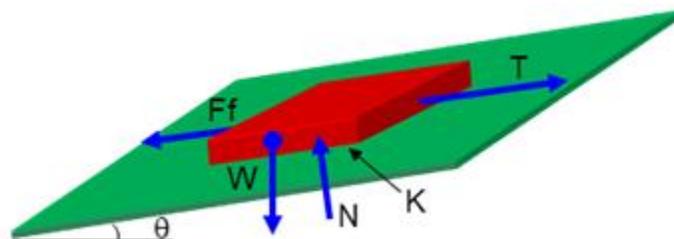
- Los coeficientes de fricción para lubricantes de base de arcilla están basados en datos de prueba limitados y son de un 20 % a un 250 % mayores que los de base de jabón y agua.

* Estos coeficientes de fricción también pueden ser usados para jalado de cuatro cables en un ducto.

Valores del coeficiente de fricción dinámicos para curvas con presiones laterales mayores a 223 kg/m para jalados de uno y tres cables por ducto y para todos los lubricantes.

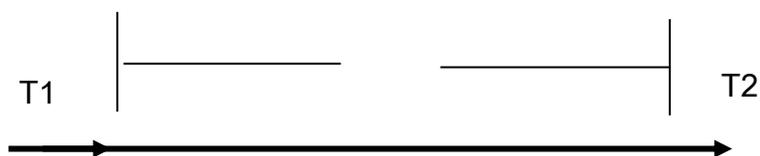
MATERIAL DEL DUCTO	MATERIAL DE LA CUBIERTA EXTERIOR DEL CABLE	COEFICIENTE DE FRICCIÓN
PVC, PE, CONCRETO	XLPE, PE, N	0.15
PVC, PE, CONCRETO	PVC	0.3

ACERO	XLPE, PE, N	0.25
ACERO	PVC	0.3
ACERO	Pb	0.2



Un valor generalmente usado para el coeficiente de fricción en muchas instalaciones independientemente de si es tramo recto o curva es 0.5

D.8.- FORMULA PARA CALCULAR LA TENSION DE JALADO EN TRAMO RECTO HORIZONTAL



$$T_2 = T_1 + WKL$$

Donde

T_2 es la tensión a la salida del tramo recto, en kg

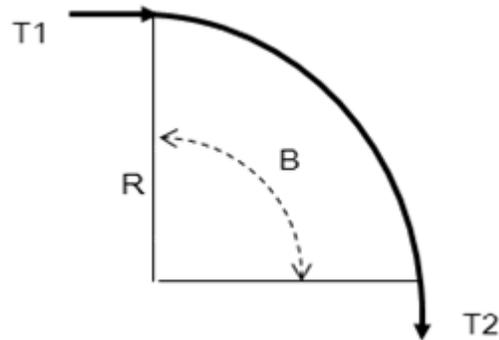
T_1 es la tensión a la entrada del tramo recto, en kg

W es el peso del cable por unidad de longitud, en kg/m

L es la longitud del tramo recto, en m

K es el coeficiente de fricción

D.9.- FORMULA PARA CALCULAR LA TENSION DE JALADO EN CURVA HORIZONTAL



$$T_2 = T_1 \cosh(KB) + \sqrt{T_1^2 + (WR)^2} \sinh(KB)$$

Donde

T_2 es la tensión a la salida de la curva, en kg

T_1 es la tensión a la entrada de la curva, en kg

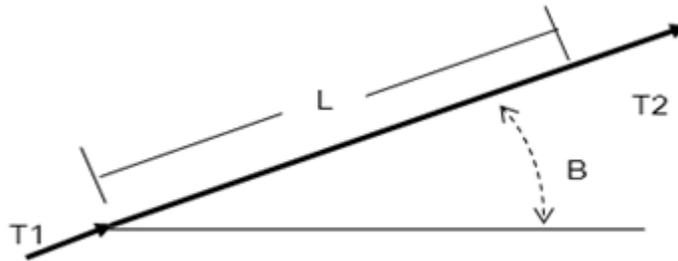
W es el peso del cable por unidad de longitud, en kg/m

F es el coeficiente de fricción.

R es el radio de la curva, en m

B es el ángulo de la curva, en radianes.

D.10.- FORMULA PARA CALCULAR LA TENSION DE JALADO EN TRAMO RECTO INCLINADO HACIA ARRIBA.



$$T_2 = T_1 + WL (\sin B + K \cos B)$$

Donde

T_2 es la tensión a la salida del tramo recto, en kg

T_1 es la tensión a la entrada del tramo recto, en kg

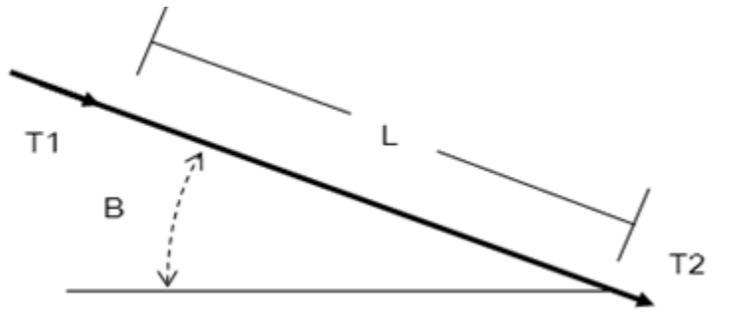
W es el peso del cable por unidad de longitud, en kg/m

L es la longitud del tramo recto, en m

K es el coeficiente de fricción.

B es el ángulo del plano con la horizontal, en radianes.

D.11.- FORMULA PARA CALCULAR LA TENSION DE JALADO EN TRAMO RECTO INCLINADO HACIA ABAJO



$$T_2 = T_1 + WL (\sin B + K \cos B)$$

Donde

T_2 es la tensión a la salida del tramo recto, en kg

T_1 es la tensión a la entrada del tramo recto, en kg

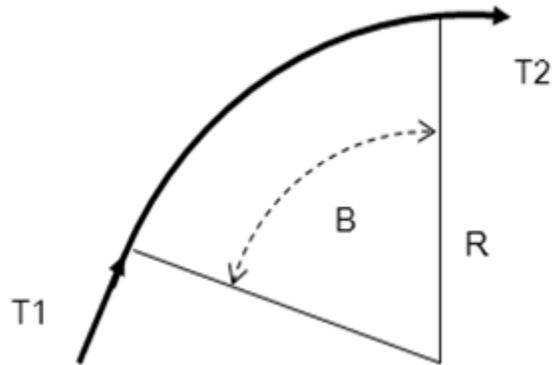
W es el peso del cable por unidad de longitud, en kg/m

L es la longitud del tramo recto, en m

K es el coeficiente de fricción.

