

57
2ij



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA.

ANÁLISIS METODOLÓGICO DE LA ELECTRIFICACIÓN DE LÍNEAS DE TRANSPORTE COLECTIVO -
ELECTRICO (M E T R O).

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N

MARIO GARCIA MORA
HECTOR J. LUIS HERNANDEZ VERDE
SEBASTIAN OSCAR LICONA VELAZQUEZ
JESUS SEGOVIA RAMIREZ
MIGUEL ANGEL VELEZ GONZALEZ.



DIR. FELIPE PEREZ FLORES.



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 está 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.

I N D I C E

C A P I T U L O 1

I N T R O D U C C I O N

	Pag.
1.1 Origen de la Transportación Colectiva.....	1
1.2 Panorama del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	5
1.3 Alcances.....	8

C A P I T U L O 2

D E S C R I P C I O N D E U N A L I N E A D E T R A N S P O R T E C O L E C T I V O M E T R O

2.1 Principio de Operación.....	12
2.1.1 Circulación de los Trenes.....	13
2.1.2 Señalización.....	14
2.1.3 Requerimientos de las Líneas.....	14
2.1.4 Operación de los Trenes.....	16
2.2 Alternativas de la Alimentación de la Corriente de Tracción. 16	
2.2.1 Introducción.....	16
2.2.2 Características Operativas de Cada Sistema.....	17
2.2.3 Evaluación, Técnico-Económica de las Opciones.....	19
2.3 Evaluación Global de la Energía.....	20
2.3.1 Balance Energético a Nivel de un Tren.....	20
2.3.2 Balance Energético a Nivel de la Línea.....	22

C A P I T U L O 3

S U M I N I S T R O D E E N E R G I A A L O S P U E S T O S D E R E C T I F I C A C I O N

3.1	Breve Descripción de Un Sistema de Energía Eléctrica.....	25
3.1.1	Introducción...-.....	25
3.1.2	Estructuras de Alimentación.....	26
3.1.3	Descripción del Sistema Central.....	28
3.2	Análisis de Redes	
3.2.1	Líneas de Conducción de Energía Eléctrica.....	29
3.2.2	Parámetros Eléctricos.....	41
3.2.3	Regulación de Voltaje.....	50
3.2.4	Potencias Activa, Aparente y Reactiva.....	52
3.2.5	Análisis de Corto Circuito.....	53
3.2.6	Valores en Por Unidad.....	63
3.3	Características de los Cables de Energía.....	66
3.3.1	Introducción.....	66
3.3.2	Descripción de un Cable de Energía Tipico.....	67
3.3.3	Pérdidas de Energía.....	74
3.3.4	Selección del Calibre Económico.....	76
3.3.5	Capacidad de Conducción de Cables.....	81
3.3.6	Instalación.....	85
3.4	Alternativas de Alimentación a Líneas del Metro.....	90
3.4.1	Introducción.....	90
3.4.2	Alternativas de Alimentación en 230 kV; a la Subestación General Puesto Central (PCC).....	91
3.4.3	Alternativa de Suministro en 23 kV; a las Subestaciones Rectificadoras; Comunmente Llamadas Puestos de -- Rectificación (PR's).....	91
3.4.4	Propiedades Comparativas de Métodos de Alimentación..	94
3.4.5	Confiabilidad de Alimentadores Aéreos y Subterráneos.	95
3.5	Estudio de Confiabilidad.....	96

3.5.1	Introducción.....	96
3.5.2	Factores que Intervienen en la Selección de una Estructura de <u>Alimentación</u>	98
3.5.3	Análisis de la Confiabilidad.....	100

C A P I T U L O 4

M A T E R I A L R O D A N T E

4.1	Introducción.....	121
4.2	Resistencias al Avance.....	122
4.3	El Motor de Tracción.....	124
4.4	Concepto de una Motriz.....	128
4.5	El Control en el Material Rodante.....	130

C A P I T U L O 5

P U E S T O S D E R E C T I F I C A C I O N

5.1	Generalidades.....	133
5.2	Descripción de un Puesto de Rectificación.....	133
5.2.1	Acometida.....	133
5.2.2	Tablero de Alta Tensión.....	134
5.2.3	Conjunto Transformador-Rectificador.....	135
5.3	Teoría de la Rectificación.....	137
5.3.1	Principales Características de los Diodos.....	137

5.3.2	Tipos de Montajes de Rectificación.....	144
5.3.3	Montaje de Rectificación Monofásico.....	145
5.3.4	Montaje de Rectificación Trifásico.....	149
5.3.5	Montaje de Graetz.....	158
5.4	Esquema General de Protecciones de los PR's.....	171
5.4.1	Mando y Control de las Subestaciones.....	171
5.4.2	Avería de Grupo.....	172
5.4.3	Incidente en Línea.....	172

C A P I T U L O 6

C I R C U I T O S D E T R A C C I O N

6.1	Enlace de los Puestos de Rectificación (PR's) con las Vías.....	174
6.2	Vías.....	176
6.2.1	Funcionalidad Eléctrica de las Vías.....	176
6.2.2	Resistencia Kilométrica de las Vías.....	180
6.3	Cupones de Protección y Cortes de las Barras.....	181
6.3.1	Cupones de Protección (CP's).....	181
6.3.2	Cortes en las Barras.....	182
6.4	Seccionadores de Aislamiento con Telemando (SIT's).....	183
6.5	Contactores de Seccionamiento (CS's).....	184
6.6	Otros Accesorios Importantes.....	185
6.7	Consideraciones para el Dimensionamiento de los Equipos.....	186

C A P I T U L O 7

I M P L A N T A C I O N D E P R ' s

7.1	Generalidades Sobre los Métodos de Cálculo.....	189
7.1.1	Objetivos de los Métodos de Cálculo.....	189
7.1.2	Hipótesis de Cálculo.....	190
7.2	Definiciones Relativas de Consumo de Tracción.....	191
7.2.1	Características del Servicio.....	191
7.2.2	Definiciones de Consumo.....	193
7.2.3	Características Dimensionales.....	194
7.3	Cálculos Eléctricos.....	200
7.3.1	Potencia Media Demandada a los PR's Instalados en Plena Línea, en función de la Distancia Interpostal (D).....	201
7.3.2	Caída de Tensión Máxima en Situación de Falla en un PR Instalado a Media Línea.....	201
7.3.3	Caída de Tensión Máxima en Situación de Falla en un PR en el Extremo de Línea.....	204
7.3.4	Distancia Máxima entre PR's (Dmax).....	207
7.3.5	Número Mínimo de PR's.....	208

C O N C L U S I O N E S.....	211
------------------------------	-----

B I B L I O G R A F I A.....	213
------------------------------	-----

C A P I T U L O I

I N T R O D U C C I O N

1.1.- Origen de la Transportación Colectiva.

El futuro de la Ciudad de México, que en la actualidad es una de las más pobladas del mundo y de acuerdo a los últimos estudios de la Organización de Naciones Unidas, quien considera que si sigue los índices de crecimiento actuales, será en el año 2000 la ciudad más poblada del planeta. Lo anterior, requiere decisiones que contemplan cabalmente el futuro del desarrollo nacional, primordialmente en relación al proceso de industrialización y desarrollo urbano del país.

Es importante señalar que el desarrollo urbano, no debe ni puede concebirse fuera del contexto socio-económico del país.

Esta gran metrópoli tiene innumerables problemas que requieren de una atención y solución inmediata, siendo uno de los principales el "tráfico".

Para solucionar este problema, es necesario crear la infraestructura a nivel de vialidad, facilidades de transportación pública, y sobre todo, proporcionar a los habitantes de la ciudad los medios necesarios para satisfacer sus necesidades de desplazamiento de un lugar a otro.

Mucho se dice, que la movilidad es la quinta de las libertades y el automóvil ha llegado a convertirse en garantía de aquella libertad a la vez que es aceptado por muchos como un símbolo del éxito en la vida. Esto con datos de la ciudad, se puede comprobar, ya que entre el año de 1950 y 1980, el número de automóviles registrados pasó de 55 mil a casi dos millones, con un aumento aproximado del 400% en sólo 30 años.

Podría pensarse, que este crecimiento en el número de vehículos privados, trae consigo una mejora en la situación de transporte urbano, pero la realidad indica lo contrario.

El planteamiento real del problema del transporte urbano, no consiste sin embargo, en saber si quienes usan sus automóviles para desplazarse estarán en condiciones de seguir haciéndolo al serle resueltos sus requerimientos básicos, como son: el de poder circular y el de poder -

estacionarse. Aún en el caso, cada vez más improbable de que pudiesen darse soluciones de largo alcance, para ello, el problema fundamental del tráfico en esta ciudad, consiste en poner a disposición de todos los ciudadanos, tanto los que tienen, como los que no tienen automóviles, los medios colectivos de transporte que por sus características - resulten atractivos para uno y otro de usuarios potenciales.

Resolviendo simultáneamente dos problemas: el de transportarse en general y el de circular por las avenidas y calles, ya que los automóviles particulares utilizarían los sistemas de transporte colectivo.

La población en la Ciudad de México llegó en 1950, a 3,100,000 habitantes, y en 1964 superó los 6,000,000, duplicándose en 14 años, al mismo tiempo que el área urbana aumentó de 200 Km² a 320 en el mismo período, y el número de vehículos automotores de 130 000 a 450,000, o sea - 3.5 veces. Esto creó grandes problemas de tránsito, reflejados en serios congestionamientos.

Para solucionar este último problema, las autoridades del Distrito Federal, construyeron tres vías rápidas de circulación continua: Viaducto Miguel Alemán, el Anillo Periferico y la Calzada de Tlalpan, destinados principalmente al tránsito de automóviles, por lo que el transporte masivo no tuvo ningún adelanto.

Como resultado del crecimiento anárquico, en 1965 se observa un uso -- irracional del suelo, una desordenada distribución de los centros habitacionales, comerciales e industriales y de otras actividades que obligó a los habitantes de la capital a realizar grandes recorridos en todas direcciones, en una superficie de 372 Km² limitada por el proyecto del Anillo Periferico y con longitudes máximas de 25 Km., de norte a sur y de 20 Km., de oriente a poniente.

La población, que en ese año ascendía a 6,330,000 habitantes y más de un millón en zonas periféricas, demostró que la tasa de crecimiento demográfico ya superaba al 5% anual.

Según registro de la Dirección de Tráfico, había en 1965, 309,710 ve-

hículos, el 80% de los cuales circulaban diariamente por la ciudad; -- 247,809 vehículos transportaban a 8,383,120 pasajeros por día, además de los transportes de carga, camionetas, remolques, bicicletas y motocicletas, cuyo número ascendía a 450 000. el 76% de la población se -- transportaba en medios masivos y el 24% en taxis y vehículos particula res.

Por la zona céntrica de la ciudad circulaban 4000 unidades de transpor te urbano correspondiente a 65 de las 91 líneas de autobuses y trans - portes eléctricos, además de 150.000 automóviles que acudían al centro y se estacionaban en las calles; sumándose a todo lo anterior el hecho de que el 40% del total de viajes diarios en la ciudad se realizaban - en esta área, originando que la velocidad de autobuses y tranvías en - algunas horas, fuera menor a la de los peatones.