B es el ángulo del plano con la horizontal, en radianes.

D.12.- FORMULA PARA CALCULAR LA TENSION DE JALADO EN CURVA VERTICAL CONVEXA HACIA ARRIBA.



$$T_2 = T_1 e^{KB} + \frac{WR}{1 + K^2} [2K e^{KB} \sin B + (1 - K^2)(1 - e^{KB} \cos B)]$$

Donde

T_2 es la tensión a la salida de la curva, en kg

T_1 es la tensión a la entrada de la curva, en kg

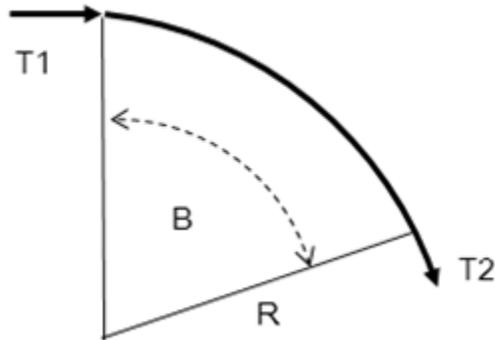
W es el peso del cable por unidad de longitud, en kg/m

K es el coeficiente de fricción.

R es el radio de la curva, en m

B es el ángulo de la curva, en radianes

D.13.- FORMULA PARA CALCULAR LA TENSION DE JALADO EN CURVA VERTICAL CONVEXA HACIA ABAJO



$$T_2 = T_1 e^{KB} + \frac{WR}{1+K^2} [2Ke^{KB} \sin B + (1-K^2)(e^{KB} - \cos B)]$$

Donde

T_2 es la tensión a la salida de la curva, en kg

T_1 es la tensión a la entrada de la curva, en kg

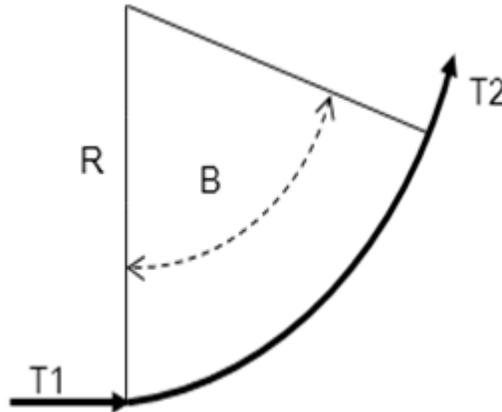
W es el peso del cable por unidad de longitud, en kg/m

K es el coeficiente de fricción.

R es el radio de la curva, en m

B es el ángulo de la curva, en radianes

D.14.- FORMULA PARA CALCULAR LA TENSION DE JALADO EN CURVA VERTICAL CONCAVA HACIA ARRIBA



$$T_2 = T_1 e^{KB} + \frac{WR}{1 + K^2} [2K \sin B - (1 - K^2)(e^{KB} - \cos B)]$$

Donde

T_2 es la tensión a la salida de la curva, en kg

T_1 es la tensión a la entrada de la curva, en kg

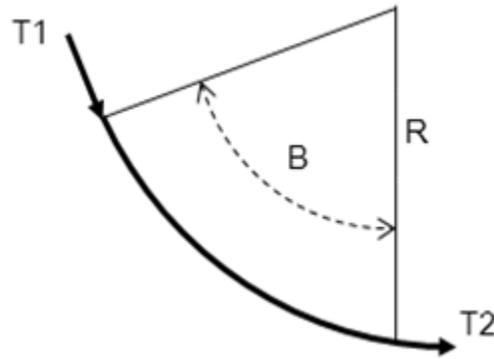
W es el peso del cable por unidad de longitud, en kg/m

K es el coeficiente de fricción.

R es el radio de la curva, en m

B es el ángulo de la curva, en radianes

D.15.- FORMULA PARA CALCULAR LA TENSION DE JALADO EN CURVA VERTICAL CONCAVA HACIA ABAJO



$$T_2 = T_1 e^{KB} - \frac{WR}{1 + K^2} [2K e^{KB} \sin B + (1 - K^2)(1 - e^{KB} \cos B)]$$

Donde

T_2 es la tensión a la salida de la curva, en kg

T_1 es la tensión a la entrada de la curva, en kg

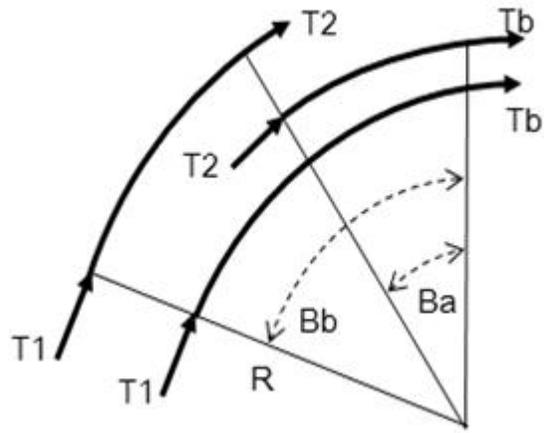
W es el peso del cable por unidad de longitud, en kg/m

K es el coeficiente de fricción.

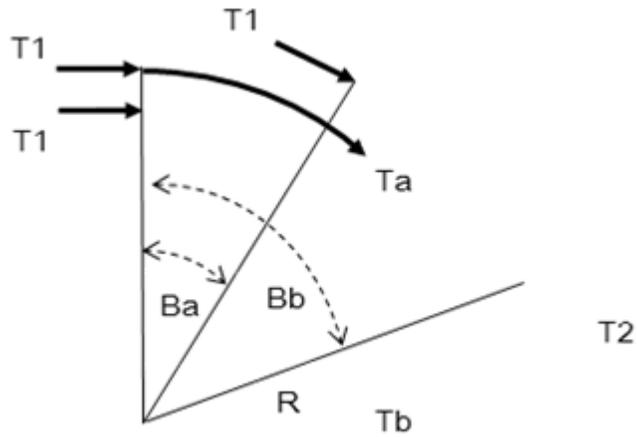
R es el radio de la curva, en m

B es el ángulo de la curva, en radianes

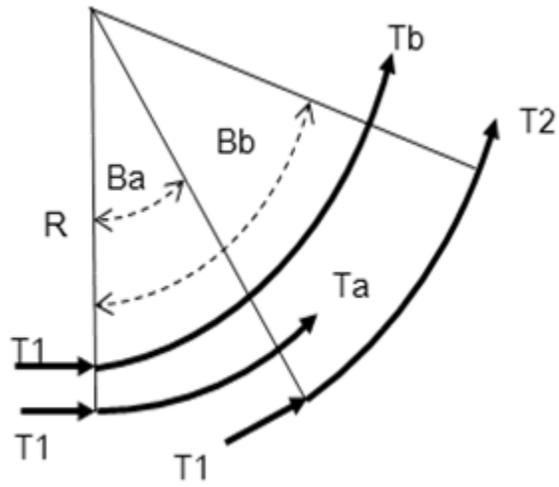
D.16.- CURVAS VERTICALES INCOMPLETAS



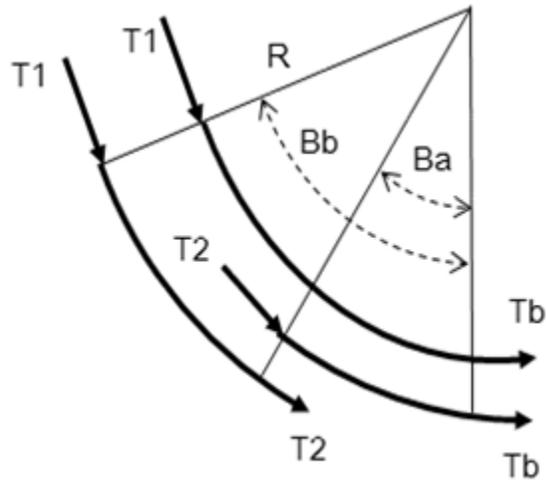
CONVEXA HACIA ARRIBA



CONVEXA HACIA ABAJO



CONCAVA HACIA ARRIBA

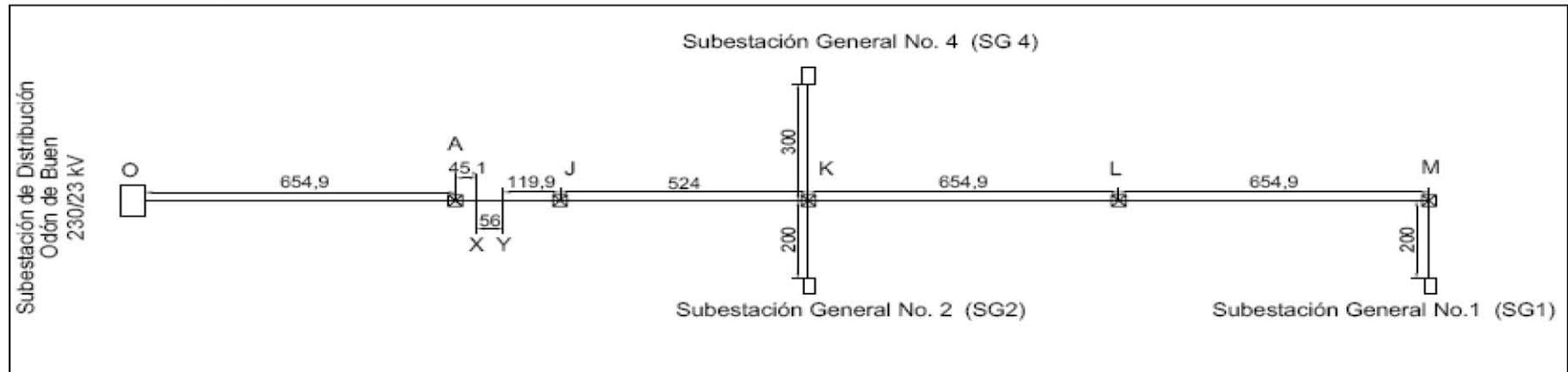


CONCAVA HACIA ABAJO

D.17.- Plano de la ubicación de registros de los alimentadores de las subestaciones generales 1, 2 y 4 en base a la tensión de jalado.

Ubicación de registros de los alimentadores 1 y 2

Vista superior



Tensión de jalado máxima = 595 [kg].
 Longitud de jalado máxima = 654.9 [m]
 Tensión de jalado, entre dos puntos dados, en [kg]:

- O - A = 594.9
- A - J = 594.9
- J - K = 476.0
- K - L = 594.9
- K - SG2 = 181.7
- SG2 - SG4 = 454.2
- L - M = 594.9
- M - SG1 = 181.7

Notas:

- Entre los puntos X y Y existe geográficamente un paso a desnivel que será detallado en la siguiente página, además se encuentran ubicados los puntos del B al I junto con sus datos correspondientes.
- Acotaciones en m.

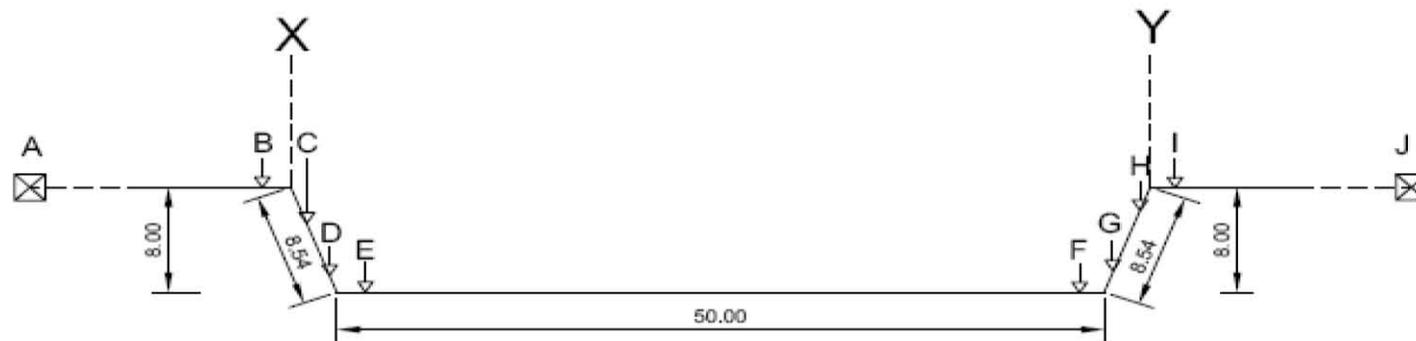
Simbología:

- ☒ Registro
- Subestación

D.18.- Detalles del paso a desnivel encontrado en la trayectoria de los alimentadores de las subestaciones generales.

Detalles del paso a desnivel

Vista lateral



Tensión de jalado máxima = 595 [kg]

Tensión de jalado entre dos puntos dados, en [kg]:

- A - B = 40.9
- B - C = 72.0
- C - D = 60.7
- D - E = 105.9
- E - F = 151.3
- F - G = 266.9
- G - H = 274.9
- H - I = 485.9
- I - J = 594.9

Radio mínimo de curvatura = 0.4412 [m]

Presiones laterales después de cada curva.