La red vial de la Ciudad de México en 1965, estaba formada por una can tidad considerable de avenidas importantes, así como numerosos pasos a desnivel para la solución local de problemas viales.

Las soluciones adaptadas a la Ciudad de México, semejantes a las de -- otras grandes urbes principalmente encausadas al tránsito de automóvi les, demostraron:

- a) Que las vías rápidas no son útiles para resolver el problema del transporte masivo.
- b) Que el aumento de transportes sin planeación, sólo agrava los pro blemas de tránsito, las pérdidas de tiempo, el desgaste excesivo de los vehículos, aumentando también los problemas de contamina - ción.

Por todo lo descrito anteriormente se deduce que la zona centro de la Ciudad de México, había sido tradicionalmente la más conflictiva en -- cuanto al problema del tránsito de vehículos se refiere, fundamental - mente por las siguientes razones:

- a) Ha sido tradicionalmente el centro de las actividades comerciales

de la ciudad.

- b) La falta de planeación adecuada en los sistemas de transportación provocaba que el 75% de los autobuses y otros transportes colectivos transitaran por el primer cuadro de la ciudad.

Asimismo, el problema de transportación colectiva en la Ciudad de México se incrementaba cada día por:

- a) El crecimiento desmesurado de la ciudad, provocado por el aumento demográfico de la población.
- b) La demanda excesiva de transporte, debido principalmente a la falta de zonificación y planeación adecuada de la ciudad y zonas circunvecinas.
- c) Falta de coordinación entre los diferentes medios de transporte, lo que ocasionaba transbordos y competencias incesarias.
- d) Equipos obsoletos que proporcionaban un servicio lento, incómodo e ineficiente.
- e) Falta de continuidad en muchas avenidas y calles importantes.
- f) - Localización inadecuada de terminales de todo tipo de transportes.

Ante estas consideraciones, resultaba evidente que la solución fundamental para el transporte masivo de pasajeros, no podía estar orientada hacia el núcleo central de la ciudad y sus principales zonas congestionadas, a base de sistemas de superficie.

Por este motivo y dentro de una planeación racional, se vió la conveniencia de construir el Metro para que constituyera la columna vertebral de un sistema de transporte.

Esto sucedió a partir del año de 1965, en que se inician los primeros estudios para construir este sistema que es el más seguro, eficiente y con

fortable, respecto a cualquier otro sistema de transportación colectiva.

1.2.- Panorama del Sistema de Transporte Colectivo "Metro".

La historia del transporte en la Ciudad de México se ha venido desarrollando desde una vía acuática hasta una red vial formada por una cantidad considerable de avenidas importantes. Todo esto ha causado el crecimiento desmesurado de la ciudad, provocada por el aumento demográfico y la falta de planeación y zonificación adecuada del área metropolitana y zonas circunvecinas.

Por lo anterior, el Gobierno de la ciudad decidió ejecutar un importante programa de obras viales y proseguir con los planes de construcción, reorganización y ampliación de los medios de transporte colectivo de pasajeros, a efecto de que éstos sean más eficaces, cómodos y seguros para los usuarios. Para el cumplimiento del programa, fue necesario -- construir el Metro y posteriormente ampliar las líneas existentes con el fin de aumentar su capacidad y así canalizar por este medio; el -- transporte colectivo, lo que permite obtener importantes economías al reducir los tiempos de recorridos, los consumos de combustibles y la -- contaminación ambiental.

De forma paralela, se establece la regulación del explosivo crecimiento de las grandes aglomeraciones que se han dado en las grandes ciudades del País, debido a los problemas que la expansión urbana ha producido en ellas y al deterioro creciente que ha empezado a manifestarse en el nivel de vida de sus habitantes.

En 1979 la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, contaba con 14 - Millones de habitantes asentados en una superficie urbanizada de 1000 - Km²., dentro de la cual, el Distrito Federal ocupaba una área urbana - de 540 Km²., con 9 millones de habitantes. En él circulaban un millón - 990 mil vehículos incluyendo los que provenían de los municipios conur

bados y se generaban diariamente 18 millones 400 mil viajes.

Los medios con que disponía la ciudad para movilizar tal cantidad de viajes eran: los autobuses, que participaban con el 50.8% del total; los taxis, con el 13%; el Metro, con el 11.4%; los trolebuses y tranvías, con el 3.3%; los automóviles, con el 19.2% y otros vehículos que incluían bicicletas y motocicletas, participaban con el 2.3%. Conviene observar que de los casi 2 millones de vehículos que existían registrados, solamente el 3% eran de transporte colectivo y efectuaban el 79% de los viajes que se generaban; en cambio el 97% del resto de vehículos, compuestos básicamente por automóviles particulares, sólo atendían al 21% de los viajes.

Como se podrá observar, el problema de la vialidad y el tránsito persistía, por lo que gran parte de la solución consistía en invertir dicha situación, con el fin de incrementar el número y la eficiencia de los vehículos colectivos y constituir una alternativa viable para los que se transportaban en automóviles.

En lo que se refiere a los sistemas de transporte, las rutas de autobuses seguían siendo el soporte básico del transporte de superficie, ya que atendían la mitad del total de viajes que se generaban. No obstante, el servicio era insuficiente, ya que únicamente 5600 autobuses urbanos, de los 7800 concesionados, estaban en operación, es decir, el 70%; el 30% restante no funcionaban por fallas mecánicas u obsolescencia.

Aparte de los autobuses, los pasajeros del Distrito Federal, utilizaban el Metro. En 1976 estaban en operación 65 trenes con 3 líneas, mismas que conformaban una red de 41.5 Km. de longitud y que transportaban 1 millón 300 mil pasajeros diariamente. Desde que inició su operación, el número de pasajeros transportados se incrementó con una tasa promedio del 11% anual.

El Metro vino a constituir la incipiente columna vertebral del transporte que tanto estaba haciendo falta a la ciudad, debido a su rapidez, regularidad y capacidad del servicio. Sin embargo, es bien conocido

do que a pesar de su alta eficiencia, el Metro no puede resolver el total de viajes que se dan en la urbe y se requiere de su integración con los otros medios de transporte.

Además de los autobuses y el Metro, la ciudad contaba con 400 trolebuses y tranvías que funcionaban en una red de 320 Km y transportaban -- 588 mil pasajeros diariamente. Finalmente, los taxis completaban el panorama de vehículos de Transporte colectivo que daban servicio a los habitantes. Existían 37 500 unidades que movían poco más de 2 millones de pasajeros al día.

Operaban 100 rutas de "peseros", cuyo origen se debía a la insuficiencia del transporte colectivo.

Al panorama mencionado se agregaban los problemas que ocasionaban los automóviles, cuyo crecimiento acelerado, al rededor del 11% anual, o sea más del triple de la tasa anual de crecimiento demográfico agudizaba las situaciones de congestión, ocupaban el 70% de la vialidad para circular y estacionarse y únicamente transportaban 1.8 personas por viaje, mientras que los autobuses podían transportar 50 ó 60 pasajeros.

Además, está comprobado que en la Ciudad de México los principales causantes de contaminación no son las fuentes fijas, sino las móviles y de éstas, la gran mayoría son automóviles particulares.

La vialidad principal estaba constituida por una serie de obras inconclusas: un Anillo Periférico al que le faltaba terminar el 60%; el Circuito Interior el 75% y a la red de Ejes Viales el 75%.

Las calles secundarias también se caracterizaban por una falta de continuidad.

Las perspectivas que se tenían, en el supuesto de que las condiciones continuaran, señalaban que el problema se agudizaría para el final de siglo, en tal forma que los automóviles aumentarían su participación en el total de viajes del 19.2% al 29.5%; el Metro apenas se elevaría del 11.4% al 17.3%; los autobuses reducirían su participación del - -

50.8% a sólo 38% y los trolebuses bajarían del 3.3% al 1.6%. Es decir, se llegaría a un estado crítico de la circulación, debido principalmente al aumento del uso del transporte individual.

Para el año 2000 habría 11.5 millones de vehículos a los que solamente les correspondería una vialidad de 20 m² por vehículo. Es decir, a todas luces se tenía un panorama desalentador que significaría la paralización de la vida en la urbe.

Uno de los factores socio-económicos que más influyen en la vida de los habitantes de los centros urbanos es el de la vialidad y el transporte. El país no ha sido ajeno a este fenómeno, principalmente la capital, han tenido que soportar esta problemática. Una solución integral del traslado urbano, es el Sistema de Transporte Colectivo. Debido a que el desarrollo de una red se logra paulatinamente, se llevan a cabo estudios de Etapas de Ampliación del Metro, tomando como base un Plan Maestro que cuenta con la Planeación de una red de 21 líneas.

1.3. A l c a n c e s .

La experiencia internacional muestra que el transporte es un problema de carácter dinámico que no tiene soluciones integrales inmediatas y que el Plan de una Red de Transporte Colectivo se va desarrollando paulatinamente, apoyado en los resultados y experiencias obtenidas del proyecto, la construcción y la operación de cada línea.

En términos generales una Red de Transporte Colectivo Metro, se inicia con dos líneas principales perpendiculares entre sí y se desarrolla mediante la construcción de líneas paralelas, formándose una cuadrícula que cubre progresivamente el área urbana.

Es conocido el hecho de que el Metro no puede resolver la totalidad de los viajes, por lo que requiere de una integración con otros medios. Así mismo, para que el transporte de superficie sea eficaz, deberá con

tar con una adecuada infraestructura vial. Para lo cual se ha propuesto un Plan de Vialidad. Dicho plan pretende establecer una estructura jerarquizada de arterias continuas y regulares que satisfagan las necesidades de movilidad de la ciudad y que sea congruente con las expectativas de desarrollo urbano. Por este motivo, la vialidad primaria estará conformada, en primer término, por una red de arterias de acceso -- controlado, que consta de dos anillos concéntricos, denominados Anillo Periférico y Circuito Interior y radiales de penetración que en la actualidad están parcialmente construidas y que se integran a los viaductos existentes; Miguel Alemán y Talpan. Asimismo, se considera una red ortogonal de avenidas preferenciales, que comuniquen los centros urbanos previstos en el Plan de Desarrollo Urbano y una red secundaria de calles que permitan el acceso domiciliario, son 34 ejes viales, 17 de Oriente a Poniente y 17 de Norte a Sur con una longitud total de 533 - Km. Estas arterias cuentan con carriles preferenciales, uno de los cuales opera de acuerdo al sentido de la circulación general y otro en -- sentido contrario, ambos destinados a la circulación de vehículos colectivos.

A la fecha, se han realizado 252 Km. de ejes viales. De manera complementaria, la optimización del Sistema vial se logrará una vez que funcionen los 927 cruceros semaforizados, que serán manejados por computadora.

Las acciones básicas del Plan de Transporte de Superficie consisten en la implantación de una estructura de transportación colectiva de gran regularidad, capacidad y comodidad, formada por 76 rutas directas con recorridos a lo largo de la ciudad, de norte a sur y de oriente a poniente, así como 18 rutas adicionales de trolebuses y tranvías.

Incluye también la operación de vehículos colectivos de capacidad intermedia (microbuses) en zonas de baja densidad de pasaje.

Para aliviar la situación vial, diferentes dependencias conjuntamente, han puesto en operación cuatro terminales periféricas de autobuses foráneos, con el fin de que éstos no penetren a las zonas más congestionadas.

nadas. De la misma manera, los autobuses suburbanos están siendo limi-
tados en sus recorridos a efecto de concentrarlos en puntos de inter-
cambio modal, constituidos generalmente en las terminales del Metro, -
que cuentan, además de la propia estación de este sistema, con parade-
ros para autobuses urbanos y suburbanos, taxis colectivos y estaciona-
miento para automóviles particulares.

El Plan Rector incluye programas de estacionamientos, sin los cuales -
se cancelaría gran parte del esfuerzo realizado en obras viales. Una -
de las funciones asignadas a los estacionamientos será de la articular
el transporte individual con los servicios colectivos, a través de los
estacionamientos de transbordo, capaces de disuadir a los automovilistas
para que no viajen en sus vehículos hasta las zonas cosgestionadas.
Dichas instalaciones se ubican en la periferia, en los puntos cercanos
a las líneas de transporte de superficie y a las estaciones del Metro.

En 1978 se actualizó el Plan Maestro del Metro que previó la dotación-
a los habitantes de la ciudad al año 2000, con una red de 378Km., de -
longitud, en la que operarían 807 trenes en 21 líneas y tendría una ca-
pacidad de transportación de 24 millones de pasajeros por día.

Posteriormente en 1980, se formuló la versión vigente del Plan Maestro,
que contempla para fines de siglo una red de 444 Km., que requerirá de
882 trenes y que estará en posibilidades de transportar 26.33 Millones
de usuarios diariamente.

Actualmente y no obstante las modificaciones hechas al programa origi-
nal, para hacerlo congruente con las nuevas políticas económicas del -
país, están en operación un total de 111.52 Km. de red, en la que ope-
ran 202 trenes con una capacidad para transportar 6.5 millones de pasa-
jeros diariamente. El Metro, que es el medio de transportación masiva-
por excelencia, llega a los principales centros de trabajo y a impor-
tantes zonas habilitacionales.

Este sistema se ha visto complementado con la red ortogonal de trans-
porte de superficie, apoyándose mutuamente en la opción de recorridos.

La consolidación de un sistema de transporte eficiente y suficiente, - permitira disfrutar de los viajes, reducir los tiempos de trayecto, -- aumentar las horas destinadas a la productividad, cultura, arte y es - parciamiento, así como a la contemplación de la naturaleza y la obra - del hombre.

C A P I T U L O 2

DESCRIPCION DE UNA LINEA
DE TRANSPORTE COLECTIVO
"METRO"

Es importante, para ubicar la parte del proyecto de energía dentro del gran proyecto, en qué consiste una línea, conocer la estructura y principios básicos que la rigen, así como las demás especialidades involucradas y la forma en que necesitan interactuar para lograr un satisfactorio desarrollo del proyecto.

Las líneas comprenden las dos vías de circulación de trenes, las estaciones y el material rodante que las circula.

2.1 Principio de Operación.

Las dos vías utilizadas para el transporte de pasajeros son llamadas - "vías principales", una es la vía 1 y la otra vía 2. Las vías que se localizan fuera de la circulación normal de trenes son conocidas como - - "vías secundarias".

Una vía está constituida por barras de guiado de trenes (barras guías) que sirven igualmente para la alimentación positiva de tracción y pista de rodamiento metálicas que auxilian a los rieles de seguridad en el retorno de la corriente de tracción.

En ciertos puntos son instaladas "comunicaciones de vía", compuestas de dos desvíos y permiten llevar a cabo las maniobras de los trenes en estaciones terminales o estaciones de correspondencia para servicios provisionales de la línea, (ver figura 2.1).

Como no todas las líneas cuentan con talleres de mantenimiento éstas son unidas entre sí a través de "vías de enlace" permitiéndose así una comunicación entre todas las líneas y los pocos talleres de mantenimiento.

Todas las estaciones se componen de uno o dos andenes y dos vías. Algunas estaciones terminales tienen 3 vías paralelas, que permiten aumentar las alternativas en el cambio de vía lo cual agiliza e incrementa así la capacidad de transporte de la línea.

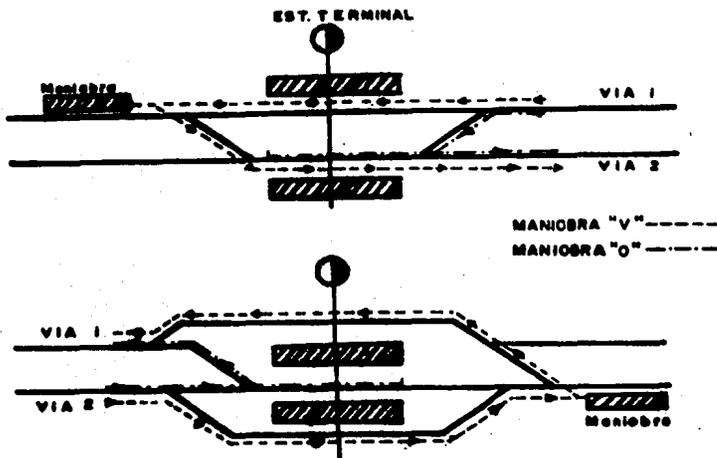


Figura 2.1 comunicaciones de vías en terminales

2.1.1 Circulación de los Trenes.

La circulación de los trenes hacia la derecha y la línea parte siempre por el andén de salida de la estación terminal.

Cuando un tren viene de la línea y se presenta en la terminal, en operación normal, descarga los pasajeros en el andén de llegada y posteriormente realiza su maniobra de cambio de vía, en comunicaciones posteriores a la terminal "maniobra V". Existe la alternativa de abandonar el andén de salida realizando el cambio de vía en comunicaciones anteriores a la terminal "maniobra O", pero esto sólo es utilizado en condiciones de emergencia.

Durante las horas de débil afluencia, ciertos trenes aguardan en vías secundarias de estacionamiento dispuestas en el fondo de las terminales. Ellos arriban directamente al andén de salida en las horas pico del servicio.

2.1.2 Señalización.

La señalización se realiza mediante señales luminosas laterales y son de dos categorías: Señales de espaciamiento, protegen contra una colisión de trenes sobre una misma vía. Señales de maniobra, encargados de proteger los itinerarios.

La base de todos los automatismos, consiste en la división de la línea en circuitos de vía (C.D.V.) y la señalización es asegurada por la ocupación de los C.D.V'S a través de los trenes. En principio, existen -- siempre dos señales permisivas entre dos trenes consecutivos (principio de la sección tapon), pero hay algunas excepciones en las que se autoriza la entrada de los trenes a la sección tapon a través de señales permisivas a velocidad reducida.

Las señales utilizadas en las zonas de maniobra (terminales, comunicaciones de vía, etcétera) permiten a los trenes recorrer los itinerarios establecidos y autorizados.

2.1.3 Requerimientos de las Líneas.

Para satisfacer los servicios a las líneas son asociados: Puestos de - rectificación; son los encargados de alimentar las vías para la corriente de tracción demandada por los trenes (750 ó 1500 V.C.D.). Subestación cabecera de Alumbrado y Fuerza; ubicadas cerca de las estaciones terminales establecen la frontera entre la compañía suministradora (C.L. y F.), y el cliente (S.T.C.), De cada una de éstas subestación-cabecera, parte un alimentador trifásico 23 KV, 60 Hz. (uno por vía), - hasta la siguiente subestación cabecera, a lo largo de su recorrido -- existe una derivación por estación que alimenta a la subestación de -- alumbrado y fuerza, esta reduce la tensión de 23000/220- 127 Volts., - para los servicios de la estación y el tramo correspondiente de línea, como se puede apreciar en la Figura 2.2.

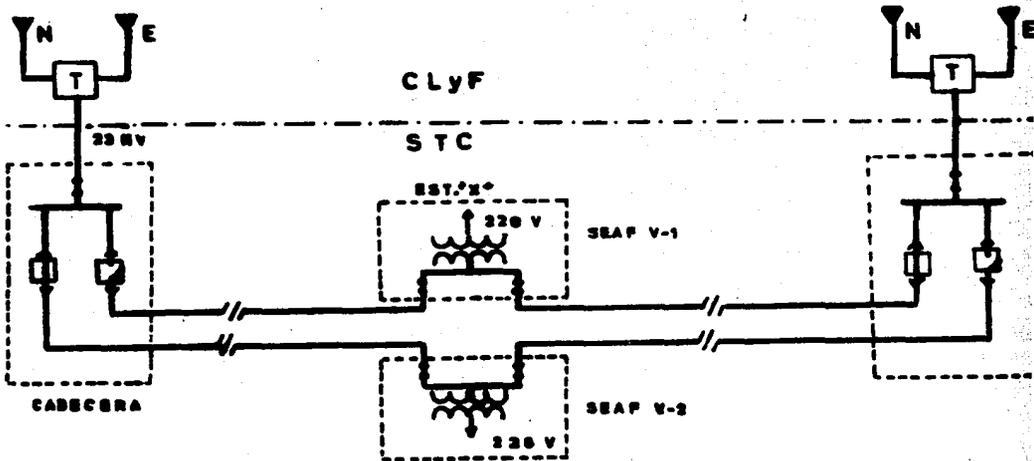


Figura 2.2. Distribución de Energía para Alumbrado y Fuerza

Talleres; necesarios para el mantenimiento del material rodante, sea de pequeña revisión o de gran revisión en donde el mantenimiento consiste en desmontar en su totalidad los elementos de un carro. Puesto central de control (P.C.C.); lugar donde se controla a distancia la circulación de los trenes y las personas responsables son los reguladores. El Centro de comunicaciones; es el sistema encargado de la operación en las estaciones y eventualmente de informar restablecimiento de servicios a los pasajeros. Puesto de Despacho de Carga (P.D.C.); supervisa y controla todo el conjunto de la distribución eléctrica, tanto para tracción como para la mediana tensión de alumbrado y fuerza.

Estos tres últimos centros están localizados en un mismo local.

2.1.4 Operación de los Trenes.

En servicio normal, la circulación de trenes en todas las líneas, es regulada desde el PCC.; pero en ciertos casos el PCC. puede delegar el mando a los pu-stos locales.

En caso de un incidente en línea local, las comunicaciones de vía -- permiten establecer servicios provisionales hasta estaciones impor-- tantes como las de correspondencia de línea.

En la operación normal de un línea, es importante mantener los inter-- valos de tiempo regulares entre trenes.

Para lo anterior el "calculador de tráfico" (programa de computadora del PCC), efectúa las correcciones de hora de salida de los trenes - en terminal así como la regulación de los intervalos entre los trenes en línea.