- Presión lateral en C = 163.2
- Presión lateral en E = 240.0
- Presión lateral en G = 604.9
- Presión lateral en I = 1101.4

Notas:

- La presión lateral máxima permitida para el aislamiento de XLPE, con pantalla de alambres concéntricos y cubierta de PVC es: 2232 [kg/m]
- Acotaciones en m.

D.19.- Características de los registros propuestos para la instalación de los alimentadores.

Registro y pozo de visita

	<p>Registro de media tensión Tipo: RMTB4 Norma: CFE-BMT-EOCEMAH Número de circuitos: 2</p>
	<p>Pozo de visita de media tensión Tipo: PVMTBX Norma: CFE-BMT-EOCOMAH Número de circuitos: 2</p>

APÉNDICE E

SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN



E.1.- Subestaciones de distribución de 230 /23 kV con transformadores trifásicos de 60 MVA.

A partir de 1970 se inicio la instalación, en el Área Central de subestaciones para alimentar el sistema de distribución de 23 kV directamente de la red de transmisión de 230 kV, con objeto de descargar la red de subtransmisión de 85 kV, operarla en forma radial y así tener la posibilidad de abastecer el incremento constante de la demanda.

Las características generales de las subestaciones se muestran a continuación.

E.1.2.- Capacidad de transformación instalada y firme

La capacidad instalada de transformadores es inicialmente de 120 MVA, por subestación, con dos transformadores trifásicos de 60 MVA, lo que da una capacidad firme de 72 MVA, aceptando una sobrecarga de 20% en uno de los transformadores, cuando el otro está fuera de servicio. Los estudios realizados tomando en cuenta la forma de las curvas de carga, demuestran que puede tenerse esta sobrecarga sin disminución de la vida del transformador.

La subestación puede ampliarse instalando un tercer transformador trifásico de 60 MVA, con lo que se obtiene una capacidad firme de 144 MVA, aceptando la misma sobrecarga de los transformadores, cuando el tercero este fuera de servicio.

E.1.3.- Carga conectada

Las subestaciones se diseñan para alimentar inicialmente con dos transformadores trifásicos de 60 MVA, una carga constituida por 8 alimentadores de 23 kV, con una capacidad de 9 MVA, cada uno, lo que da una carga total máxima de 72 MVA.

Capacidad instalada = 2 transformadores de 60 MVA c/u = 120 MVA

Capacidad firme = 60 MVA x 1.2 = 72 MVA

8 alimentadores x 9 MVA = 72 MVA

La capacidad máxima será cuando se tengan tres transformadores trifásicos de 60 MVA, de acuerdo a la Figura E.1 y podrán añadirse cuatro alimentadores de 23 kV más para hacer un total de 12, en un doble anillo arreglo F.

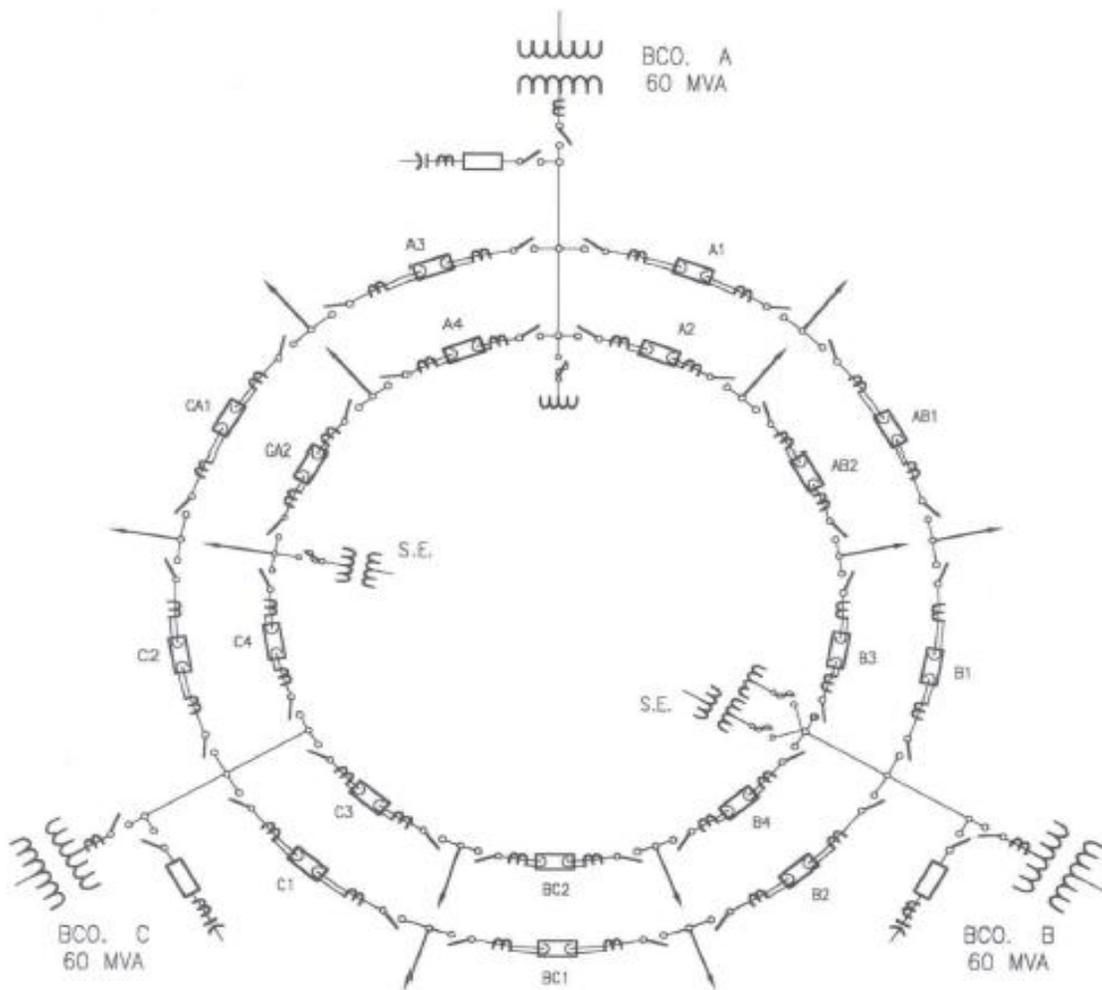


Figura E.1.- Doble anillo (arreglo F)

Como la capacidad firme con tres transformadores de 60 MVA es de 144 MVA, será posible en este caso aumentar, si es necesario, la capacidad de cada alimentador a 12 MVA.

El equipo e instalaciones de la sección de 23 kV, tiene capacidad suficiente para una carga de 12 MVA por alimentador.

Capacidad instalada = 3 transformadores de 60 MVA c/u = 180 MVA

Capacidad firme = 60 [MVA] x 2 x 1.2 = 144 MVA

12 alimentadores x 12 MVA c/u = 144 MVA

E.2.- Regulación de tensión en subestaciones de distribución

Los transformadores de 230/23 kV, 60 MVA, tienen un cambiador de derivaciones bajo carga del lado de alta tensión, controlado por un sistema de regulación de tensión que mantiene la tensión adecuada en las terminales del devanado de 23 kV, en función de la carga conectada (regulación automática).

De manera particular se mostró brevemente durante este capítulo, aspectos que son importantes para introducirse a algunos de los temas que enseguida se desarrollan en esta tesis (Caída de Tensión y Ampacidad). Además es necesario conocer las características sobre las cuales debemos de trabajar y que en consecuencia debemos conocer, por eso es que mencionamos las características de las subestaciones de distribución de 230 /23 kV con transformadores trifásicos de 60 MVA, siendo esta la clasificación que tiene la Subestación Eléctrica Odón

de Buen. También se abordaron temas de calidad del servicio eléctrico (**Ver Capítulo 1**) ya que aunque el objetivo de esta tesis no es un análisis de este tipo, debemos considerarlo para tener un criterio amplio, por si se presenta una toma de decisión que pueda afectar la calidad del servicio que proporcionara un proyecto como lo es, el desarrollado durante todo este trabajo

APÉNDICE F

LINEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN





Figura F.1.- Red eléctrica aérea

En este apéndice se describen las características principales de las líneas aéreas [Ver Figura F.1] como parte fundamental de los sistemas eléctricos de distribución. Además se abordaran características principales de los conductores utilizados en estas, sus ventajas y desventajas; así como el campo de aplicación que tienen.

F.1.- Líneas aéreas

En la construcción de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica se utilizan casi exclusivamente conductores metálicos desnudos, que se obtienen mediante el trenzado de hilos metálicos (alambres) alrededor de un hilo central.

Los metales utilizados en la construcción de líneas aéreas deben poseer tres características principales:

- 1) Presentar una baja resistencia eléctrica, y en consecuencia bajas pérdidas por efecto Joule **[1]**.
- 2) Presentar elevada resistencia mecánica, de manera que se ofrezca una elevada resistencia a los esfuerzos permanentes o debido a accidentes.
- 3) Costo limitado:

Los metales que satisfacen estas condiciones son:

🍃 Cobre

🍃 Aluminio

🍂 Aleación de aluminio

🍂 Combinación de metales (aluminio-acero)

Existe una gran variedad de metales conductores, pero en transmisión de energía eléctrica los materiales utilizados son: cobre, aluminio y aleación de aluminio, pudiendo afirmar que prácticamente no se utilizan otros materiales.

Pese a la menor resistencia eléctrica y superiores aptitudes mecánicas el cobre ha dejado de ser utilizado en la construcción de líneas aéreas, esto es especialmente notado en alta y muy alta tensión, siendo sustituido por el aluminio. No se deben perder nunca de vista los principios básicos de uso de este tipo de material, como son:



Figura F.2.- Conductor de aluminio

1) Los conductores de aluminio [Ver Figura F.2] se utilizan siempre en forma de hilos trenzados, debido a que poseen mejor resistencia a las vibraciones que los conductores de un único alambre.

2) La dureza superficial de los conductores de aluminio es sensiblemente menor que para los de cobre, por lo que se deben manipular con cuidado, además los hilos que componen el conductor deben ser de 2 [mm] de diámetro o más para que, especialmente en las operaciones de tendido, no se arriesguen a daños graves.



Figura F.3.- Conductores a la intemperie

3) Expuestos a la intemperie [Ver Figura F.3] se recubren de una capa protectora de óxido insoluble y que protege al conductor contra la acción de los agentes exteriores. Pese a esto, deberá prestarse atención cuando hay ciertos materiales en suspensión en la atmósfera, zonas de caleras, cementeras, etc.

4) Ciertos suelos naturales atacan al aluminio en distintas formas, por lo que no es aconsejable utilizarlo para la puesta a tierra de las torres, al menos cuando se ignoran las reacciones que el suelo puede producir.

5) La humedad en el aire tiene una acción de daño muy lento sobre el aluminio, de todos modos numerosas líneas construidas en la vecindad de lugares con gran humedad [Ver Figura F.4], han demostrado óptimo comportamiento. En estos casos se deben extremar las precauciones en lo que respecta al acierto en la elección de la aleación y su buen



Figura F.4.- Ambiente con un grado alto de humedad.

estado superficial, en general el daño será más lento cuantos menos defectos superficiales haya. Los defectos superficiales son punto de partida de ataques locales que pueden producir daños importantes, si no se presentan entalladuras o rebabas (que pueden ser causadas por roces durante el montaje), los hilos serán menos sensibles al daño exterior.

6) El aluminio es electronegativo en relación a la mayoría de los metales que se utilizan en las construcciones de líneas y por esto, se debe tener especial cuidado en las uniones o empalmes.

7) La temperatura de fusión [Ver Figura F.5] del aluminio es 660 °C (mientras el cobre funde a 1083 °C) por lo tanto los conductores de aluminio son más sensibles a los arcos eléctricos.



Figura F.5.- Medición de temperatura de fusión de un metal.

F.2.- Tipo de conductores en líneas aéreas

Las características expuestas anteriormente nos permiten conclusiones que ayudan a seleccionar el tipo de conductor.

Los conductores homogéneos de aluminio por sus bajas características mecánicas tienen el campo de aplicación fuertemente limitado, ya que vanos (Catenaria) relativamente grandes llevarían a flechas importantes que obligarán a aumentar la altura de los soportes, como también fijar distancias notables entre las fases originando cabezales de grandes dimensiones, este tipo de conductor se utiliza entonces para los vanos de las estaciones eléctricas o en las líneas con vanos relativamente cortos.

Los conductores de aleación de aluminio, o de aluminio acero, con características mecánicas elevadas, permiten, cuando las trazas son rectilíneas, hacer trabajar a los conductores con los máximos esfuerzos que le son permitidos. Esto da por resultados grandes vanos, con el consiguiente ahorro de torres, aisladores, y morsetería, [6].

A su vez los conductores de aleación de aluminio presentan algunas ventajas respecto de los de aluminio acero, a saber:

1.- Mayor dureza superficial, lo que explica la más baja probabilidad de daños superficiales durante las operaciones de tendido, particularidad muy apreciada en las líneas de muy alta tensión, ya que como consecuencia se tendrán menos pérdidas por efecto corona, y menor perturbación radioeléctrica.