Para ésto el calculador interviene sobre los trenes deteniéndolos en las estaciones hasta que se libere la señal de despacho bajo orden - (D.B.O.) y controlando el tipo de marcha a la que circularán en pilotaje automático.

- ⤴ - Acelerado
- ^ - Acelerado lento
- = - Normal
- ∨ - Lento
- ∩ - Lluvia (en el caso de líneas a la intemperie).

2.2. Alternativas de la Alimentación de la Corriente de Tracción.

2.2.1 Introducción.

Es importante para el diseño de una línea de transporte colectivo definir cuáles son los principales elementos que la conforman y como se pueden moldear sus características para lograr un óptimo funcionamiento ante la operación deseada.

Así se muestra, enmarcándose dentro del rubro de un transporte tipo metro, las ventajas o desventajas técnicas, económicas y de operación que arroja el uso de catenaria, barra guía o tercer riel en los dos factibles niveles de tensión de 750 ó 1500 Volts. C.D. como sistema de distribución de la corriente de tracción.

De acuerdo a la capacidad del servicio de transporte de pasajeros que se pretende ofrecer con una línea, del tipo metro, es necesario por razones técnico-económicas y de calidad, entregar la energía requerida por el material rodante en corriente directa. Para satisfacer una continuidad del servicio, para este medio de transporte, la distribución de la energía de tracción forma una parte del proyecto que representa la totalidad de la línea y como tal sus variantes influyen directamente a la mayoría de las especialidades.

La búsqueda del sistema de tracción a utilizar depende como se mencionó de la operación deseada, influyendo principalmente la capacidad del transporte, velocidades máximas del servicio, intervalos mínimos entre trenes, etc. y en función de lo anterior se realiza una búsqueda tanto en la tensión de alimentación (750 ó 1500 volts), como en el modo de captación que es generalmente 3er. riel (barra guía) o catenaria. De cuya desición surge parte de la definición del material rodante, implantación y definición de las Subestaciones de rectificación y detallado de los proyectos señalización, mando centralizados, pilotaje automático, etc.

2.2.2. Características Operativas de Cada Sistema.

Considerando los sistemas tradicionales utilizados en los transportes eléctricos, este punto sólo se limita a mencionar las principales ventajas y desventajas, de cada uno de ellos.

Tercer Riel

Ventajas.

- . Debido a su posición al material rodante permite una muy segura forma de captación de corriente.
- . Tiene una larga vida (aproximadamente 4 veces más que la de una catenaria).
- . No presenta inconveniente a la integración urbana.
- . Sus seccionadores son simples y de gran confiabilidad.
- . Mantenimiento relativamente bajo.
- . Resistencia por vía doble normalmente pequeña.

Desventajas.

- . Sólo es recomendable para velocidades menores de 80 Km/hr.
- . Requiere ser seccionada en aparatos de vía.
- . Representa un riesgo para el cruce a nivel vías y en consecuencia -- debe ser una línea totalmente confinada.
- . Necesita corte de corriente directa en perturbaciones ligadas a la operación, como lo son personas en las vías, suicidio, incidentes entre trenes, etc.
- . Incrementa el ancho del gálibo de una línea en 40 cms.
- . Incrementa las pérdidas por efecto joule y las corrientes de fuga.

Catenaria.

Ventajas.

- . Permite velocidades elevadas hasta de 120 Kms/hr.
- . Es un sistema sin mucho riesgo para el personal y el usuario.
- . Cuando su tensión es de 1500 volts. reduce las corrientes vagabundas y las pérdidas por efecto joule.

Desventajas.

- . Es muy sometida a los efectos mecánicos del pantógrafo y a las condiciones del medio ambiente.
- . Hace más sofisticado el material rodante.

- . Existe una menor área de contacto entre el pantógrafo y la línea de contacto.
- . De acuerdo a datos estadísticos provocará mayor número de interrupciones de servicio.
- . Necesita para su mantenimiento plataforma de elevación.
- . Requiere tener tensión de alimentación elevada para justificar su -- instalación.

2.2.3. Evaluación, Técnico-Económica de las Opciones.

Tomando en cuenta que las líneas de interés de este trabajo son las urbanas, la catenaria presenta una cualidad de seguridad que reclama dificultades técnicas considerables como son: Una mayor frecuencia de -- mantenimiento, equipo más sofisticado para el mismo, menor calibre -- equivalente y menor contacto con el pantógrafo, por parte del hilo de contacto. A velocidades elevadas no es necesario establecer un buen -- contacto dado que la demanda de corriente es reducida y existen pocos -- arranques; para aplicarse en líneas urbanas es necesario elevar la ten sión para evitar este problema o reducir la capacidad por vehículo ten diendo hacia un trolebus, o tranvía convencional o bien incrementar el calibre equivalente del cobre.

Al doblar el peso de la catenaria, la distancia interpostal se tiene -- que reducir, e incrementar la calidad mecánica de los soportes. Además resulta complicado elevar la capacidad de transporte tratando de incre mentar el número de vehículo por tren ya que se tendría dos alternati vas:

- Aumentar el calibre del conductor de la catenaria y del circuito de -- retorno con sus considerables consecuencias.
- Incrementar la potencia instalada en la línea a través de PR's. que -- se intercalarían entre los existentes.

En caso de optar por una línea de metro convencional de tercer riel -- con rueda metálica resulta más factible incrementar la capacidad, ya -- que sólo se incrementa la potencia instalada por subestación y la obra

civil se reduce en comparación con lo necesario para la catenaria.

Una ventaja adicional del sistema con línea elevada es la reducción de los circuitos de ruptores de interestación utilizados en la línea convencional de metro.

Con base a datos de costos en una comparación catenaria/tercer riel, se indica que es aproximadamente equivalente el costo electromecánico de la catenaria con tensión de 1500 volts. (dado que así se aligera la línea elevada) y del sistema convencional de barras guías. Por lo que la aplicación de cada modo de captación y la tensión del sistema, depende principalmente del tipo de operación de la línea.

2.3 Evaluación Global de la Energía.

Es necesario conocer de manera general, las magnitudes de los flujos de energía existentes en el sistema, y así abordar con mayor sentido el problema de alimentación de una línea de metro.

Un balance energético puede elaborarse desde varios puntos de vista siendo los más descriptivos:

- Balance energético de un tren.
- Balance energético de la línea

Ambos nos otorgan información según sea el análisis.

2.3.1 Balance energético a nivel de un tren.

Este balance es considerado como el más simple y puede estar esquemátizado como lo muestra la Figura 2.3.

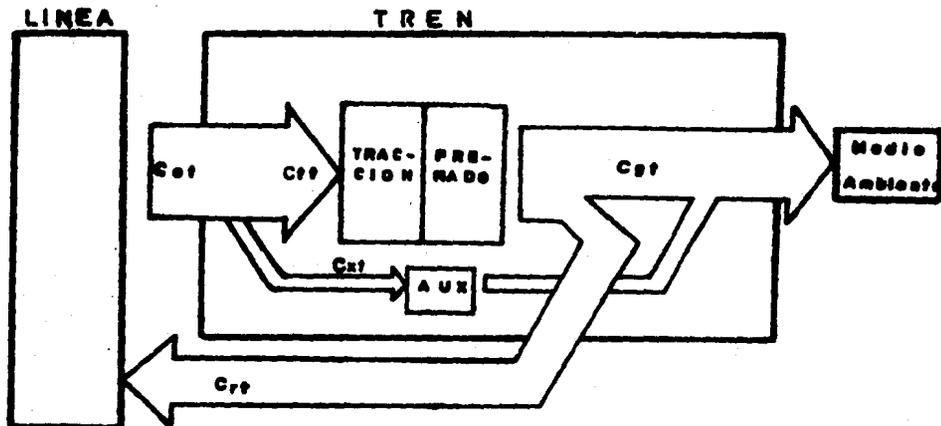


Figura 2.3. Balance energético de un tren.

Donde los parametros anotados en el esquema representan:

- C_{tt} : Energía eléctrica demandada en fase de tracción por los motores del tren.
- C_{xt} : Energía eléctrica consumida por los equipos auxiliares del tren, en un período de tracción-frenado.
- C_{at} : Energía eléctrica absorbida por el tren
- C_{rt} : Energía eléctrica efectivamente regenerada por el tren en fase de frenado. En el caso ideal " C_{rt}^* ", energía eléctrica regenerable, es decir aquella que sería efectivamente regenerada -- con una perfecta receptividad de la línea.
- C_{gt} : Energía global del tren: Es decir la parte de C_{at} que no puede ser regenerada.

De lo anterior:

$$C_{at} = C_{tt} + C_{xt} \quad 2.1$$

$$C_{gt} = C_{at} - C_{rt} \quad 2.2$$

Para caracterizar la regeneración se definen los siguientes términos:

Al cociente de la energía efectivamente regenerada entre la energía eléctrica demandada en fase de tracción "Tasa de regeneración" (TOg)- y es independiente del consumo de los auxiliares.

$$TOg = \frac{C_{rt}}{C_{tt}} \quad 2.3$$

- Receptividad de la línea (ETA), relación que existe entre las energías eléctricas efectivamente regenerada y la regenerable.

$$ETA = \frac{C_{rt}}{C_{rt}^*} \quad 2.4$$

Este factor es un parámetro de relación entre la forma de operación de la línea y la energía consumida por la misma.

2.3.2. Balance Energético a Nivel de la Línea.

Este análisis permite obtener datos más interesantes que el anterior y esquematizarlo en la forma mostrada en la Figura 2.4.

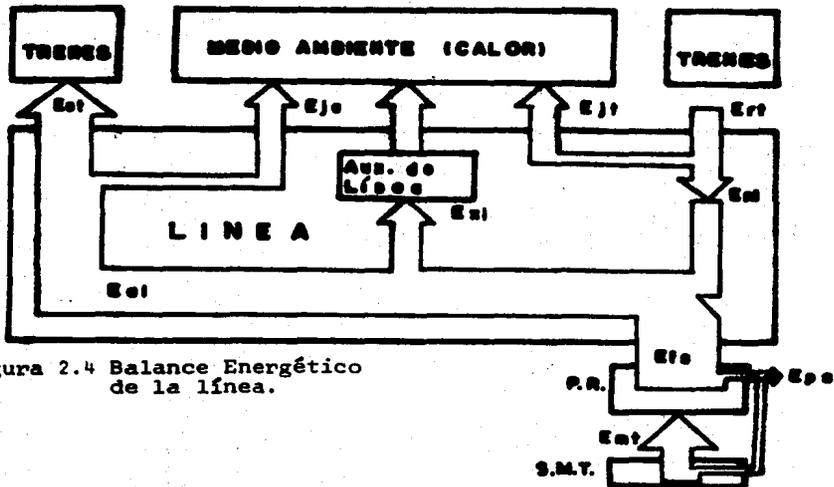


Figura 2.4 Balance Energético de la línea.

Si todos los trenes circulan en las mismas condiciones de operación y a un intervalo igual en toda la longitud de la línea, se demuestra que la energía Eat, registrada en un intervalo de tráfico es igual a la -- energía que absorbe un tren en un viaje de ida y vuelta.

Donde los parametros indicados en el esquema representan:

- Eja: Pérdidas por efecto Joule en la red de distribución debido a la corriente demandada por los trenes con regeneración inhibida.
- Eal: Energía que demandará la línea en ausencia de regeneración.
- Eat: Energía que entrega la línea a los trenes.
- Ert: Energía regenerada por los trenes.
- Erl: Energía efectivamente recuperada.
- Ejt: Suplemento de pérdidas por efecto Joule en la red de distribu -- ción correspondientes a la regeneración.
- Exl: Energía consumida por los auxiliares de la línea.
- Efs: Energía efectivamente entregada por los puestos de rectificación.
- Eps: Energía pérdida en los PR's y en los cables de mediana tensión.
- Emt: Energía consumida a la salida de las subestaciones de media ten -- ción (C.L. y E.C.).

De aquí se obtienen las siguientes relaciones:

Eal= Eat + Eja	2.5
Erl= Ert - Ejt	2.6
Efs= Eal - Erl + Exl	2.7
Emt= Efs + Eps	2.8

Así los índices de recuperación son los siguientes:

- Tasa de recuperación (TOr).

$$TOr = \frac{Erl}{Eal} \quad 2.9$$

Eficiencia de la línea en recuperación (η Or)

$$\eta Or = \frac{Erl}{Ert} \quad 2.10$$

Rendimiento de la línea en tracción (ROT).

$$ROt = \frac{Eat}{Eal}$$

2.11

Por otro lado existe también la alternativa de instalar onduladores a nivel de los puestos de rectificación, pero el costo de la instalación de los mismos no se justifica con la economía relativa que o torga la recuperación de energía en media tensión.

C A P I T U L O 3

**S U M I N I S T R O D E E N E R G I A A
L O S P U E S T O S D E
R E C T I F I C A C I O N**

3.1 Breve Descripción de un Sistema de Energía Eléctrica.

3.1.1. Introducción.

Un sistema de energía eléctrica consiste de: una gran diversidad de -- cargas eléctricas repartidas en una región, las Plantas generadoras -- donde se produce la energía eléctrica, la red de Transmisión y distribución empleada para transportar la energía de las plantas generadoras a los puntos de consumo y todo el equipo adicional necesario para lograr que el suministro de energía se realice con ciertas características que garanticen su eficiencia y calidad, como lo son; la Continuidad de servicio, la Regulación de tensión y la Frecuencia.

Las Plantas generadoras se localizan alejadas de los centros de consumo y se conectan a éstos a través de una red de alta tensión, aunque -- algunas plantas generadoras pueden estar conectadas directamente al -- sistema de distribución.

Un esquema elemental de las etapas principales que intervienen en el -- proceso de Generación, Transmisión y Distribución de la energía eléctrica se muestra a continuación en la Figura 3.1.

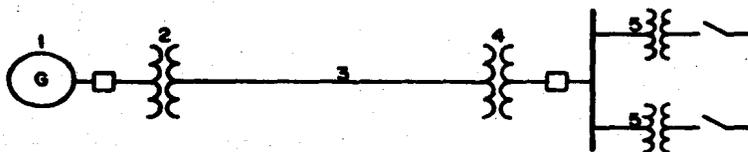


Figura 3.1 Esquema Elemental de un Sistema de Energía Eléctrica.

Donde:

1.- Generador

Por lo general trifásico se construyen para generar energía eléctrica con tensiones de 5 a 23 kV.

2.- Transformador elevador.

Eleva la tensión de generación a un valor económico para la transmisión.

3.- Línea de Transmisión.

Dependiendo de la magnitud de la energía a transportar y la -- distancia, en México puede ser de 69, 85, 115, 230 ó 400 kV.

4.- Transformador Reductor.

Reduce la tensión de transmisión a un valor adecuado para la - subtransmisión o la distribución (69, 34.5, 23, 13.8, 6 kV.)

5.- Transformador de Distribución.

Reduce la tensión de distribución a valores adecuados para la utilización de la energía eléctrica por los usuarios en forma trifásica o monofásica.

La tensión se eleva a la salida de los Generadores para realizar la Transmisión de energía eléctrica en forma económica y se reduce en - la proximidad de los centros de consumo, para alimentar el sistema - de distribución a la tensión adecuada. Esta alimentación puede hacer se directamente, desde la Red de Transmisión, reduciendo la tensión al nivel de Distribución o a través de un sistema de Subtransmisión, utilizando un nivel de tensión intermedio.

La elevación, reducción e interconexión de los distintos elementos - del sistema se realiza en las subestaciones, que constituyen los nodos de la red.

3.1.2.- Estructuras de alimentación.

Existen diferentes arreglos a emplear en el suministro de energía -- eléctrica a grandes cargas comerciales y/o industriales; de los cuales lo más empleados son los siguientes :

- Radial
- Anillo abierto
- Secundario selectivo
- Primario selectivo
- Mancha de red (Spot Network)
- Redes automáticas de baja tensión.

En la Fig. 3.2. se pueden observar estas estructuras.

- Radial

En este arreglo la energía sólo tiene una trayectoria de la fuente a la carga, de tal manera que cualquier falla en alguno de los componentes origina la pérdida total del suministro.

- Anillo Abierto.

Se forma con dos alimentadores primarios unidos a través de un anillo subterráneo que se encuentra abierto generalmente a la mitad por medio de un interruptor normalmente abierto; proporcionando así dos trayectorias de alimentación a la carga, con posibilidad de aislar cualquier componente fallado y restablecer el servicio a todo el resto de la línea.

- Secundario Selectivo.

En este caso el suministro de energía a la carga se hace a través de transformadores de distribución, energizados por trayectorias independientes que alimentan un bus secundario unido a través de interruptores de enlace normalmente abiertos. La salida de algún alimentador o uno de los transformadores origina la interrupción del suministro a una parte de la carga. Sin embargo estos esquemas se diseñan de tal manera que se abre el interruptor asociado al transformador fallado y la carga es llevada por el otro transformador a través del interruptor de enlace.

- Primario Selectivo.

El suministro de energía se hace con dos trayectorias que alimentan la carga a través de un interruptor de transferencia. Esta estructura mantiene un alimentador normalmente cerrado y otro abierto. Este arreglo permite reducir la interrupción del suministro a un tiempo mínimo.

- Mancha de Red.

Esta estructura consiste en dos o más trayectorias que alimentan a la carga. Cada trayectoria está formada por un alimentador primario y su transformador. Todos los secundarios de cada transformador están conectados a un bus común. Una falla en cualquier componente no interrumpe el suministro.

- Red Automática Secundaria.

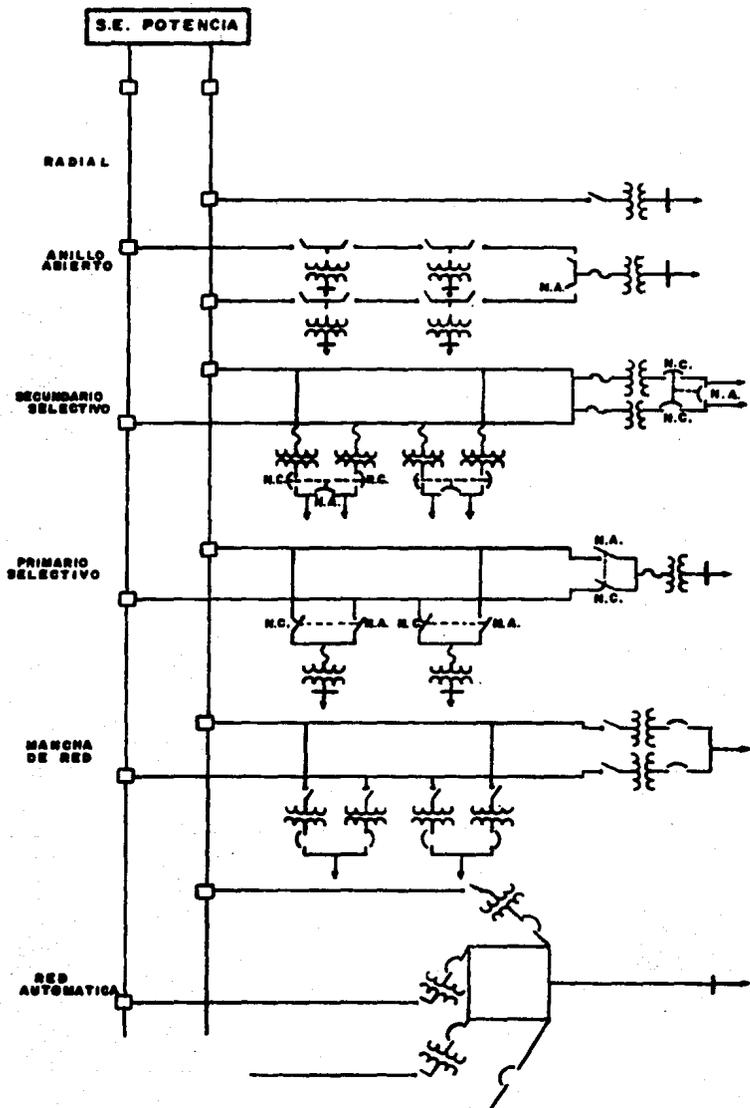


Figura 3.2 Estructuras de Alimentación.

La carga se alimenta directamente de una red de alimentadores secundarios, interconectados formando una malla, siguiendo el trazo de la zona urbana a la que se le suministra la energía eléctrica. La red secundaria se alimenta por varios alimentadores primarios radiales procedentes de una misma subestación a través de transformadores de distribución trifásicos. Al ocurrir una falla en un alimentador primario se abre el interruptor correspondiente de la subestación. La red automática puede funcionar satisfactoriamente con un alimentador primario fuera de servicio.

3.1.3. Descripción del Sistema Central.

El sistema central tiene una red de distribución de energía eléctrica, alimentado por plantas generadoras localizadas en diferentes estados de la República Mexicana. Proporciona servicio de energía eléctrica al Distrito Federal y gran parte de los estados de Morelos, -- Hidalgo, Estado de México y en menor proporción a los estados de Puebla, Guerrero y Michoacán. Para lograr la inyección de energía al sistema de distribución el area central cuenta con diferentes tipos de subestaciones de potencia localizadas en diferentes puntos de la -- ciudad y clasificadas como sigue:

- Subestaciones de distribución de 85/6 kV
- Subestaciones de distribución de 85/23 kV
- Subestaciones de distribución de 230/23 kV
- Subestaciones de subtransmisión de 230/85 kV
- Subestaciones de transmisión de 400/230 kV

En la Figura 3.3 se puede observar un diagrama del Sistema Central -- donde se indican las subestaciones, líneas de transmisión áreas y ca -- bles subterráneos, de diferentes voltajes.