2.- Menor peso, el ser más liviano, para flecha y vanos iguales da como consecuencia a igual altura de torres menor peso en las torres terminales y angulares, por la menor sollicitación mecánica, esto influye en la economía especialmente cuando la traza es quebrada.

Para el caso de trazas rectilíneas, a igualdad de tensión mecánica de tendido, se tiene menor flecha para igual vano, y en consecuencia menor altura de las torres de suspensión.

Una desventaja que debe señalarse para la aleación de aluminio es que por ser sus características mecánicas consecuencia de tratamientos térmicos, el cable es sensible a las altas temperaturas (no debe superarse el límite de 120 grados °C) por lo que debe prestarse especial atención al verificar la sección para las sobre corrientes y tener particularmente en cuenta la influencia del cortocircuito.

A continuación se ejemplifican algunos de los conductores más utilizados en la construcción de líneas aéreas.



Cable de aluminio duro
desnudo Tipo AAC

Conductor cableado y
formado por alambres de
aluminio duro aleación 1350
en capas concéntricas



Cable de aluminio con núcleo de acero tipo ACSR

1. Núcleo de alambres de acero galvanizado.
2. Conductor formado por alambres de aluminio duro en capas concéntricas.



Cables econel semiaislados para líneas aéreas de 15 a 38 kV, conductor tipo ACSR y aislamiento-cubierta de xlp

- 1.- Núcleo de alambres de acero galvanizado.
- 2.- Conductor formado por alambres de aluminio aleación 1350, temple duro "H19", agrupados en capas concéntricas.
- 3.- Pantalla semiconductor extruida sobre el conductor.
- 4.- Aislamiento-cubierta de XLP (Polietileno de Cadena Cruzada) en color negro.



Cable de aluminio con núcleo de acero y recubrimiento de aluminio soldado tipo ACSR-AS

- 1.-Núcleo de alambres de acero recubiertos de aluminio.
- 2.- Conductor formado por alambres de aluminio duro en capas concéntricas.

Es importante mencionar que las líneas subterráneas son de elevados costos y de complicada construcción, hechos que se justifican con el objetivo principal que persiguen estos sistemas; que son la confiabilidad, seguridad, mantenimiento mínimo, continuidad del servicio entre algunos otros.

En el Capítulo 1 se mencionan las características de los sistemas subterráneos con la finalidad de comprender las partes fundamentales de este tipo de sistema, sus ventajas y desventajas, y los puntos que se deben tomar en cuenta para la elaboración de una red de este tipo.

APÉNDICE G

COMPONENTES DE UNA RED ELÉCTRICA SUBTERRÁNEA



G.1.- Equipos y elementos que componen una red eléctrica subterránea.

En seguida se mencionaran las características de los elementos que conforman una red subterránea:

G.1.2- Subestación eléctrica: Es un conjunto de dispositivos eléctricos que forman parte de un sistema eléctrico de potencia; sus principales funciones son transformar tensiones y derivar circuitos de potencia. Para determinar la capacidad con la que debe contar una subestación eléctrica se debe tomar en cuenta la demanda actual y el crecimiento que se puede tener la misma, por lo menos en un espacio de 10 años. Previendo los espacios necesarios para diversas modificaciones.

Una subestación también se considera como un medio de conexión para posibilitar la distribución de energía eléctrica. Esta, tiene la función de modificar las características de la tensión y corriente provenientes de la red.

Existen diversas clasificaciones de las subestaciones eléctricas de acuerdo a las características con las que cuenta.

Clasificación de acuerdo a la construcción.

Abiertas: este tipo de subestaciones tiene dispositivos y elementos en contacto con la intemperie. Este tipo de subestaciones son muy usuales en México. Son de clase receptoras en tipo poste y las de tipo azotea.

Tipo pedestal: son denominadas también de tipo jardín, y el principio del diseño es que en un mismo tanque se encuentren los devanados del transformador, los dispositivos de protección y seccionamiento.

Compactas o blindadas: se encuentran integradas dentro de un gabinete de metal, fabricado de lámina de calibre 12 o mayores que proporcionan la

seguridad de los elementos ahí dentro. Este tipo de subestaciones pueden ser del tipo interior o intemperie.

Encapsuladas: contienen los elementos inmersos en un material aislante llamado hexafluoruro de azufre (SF₆) o algún otro aislante no flamable y emplean interruptores con capacidad nominal superior a 200 A

Subestación tipo bóveda: este tipo de subestación son las más utilizadas en sistemas subterráneos, consisten en un recinto subterráneo con equipos y elementos tipo sumergible.

Clasificación de las SE por el nivel de tensión que manejan.

Distribución primaria: las tensiones bajo las cual operan este tipo de subestaciones están entre los 23 kV a los 115 kV

Distribución secundaria: son subestaciones que manejan tensiones menores a 23 kV

Elevadoras: empleadas en transmisión eléctrica para tensiones mayores a los 230 kV

Receptoras: son aplicadas en subtransmisión de energía eléctrica en tensiones que se encuentran entre los 115 kV y 230 kV

Clasificación de las SE por su instalación.

Intemperie: Se encuentran instaladas al aire libre, siendo expuestas de esta manera a las condiciones climáticas como lluvia, viento, humedad etc.

Interior: Este tipo de subestaciones se operan a tensiones prácticamente bajas y en espacios pequeños. Se encuentran dentro de edificaciones que puedan brindarle el espacio necesario para todos sus elementos.

Blindada: Son espacios relativamente pequeños y sumamente protegidos, se emplea en lugares donde el riesgo al que están expuestos son mayores. Y sus elementos son de materiales muy resistentes.

Equipos existentes en una SE.

Las subestaciones a su vez, están compuestas por una serie de elementos que apoyan el funcionamiento de las mismas, por lo cual, es necesario mencionarlos de manera general ya que al igual que los cables conductores, son una parte indispensable de una red eléctrica. En este caso subterránea.

a) Transformador.- Este elemento tiene diversas funciones dentro de una subestación, por lo cual es muy importante su tarea dentro de la misma. Su uso es principalmente en la elevación de tensión, reducción de tensión y acoplamiento.