En general un sistema de distribución se compone de:

- Subestación de distribución
- Red de distribución primaria
- Transformadores de distribución
- Red de distribución secundaria

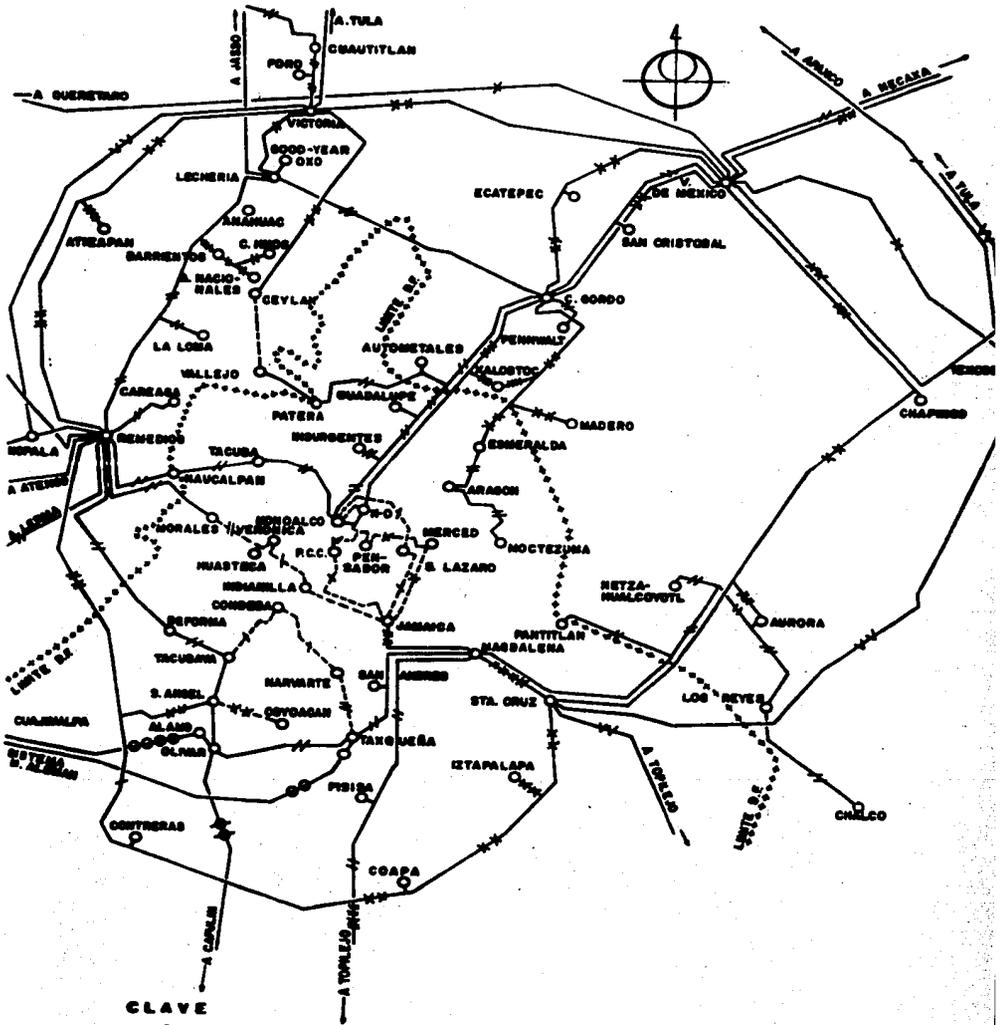


Figura 3.3 Sistema Central.

- Acometida y medición del servicio al cliente.

Un sistema de distribución comprende los alimentadores primarios que parten de las subestaciones de distribución, los transformadores de distribución para reducir la tensión y los circuitos secundarios hasta la acometida de la instalación del consumidor.

Los alimentadores primarios son trifásicos de 3 hilos; las tensiones entre hilos varían según los sistemas de distribución de tensiones - de clase 2.5 kV a 35 kV; la tendencia moderna es utilizar tensiones de la clase 15 kV o superior. En México las tensiones de distribución primaria más empleadas son 13.2 y 23 kV. (Ver tabla 3.2).

Los circuitos secundarios son generalmente trifásicos, de cuatro hilos, de 115 a 127 Volts, entre fase y neutro (200 a 220 Volts, entre fases) o de 220 a 240 Volts, entre fase y neutro (380 a 415 Volts, entre fases).

3.2 A n á l i s i s d e R e d e s .

3.2.1. Líneas de Conducción de Energía Eléctrica.

Las líneas de conducción de energía eléctrica pueden clasificarse de diferentes formas; entre las que se encuentra la siguiente:

- a) Longitud
- b) Instalación
- c) Función

a) Longitud

De acuerdo a su longitud estas pueden ser:

- Línea corta
- Línea media
- Línea larga

- Línea corta.- (No más de de 60 km y voltajes no mayores a 40 kV).- En las líneas cortas la capacitancia de la línea generalmente se des

precia y cada fase se representa por una impedancia serie, cuyo valor es igual a la impedancia por unidad de longitud multiplicada -- por la longitud de la línea. Ver Figura 3.4.

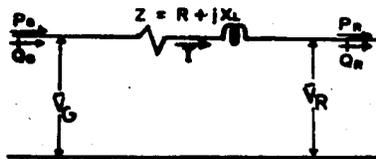


Figura 3.4 Circuito Equivalente de una Línea Corta.

donde:

- Z : Impedancia serie
- \bar{V}_G : Voltaje de generación
- \bar{V}_R : Voltaje de recepción
- \bar{I} : Corriente
- Q_G : Potencia reactiva en el extremo de generación
- P_G : Potencia activa en el extremo de generación
- Q_R : Potencia reactiva en el extremo de recepción
- P_R : Potencia activa en el extremo de recepción

Del circuito equivalente se tiene:

$$\bar{V}_G = \bar{V}_R + \bar{I} (R + jX_L) \quad 3.1$$

La potencia compleja por fase en el extremo de recepción es :

$$S_R = P_R + jQ_R = \bar{V}_R \bar{I}_R^* \quad 3.2$$

donde: \bar{I}_R^* es el conjugado de \bar{I}_R

La potencia compleja por fase en el extremo de generación es :

$$S_G = P_G + jQ_G = \bar{V}_G \bar{I}_G^* \quad 3.3$$

donde : \bar{I}_G^* es el conjugado de \bar{I}_G .

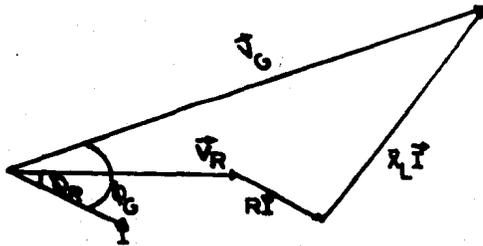


Figura 3.5 Diagrama Vectorial de una Línea Corta.

Las pérdidas reales por fase

$$p = P_G - P_R \quad 3.4$$

Las pérdidas reactivas por fase

$$q = Q_G - Q_R \quad 3.5$$

La eficiencia de la línea

$$\% \eta = \frac{P_R}{P_G} (100) \quad 3.6$$

La regulación de voltaje

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_{R0} - V_R}{V_R} (100) \quad 3.7$$

donde:

V_{R0} = Módulo del voltaje en vacío en el extremo de recepción

V_R = Módulo del voltaje a plena carga en el extremo de recepción

para el caso de una línea corta $V_{R0} = V_G$ quedando entonces:

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_G - V_R}{V_R} (100) \quad 3.7 a$$

V_G Módulo del voltaje en el extremo de generación.

- Línea media.- Esta clasificación incluye las líneas cuya longitud se encuentra entre 60 y 250 km. con voltajes de operación que van de 40 kV a 220 kV. En las líneas de longitud media, la capacitancia no se desprecia y para incluirla se emplean dos modelos que implican el considerarla como concentrada en :

- . Un punto (circuito " T ")
- . Dos puntos (circuito " π ")

Circuito " T "

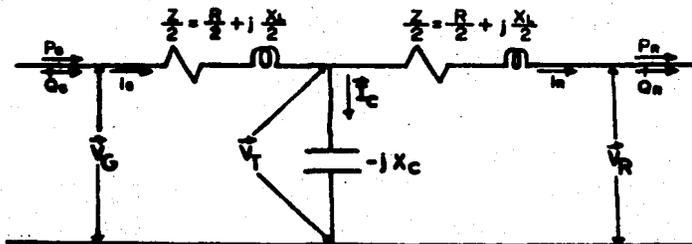


Figura 3.6 Circuito " T "

donde:

\vec{I}_C : Corriente en la capacitancia.

\vec{V}_T : Voltaje en el centro del circuito.

$$\vec{V}_T = \vec{V}_R + \vec{I}_R \cdot 1/2 (R + jX_L) \quad 3.8$$

$$\vec{I}_C = \frac{\vec{V}_T}{-jX_C} \quad 3.9$$

$$\vec{I}_G = \vec{I}_R + \vec{I}_C \quad 3.10$$

$$\vec{V}_G = \vec{V}_T + \vec{I}_G \cdot 1/2 (R + jX_L) \quad 3.11$$

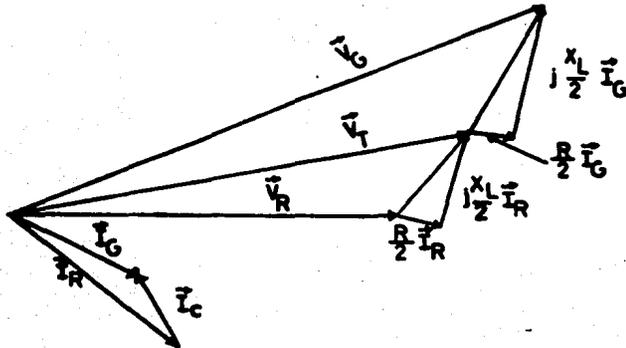


Figura 3.7 Diagrama Vectorial del Circuito " T " .

En el circuito " T " la potencia compleja en el extremo receptor y generador, las pérdidas reales y reactivas, la eficiencia y la regulación del voltaje se calculan igual que en la línea corta. La regulación de voltaje (V_{Ro}) se obtiene de la siguiente manera:

$$\vec{I}_o = \frac{\vec{V}_G}{\frac{R}{2} + j\frac{X_L}{2} - jX_c} \quad 3.12$$

$$\vec{V}_{Ro} = -jX_c \vec{I}_o \quad 3.13$$

Una vez que se obtiene V_{Ro} se emplea la expresión 3.7

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_{Ro} - V_R}{V_R} (100)$$

Circuito " π "

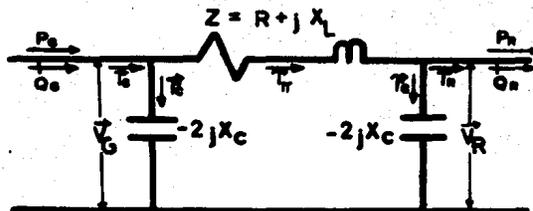


Figura 3.8 Circuito " π "

donde:

$$\vec{I}'_C = \frac{\vec{V}_R}{-2jX_C} \quad \begin{array}{l} \text{Corriente en el capacitor} \\ \text{del extremo receptor.} \end{array} \quad 3.14$$

$$\vec{I}_\pi = \vec{I}_R + \vec{I}'_C \quad \begin{array}{l} \text{Corriente que circula en la} \\ \text{impedancia en serie.} \end{array} \quad 3.15$$

$$\vec{V}_G = \vec{V}_R + \vec{I}_\pi (R + jX_L) \quad \begin{array}{l} \text{Voltaje en el extremo de ge-} \\ \text{neración} \end{array} \quad 3.16$$

$$\vec{I}''_C = \frac{\vec{V}_G}{-2jX_C} \quad \begin{array}{l} \text{Corriente en el capacitor} \\ \text{del extremo generador} \end{array} \quad 3.17$$

$$\vec{I}_G = \vec{I}_\pi + \vec{I}''_C \quad \begin{array}{l} \text{Corriente en el extremo} \\ \text{generador} \end{array} \quad 3.18$$

En el circuito " π " la potencia compleja en el extremo receptor y generador, las pérdidas reales y reactivas, la eficiencia y la regulación de voltaje se calculan igual que en la línea corta. Para calcular la regulación de voltaje (V_{Ro}) se obtiene de la siguiente manera:

$$\vec{I}_O = \frac{\vec{V}_G}{R + jX_L - 2jX_C} \quad 3.19$$

$$\vec{V}_{Ro} = -2jX_C \vec{I}_O \quad 3.20$$

Una vez que se obtiene V_{Ro} se utiliza la expresión 3.7

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_{Ro} - V_R}{V_R} (100)$$

- Línea larga.- Incluye a todas las líneas con longitudes superiores a 250 km y cuya tensión de operación es superior a los 220 kV.- Para analizar este tipo de líneas se consideran las constantes, distribuidas a lo largo de la misma como se muestra en la figura 3.9.

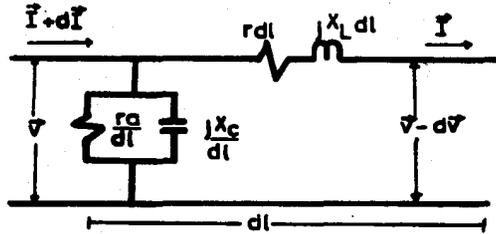


Figura 3.9 Sección Diferencial de una Línea Larga.

donde:

r : resistencia efectiva por unidad de longitud

X_L : reactancia inductiva por unidad de longitud

Z : $r + jX_L$ impedancia serie por unidad de longitud

ra : resistencia de aislamiento por unidad de longitud

Xc : reactancia capacitiva por unidad de longitud

$Z_L = \frac{-jXc \cdot ra}{ra - jXc}$ impedancia en paralelo por unidad de longitud

dl : Longitud del tramo diferencial de línea.

De la figura 3.9 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$d\vec{V} = \vec{I} Z \, dl \qquad \frac{d\vec{V}}{dl} = \vec{I} Z \qquad 3.21$$

$$d\vec{I} = \frac{\vec{V}}{Z_L} \, dl \qquad \frac{d\vec{I}}{dl} = \frac{\vec{V}}{Z_L} \qquad 3.22$$

La línea larga se puede representar como circuito " π ", como lo muestra la figura 3.10. Dicha representación se logra mediante un proceso matemático complicado donde se involucran ecuaciones diferenciales y utilización de funciones hiperbólicas lo cual lleva a la aplicación de las formulas 3.23 y 3.24.

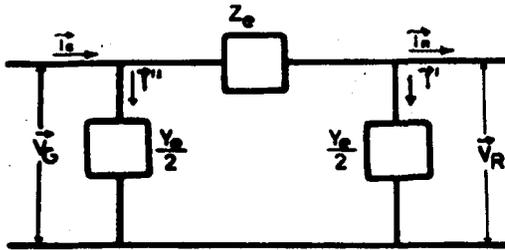


Figura 3.10 Circuito Equivalente para una Línea Larga

donde:

Z_e : impedancia equivalente serie

Y_e : Admitancia equivalente paralelo

Y : $\frac{1}{X_c}$ admitancia capacitiva

$$Z_e = \frac{Z \sinh Z Y}{Z Y} \quad 3.23$$

$$\frac{Y_e}{2} = \frac{Y}{2} \frac{\text{Tanh} \frac{Z Y}{2}}{\frac{Z Y}{2}} \quad 3.24$$

Una vez obtenidos los valores de Z_e e Y_e se puede proceder a la obtención de los parámetros, como si se tratara de un circuito "π" para línea media. Teniendo en cuenta que en este caso se encuentra una admitancia compleja y no solo imaginaria como en la línea media.

b) Instalación

De acuerdo a su instalación las líneas pueden ser :

- Líneas aéreas
- Líneas subterráneas

- Líneas aéreas.- Estas líneas pueden ser líneas cortas, medias o largas; las cuales se instalan en postes y torres, según su voltaje y capacidad de conducción. De acuerdo con lo anterior se eligen conductores y aislantes adecuados, para su correcto funcionamiento y --

seguridad del personal encargado de su operación y mantenimiento. --
Ver figura 3.11 y figura 3.14.

V E N T A J A S

- * Bajo costo
- * Facilidad de detección de fallas.
- * Facilidad de instalación

D E S V E N T A J A S

- * Poco confiables
- * Mantenimiento continuo
- * Expuestas a fallas frecuentes debido a su longitud de exposición.



Figura 3.11 Línea de Distribución Aérea.

- Líneas subterráneas.- Estas líneas son generalmente líneas cortas y se instalan en zonas donde la densidad de carga es alta (zonas urbanas), o en lugares donde la importancia y características de la -- instalación así lo requieran. Como su nombre lo indica su instalación es bajo tierra y los cables pueden ir directamente enterrados ó en ductos. Ver figura 3.12 y figura 3.14.

V E N T A J A S

- * Confiables
- * Poco mantenimiento

D E S V E N T A J A S

- * Alto costo
- * Dificultad en la detección de fallas

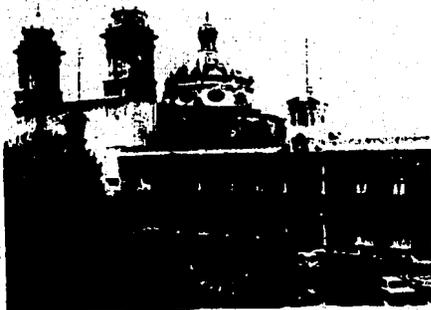


Figura 3.12 Línea de Distribución Subterránea.

c) Función

De acuerdo a su función estas pueden ser:

- Líneas de transmisión
- Líneas de distribución

- Líneas de transmisión.- Las líneas de transmisión son regularmente líneas largas y aéreas, cuya función primordial es llevar la energía eléctrica de las fuentes de generación a los centros de consumo, --- (ver Figura 3.13). En ocasiones existen subestaciones intermedias -- donde la tensión es reducida, antes de llegar a la subestación de -- distribución como se muestra en la Figura 3.14.

Las tensiones de transmisión que se emplean en la República Mexicana se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Tensiones de Transmisión.

<u>Tensión nominal kV</u>	<u>Tipo de Sistema</u>	<u>Tensión de servicio mínima kV</u>	<u>Tensión de servicio máxima kV</u>
69	3 fases 3 hilos	62.1	72.5
115	3 fases 3 hilos	103.5	123.0
230	3 fases 3 hilos	no se especifica	245.0
400	3 fases 3 hilos	no se especifica	420.0

- Líneas de distribución.- Las líneas de distribución son líneas medias y cortas, y pueden ser aéreas o subterráneas, su función es llevar la energía eléctrica de las subestaciones de distribución a las cargas (consumidores); el suministro puede ser en alta o baja tensión, ver Figura 3.14.

Las tensiones de distribución que se emplean en la República Mexicana-



Figura 3.13 Línea de Transmisión.

na, se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Tensiones de Distribución

<u>Tensión nominal V</u>	<u>Tipo de Servicio</u>	<u>Tensión de Servicio mínima V</u>	<u>Tensión de servicio máxima V</u>
120/240	1 fase 3 hilos	108/216	132/264
240</120	3 fases 4 hilos	216</108	264</132
220Y/127	3 fases 4 hilos	198Y/114	242Y/140
13 800	3 fases 3 ó 4 hilos	12 420	15 180
23 000	3 fases 3 ó 4 hilos	20 710	25 300
34 500	3 fases 3 ó 4 hilos	31 050	37 954

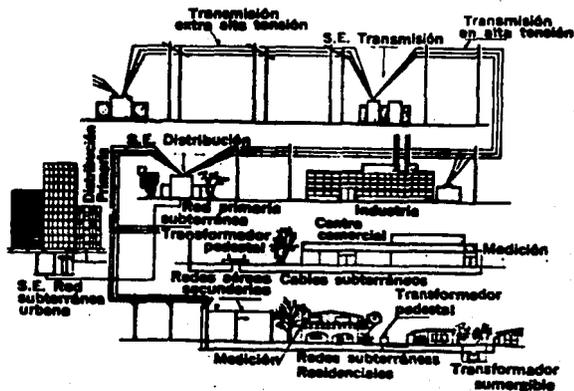


Figura 3.14 Diagrama Esquemático de la Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica a los centros de Consumo.

3.2.2. Parámetros Eléctricos.

Los parámetros que forman la impedancia de un componente eléctrico son:

- a) Reactancia Inductiva
- b) Reactancia Capacitiva
- c) Resistencia

- Reactancia Inductiva:

Inductancia.- Cuando en un conductor circula una corriente de magnitud variable en el tiempo se crea un flujo magnético variable, el cual se enlaza con los demás conductores del circuito (por los que también circulan corrientes de naturaleza análoga). La razón de la variación del flujo magnético a la variación de la corriente, el elemento, se le conoce como inductancia magnética (L)

$$L = \frac{\text{Variación del flujo magnético en el tiempo}}{\text{Variación de la corriente en el tiempo}}$$

3.25

en donde la inductancia generalmente se da en Henrys.