Interruptor.- Su función es la de conectar y desconectar partes de un circuito ya sea en condiciones de corriente normales ó en el caso de sobrecorriente cuando ocurra una falla

- c) Cuchillas.-** Son dispositivos de maniobra capaces de interrumpir la continuidad del servicio. Siempre se deben de operar sin corriente ya que no cuentan con una capacidad interruptiva y si puede ser utilizada bajo tensión.
- d) Transformadores de corriente.-** Se utilizan como medida de protección para los elementos de medición ya que disminuyen el valor de la corriente a un nivel que pueda ser tangible y seguro a los instrumentos.
- e) Transformadores de potencial.-** Se aplican para medir y como medio de protección, su principal función es la de disminuir a niveles seguros la tensión pero en general sin corriente, debido a que no cuenta con una capacidad interruptora.
- f) Fusible.-** Es un elemento de protección que interrumpe el funcionamiento de un circuito en caso de ocurrir una falla. Este elemento funciona debido a la fusión del elemento fusible, siendo esto una de sus principales características.
- g) Banco de baterías.-** Es una fuente de energía auxiliar, ya que de ellas depende el funcionamiento de las secciones de control y medición de una subestación eléctrica cuando ocurre una falla dentro de la misma {B-3}.
- h) Barras.-** El elemento principal de que se componen las barras colectoras es el conductor eléctrico que llamaremos barras. Cada juego de barras consta de tantos conductores como fases o polo componen al circuito ya que se tenga corriente directa o alterna.

APÉNDICE H

LEY DE OHM TÉRMICA



H.1.- Principios fundamentales

H.1.2.- Ley de Ohm Térmica

La transferencia existente de calor cuando no existe absorción del mismo en los elementos del sistema (estado estable), por su analogía con la ley de ohm eléctrica se le llama ley de ohm térmica y se define como:

$$\Delta T = wR_t \quad \dots H.1$$

Donde:

ΔT es la diferencia de temperatura a través del medio, en °C. Es análogo al voltaje en la ley de Ohm.

w es el calor transmitido a través del medio en el que existe una diferencia de temperatura, en W. Es análogo a la corriente eléctrica.

R_t es la resistencia térmica del medio, en °C/W. Es análoga a la resistencia eléctrica.

La ley de ohm térmica [Ver Figura H.1]

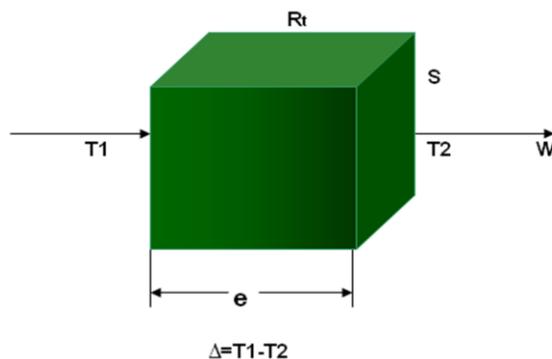


Figura H.1.- Ley de ohm térmica

La resistencia térmica en materiales sólidos planos está dada por la siguiente fórmula.

$$R_t = \rho_t \frac{e}{S} \quad \dots H.2$$

Donde

R_t es la resistencia térmica del material, en °C/W.

ρ_t es la resistividad térmica del material, en °C-m/W.

e es el espesor del material, en m.

S es el área de la sección transversal del material, en m^2

De esta ecuación se deducen las ecuaciones para la resistencia térmica en materiales sólidos cilíndricos. [Ver Figura H.2]

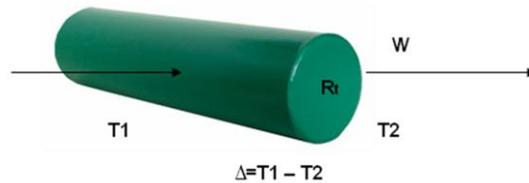


Figura H.2.- Representación de la resistencia térmica en materiales sólidos cilíndricos

La resistencia térmica en materiales sólidos cilíndricos en los que el calor fluye en forma radial está dada por la siguiente fórmula.

$$R_t = \frac{\rho t}{2\pi l} \ln\left(\frac{d_a}{d}\right) \quad \dots H.2$$

O por unidad de longitud:

$$R_a = \frac{\rho_t}{2\pi} \ln\left(\frac{d_a}{d}\right) \quad \dots H.3$$

Donde

R_t es la resistencia térmica del cilindro, en °C/W.

R_a es la resistencia térmica del cilindro por unidad de longitud, en °C-m/W.

ρ_t es la resistividad térmica del material, en °C-m/W.

l es la longitud del cilindro, en m.

d_a es el diámetro exterior del cilindro, en mm.

d es el diámetro interior del cilindro, en mm.

La resistencia térmica en materiales sólidos cilíndricos se representa en la Figura H.3

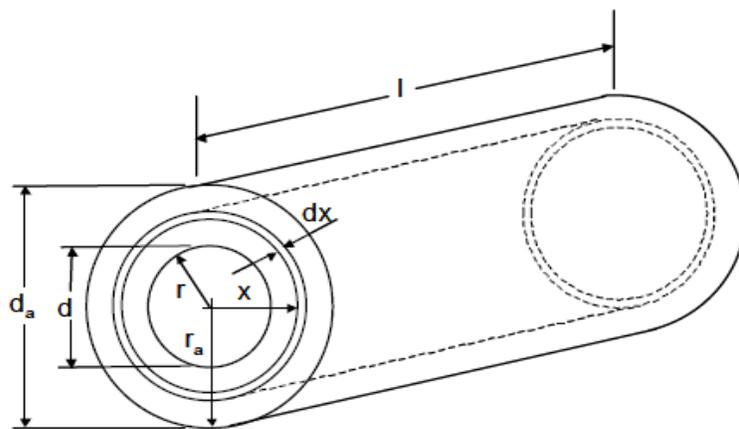


Figura H.3.- Resistencia térmica en materiales sólidos cilíndricos en los que el calor fluye en forma radial

Las ecuaciones que describen la Figura H.3 son las siguientes.

$$R_t = \rho_t \frac{e}{S} \quad \dots H.4$$

$$dR_t = \rho_t \frac{d_x}{2\pi x l} \quad \dots H.5$$

$$R_t = \int_r^{r_a} \frac{\rho_t d_x}{2\pi x l} \quad \dots H.6$$

$$R_t = \frac{\rho_t}{2\pi l} \ln\left(\frac{r_a}{r}\right) \quad \dots H.7$$

$$R_t = \frac{\rho_t}{2\pi l} \ln\left(\frac{d_a}{d}\right) \quad \dots H.8$$

Resistencia térmica por unidad de longitud (R_a):

$$R_a = \frac{\rho_t}{2\pi} \ln\left(\frac{d_a}{d}\right) \quad \dots H.9$$

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES



Conclusiones generales

De manera detallada se han abordado los puntos más importantes para determinar las características de los alimentadores eléctricos propuestos en este trabajo, que tienen como punto inicial la Subestación de Distribución Odón de Buen y que tienen como puntos finales las Subestaciones Generales 1, 2 y 4 de Ciudad Universitaria, UNAM. Para realizar una propuesta correcta de este tipo fue necesario considerar la confiabilidad que brinda cada tipo de sistema (aéreo y subterráneo) para dar paso a la selección y justificación de uno de ellos; dando lugar a una propuesta basada en un sistema de distribución subterránea.

En esta tesis se presenta una propuesta justificada con desarrollos basados en la teoría de autores con vasta experiencia en el ramo de distribución eléctrica, con análisis y desarrollos que fundamentan el diseño para la elección de los alimentadores y que le dan mayor veracidad a los resultados.

En la actualidad, en la realización de proyectos eléctricos se está perdiendo el interés por realizar trabajos que cuenten con estudios que den paso a la elaboración de propuestas adecuadas para un sistema. Es por eso que dentro de este trabajo se presentó una serie de estudios como: estructura y materiales presentes en los cables de energía, Ampacidad, caída de tensión, nivel de cortocircuito, demanda máxima en cada una de las Subestaciones Generales y tensión de jalado.

Uno de los puntos más importantes de la tesis es el estudio de demanda máxima, ya que de no haberlo realizado los resultados se hubieran visto muy afectados y la propuesta hubiera sido completamente diferente; todo esto debido a que, el dato de la demanda máxima fue considerado a partir de la coincidencia que tenían las demandas de cada instituto durante el transcurso de un determinado periodo y no como una demanda constante. Esto nos permitió minimizar las dimensiones del proyecto y aunque en este trabajo no se aborda de manera concisa la parte económica podemos asegurar que los costos se redujeron.

Por otra parte los valores obtenidos permiten garantizar que dentro de las condiciones normales de operación del sistema los alimentadores cumplirán con su tarea encomendada de manera satisfactoria.

Lo anterior se menciona con el objeto de remarcar importancia que tiene este tipo de estudios, que de manera negligente, se pudieran omitir en algunos casos, colocando en riesgo no solo instalaciones o equipos eléctricos, sino que además pone en riesgo el bienestar de los usuarios.

De manera concisa se puede decir que la realización de esta tesis en la manera que se efectuó, abrió un panorama amplio de lo que es sólo una parte de los sistemas de distribución, pero que ofrece una gran riqueza de conocimientos y criterios básicos en la formación de un ingeniero; como son las bases teóricas y metodológicas para justificar un proyecto y criterio ingenieril y analítico.

En este trabajo se buscó no solo plantear una solución a una necesidad, sino desarrollar un estudio de provecho que fuera útil para una posible aplicación y que sirva como fuente de conocimientos para sus elaboradores.

Parece tarea fácil la determinación de conductores, pero siempre es necesario considerar todos los parámetros que involucra su aplicación, a tal punto que es necesario partir de las necesidades de utilización de energía eléctrica de una dependencia, hasta las dimensiones nominales del cable. En pocas palabras el contenido de esta tesis promueve el diseño de proyectos con sustento y credibilidad.

Se recomienda en la instalación de Pozos de visita, Registros Hombre entre otras instalaciones en las que pueda ingresar agua, se haga uso de tecnología conocida como “pasa muros” estos para aislar estas áreas no solo contra el agua, sino también para otros factores como el aire, el polvo, la humedad incluso animales que puedan afectar la instalación y su operación de la misma. Optimizando así la trayectoria de la línea de alimentación y garantizando aun más su confiabilidad.

[1] Se conoce como efecto Joule al fenómeno por el cual si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. (Pág. 57)

[2] NOM-001-SEDE-2005 Art. 215-2, inciso b), nota 1. Los conductores de alimentadores, tal como están definidos en el Artículo 100, con un tamaño nominal que evite una caída de tensión eléctrica superior al 3% en la toma de corriente eléctrica más lejana para fuerza, calefacción, alumbrado o cualquier combinación de ellas, y en los que la caída máxima de tensión eléctrica sumada de los circuitos alimentadores y derivados hasta la salida más lejana no supere 5%, ofrecen una eficacia de funcionamiento razonable. (Pág. 99)

[3] MANUAL TECNICO DE CABLES DE ENERGÍA. 8.2 Las aplicaciones generales de cables de energía aislados para media tensión rara vez implican distancias mayores a los 10 kilómetros, lo que nos permite calcular estos cables como una línea de transmisión corta. En este caso la impedancia está dada por la combinación en serie de la resistencia del conductor con la inductancia del cable, ya que la corriente capacitiva absorbida por el cable es despreciable para los efectos de cálculo. (Pág. 132)

[4] Redes Eléctricas tomo 1. Cap. 4 En líneas cortas (no más de 60 km de longitud y de tensiones no mayores de 40kV aproximadamente) la capacitancia de la línea puede generalmente despreciarse. (Pág. 132)

[5] El factor 1.02 es la corrección para el caso de las líneas de distribución debido al incremento de la longitud (trenzado helicoidal). (Pág. 134)

[6] Se refiere a la morsetería, elementos para conexiones eléctricas y accesorios que se utilicen en instalaciones de centrales eléctricas y estaciones de transformación y distribución. (Pág. 36)

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

{B-1}

The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems

J. H. Neher

M. H. Mc Grath

Volume 76

1957

{B-2}

IEEE Standard Power Cable Ampacity Tables.

IEEE Std. 835 -1994

Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

{B-3}

Manual Técnico de Cables de Energía

Servicios Condumex, S.A. de C.V.

Cuarta edición, octubre 2006.

{B-4}

Sistemas de Distribución.

Ing. Roberto Espinoza y Lara.

Editorial Limusa.

Primera edición 1990.

{B-5}

Norma Oficial Mexicana

NOM-001-SEDE-2005, Instalaciones Eléctricas (utilización).

{B-6}

Diseño de subestaciones eléctricas, Facultad de ingeniería,

Ing. José Raúl Martín

México, UNAM, Facultad de ingeniería

Año 2000, segunda impresión

{B-7}

Redes Eléctricas 1

Jacinto Viqueira Landa

México, UNAM, Facultad de Ingeniería

2004

{B-8}

Estudio de corto circuito de la red eléctrica de distribución subterránea en media tensión de C.U. en 23 kV.

Cortes López Sergio

Sánchez Villanueva Rafael.

México, UNAM, Facultad de Ingeniería

2011

{B-9}

Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002

Sistema General de Unidades de Medida

México, Octubre, 2002

Sitios en red

{S1} http://www.centelsa.com.co/userfiles/boletines/cables_tecnologia.pdf

{S2} <http://www.encyclopedia.net>

{S3} <http://www.ingenieria.org>

{S4} <http://jamc-historiadelaelectricidad.blogspot.com/>

r