La inductancia de un cable está dada por la suma de la inductancia propia o interna " L_0 ", ya que parte del flujo generado corta al conductor mismo, más la externa " L_e ".

$$L = L_0 + L_e$$

3.26

La inductancia propia de un conductor es constante, dependiendo únicamente de su construcción; si es sólido o cableado. Matemáticamente se puede demostrar que para considerar que un conductor no es -- cortado por el flujo generado es necesario afectar el radio (r) de la sección por una constante ver tabla 3.3. Con esto se obtiene el radio de un conductor imaginario para el que todo flujo es externo, al radio así calculado se le conoce como radio medio geométrico RMG

Tabla 3.3 Radio Medio Geométrico

CONSTRUCCION DEL CONDUCTOR	RMG
Alambre sólido	0.779 r
cable de un solo material	
7 hilos	0.726 r
19 hilos	0.758 r
37 hilos	0.768 r
61 hilos	0.772 r
91 hilos	0.774 r
127 hilos	0.776 r

r: radio del conductor

La inductancia externa depende de la separación y disposición de los conductores, de la construcción del conductor y si está previsto o no de pantallas o cubiertas metálicas y la conexión a tierra de las mismas

$$L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{d}{\text{RMG}} \quad \text{H/km}$$

3.27

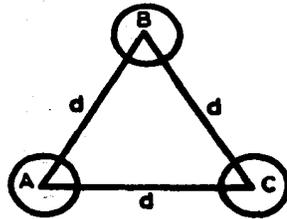
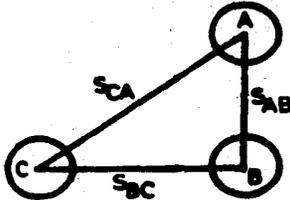
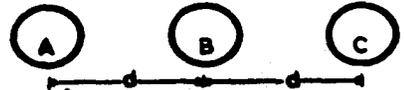


Figura 3.15 Disposición de Conductores (ver Ec. 3.27)



$$DMG = \sqrt[3]{S_{CA} S_{AB} S_{BC}}$$

Figura 3.16 Disposición de Conductores.



$$DMG = \sqrt[3]{2 \times d}$$

$$L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{DMG}{RMG}$$

3.28

La expresión 3.28 resulta de un desarrollo matemático para encontrar la inductancia L, en base a la separación que guardan los conductores uno con respecto al otro y a su mismo radio.

La reactancia inductiva depende de la frecuencia del Sistema y del valor de la inductancia total (suma de la inductancia propia y externa) del conductor y se obtiene de la siguiente expresión.

$$X_L = 2 \pi f L \quad \text{ohm/km}$$

3.29

donde:

f: frecuencia del sistema en Hertz

L: inductancia en Henrys/km

X_L : reactancia inductiva en ohm/km

Resistencia Capacitiva:

Capacitancia.- La capacitancia entre dos conductores se define como - la razón de la carga entre los conductores a la diferencia de potencial aplicada entre ellos y que en forma de ecuación se expresa como:

$$C = q/V \quad 3.30$$

donde:

q: carga entre los conductores en coulombs por km

V: diferencia de potencial en Volts

La capacitancia para cables desnudos, se puede obtener a partir de la expresión:

$$C = \frac{0.02412 \times 10^{-6}}{\log \frac{DMG}{r}} \quad \text{Farad/km} \quad 3.31$$

donde:

r: radio exterior del conductor

DMG: distancia media geométrica

Para cables monofásicos con cubierta o pantalla metálica:

$$C = \frac{0.02412 \text{ SIC} \times 10^{-6}}{\log \frac{da}{dc}} \quad \text{Fared/km} \quad 3.32$$

donde :

SIC: constante inductiva específica del aislamiento (ver Tabla 3.4)

da: diámetro sobre el aislamiento

dc: diámetro bajo el aislamiento

Tabla 3.4 Constante Inductiva Específica del Aislamiento

Aislamiento	SIC
Vulcanel EP	2.6
Vulcanel XLP	2.1
Sintenax	7.0
Papel Impregnado	3.9

Para cable tripolar:

$$C = \frac{0.166 \times 10^{-6}}{G} \quad \text{F/Km}$$

3.33

donde:

G: es el factor geométrico

El factor geométrico " G " lo determina la construcción del cable, es adimensional y depende únicamente de la relación entre conductores y aislamiento.

Este factor se puede obtener de la Figura 3.17

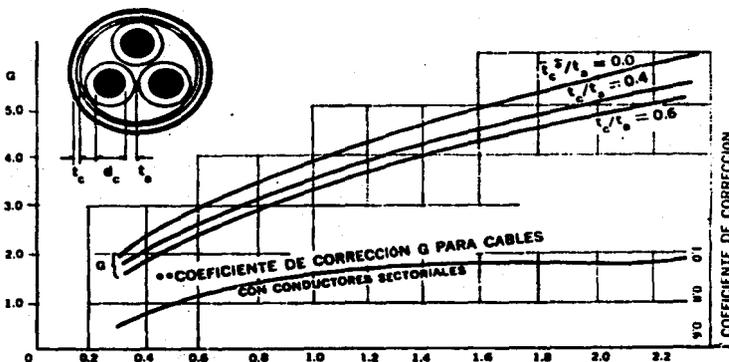


Figura 3.17 Factor Geométrico " G "

Para encontrar el valor del factor geométrico G, se hace lo siguiente

Calcular las relaciones $\frac{t_a + t_c}{d_c}$ y $\frac{t_c}{t_a}$

* Encontrar el valor de G en la gráfica

El valor de $\frac{t_c}{t_a} = 0$ se utiliza para cables sin cintura

** Si el cable es sectorial, multiplicar el factor geométrico G por el valor correspondiente del factor de corrección, utilizando co--

mo entrada a la gráfica la relación

$$\frac{t_a + t_c}{d_c}$$

La reactancia capacitiva por unidad de longitud, esta dada por la relación:

$$X_c = \frac{1}{2 \pi f C} \quad \text{Ohm-km} \quad 3.34$$

donde:

C: capacitancia en Farad/km

f: frecuencia del sistema en Hz

c) Resistencia.- La resistencia a la corriente directa de un conductor eléctrico, formado por un alambre de cualquier material, está expresada por:

$$R_{CD} = \rho \frac{L}{A} \quad \text{Ohm} \quad 3.35$$

donde:

L: longitud del conductor en km

A: area de la sección transversal del conductor en mm²

ρ : resistividad volumétrica del material del conductor en Ohm-mm²/km

El valor de la resistividad por volumen que ha normalizado la IACS, - International Annealed Copper Standart, a 20 °C y 100% de conductividad para el cobre es $\rho_c = 17.241 \text{ ohm-mm}^2/\text{km}$ y para el caso del aluminio grado E.C. con 61% de conductividad a 20 °C según IACS es -----
 $\rho_a = 28.28 \text{ ohm-mm}^2/\text{km}$.

El efecto de cableado debe tomarse en cuenta al determinar la resistencia de un conductor eléctrico, de tal manera que la expresión que permite calcular la resistencia de un conductor incluyendo este efecto es la siguiente:

$$R_{CD} = \rho \frac{L}{A} (1 + K_c) \quad 3.36$$

donde Kc es el factor de cableado.

Tabla 3.5 Factor de Cableado

Tipo de cable	Kc
Redondo normal	0.020
Redondo compacto	0.020
Sectorial	0.015
Segmental	0.020

En operación normal los conductores eléctricos, sufren cambios importantes en lo que se refiere a su resistencia, estos cambios son ocasionados por el incremento de la temperatura, el efecto que sufre la resistencia se puede apreciar en la Figura 3.18 y su cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$R_2 = R_1 (1 + \alpha (T_2 - T_1)) \quad 3.37$$

Donde 2 es el estado final y 1 el estado inicial y α es el coeficiente de corrección por temperatura, sus dimensiones son el recíproco de grados centígrados.

T= 234.5 °C para cobre recocido estirado en frío con 100% de conductividad, según IACS.

T= 238 °C para el aluminio estirado en frío con 61% de conductividad IACS.

$$\alpha = \frac{1}{234.5} = 0.00427 \quad \text{a } 0^\circ\text{C para el cobre}$$

$$\alpha = \frac{1}{234.5 + x^\circ\text{C}} \quad \text{a } x^\circ\text{C} \quad 3.38$$

La resistencia de un conductor eléctrico por el que circula corriente alterna, es mayor al que presenta el mismo conductor en corriente directa.

Este incremento es ocasionado por dos efectos:

- Efecto Superficial o piel (Ys)
- Efecto de Proximidad (Yp)

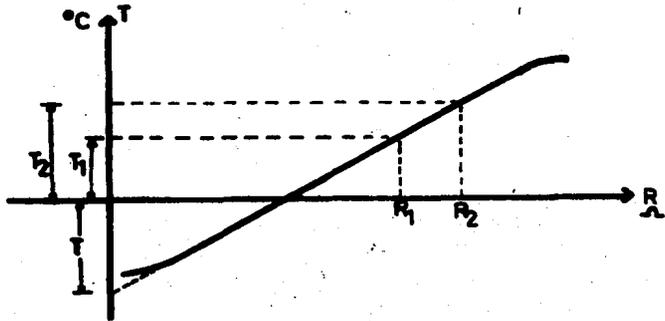


Figura 3.18 Efecto de la Temperatura sobre la Resistencia Eléctrica.

$$R_{CA} = R_{CD} (1 + Y_s + Y_p) \quad 3.39$$

donde:

R_{CA} : resistencia de corriente alterna

R_{CD} : resistencia de corriente directa

Y_s : Factor debido al efecto piel

Y_p : Factor debido al efecto de proximidad

Efecto Piel.- Este es debido a que cuando circula una corriente alterna, se crea un flujo magnético y en el centro del conductor se crean líneas de fuerzas mayores que en su periferia, por lo tanto, la densidad de corriente es mayor en la superficie que en el centro del conductor. También se le conoce como efecto pelicular o Kelvin.

El factor Y_s del efecto piel se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8 X_s^4} \quad 3.40$$

$$X_s^2 = \frac{8 \pi r f}{R_{CD}} \times 10^{-4} \text{ Ks}$$

donde:

K_s : factor del efecto piel debido a la forma del conductor; ver tabla 3.6

f : frecuencia del sistema en Hz

R_{CD} : Resistencia del conductor a la C.D. corregida a la temperatura de operación en Ohm/km

El efecto de proximidad, es debido a que por un conductor fluye una C.A. y se encuentra cercano a otro que transporta un flujo de iguales características, pero de sentido contrario; crea una resta vectorial de densidad de flujo, originando una reducción de la inductancia en las cargas próximas y un aumento en las diametralmente opuestas, dando por resultado una distribución no uniforme y un aumento aparente de la resistencia efectiva. (Válido para cables para los que alimentan carga monofásica y/o trifásica).

Para obtener Y_p , de efecto de proximidad, se emplea la siguiente expresión:

$$Y_p = \left[\frac{X_p^4}{192 + 0.8 X_p^4} \left(\frac{d_c}{S} \right)^2 \right] \left[0.312 \left(\frac{d_c}{S} \right)^2 + \left(\frac{1.18}{\frac{X_p^4}{192 + 0.8 X_p^4} + 0.27} \right) \right] \quad 3.41$$

$$X_p^2 = \frac{8 \pi f}{R_{CD}} \times 10^{-4} K_p$$

donde:

d_c : diámetro del conductor en cm

S : distancia entre ejes de los conductores en cm

K_p : factor de proximidad debido a la forma de conductores; ver Tabla 3.6.

En el caso de cables tripolares con conductor segmental, el valor de Y_p obtenido se debe multiplicar por 2/3, para obtener el factor de proximidad, también se debe sustituir en la fórmula original:

dc = dx, que es el diámetro de un conductor redondo de la misma área que el conductor sectorial.

$$s = dx + t$$

3.42

donde t es el espesor del aislamiento.

Tabla 3.6 Factores de corrección por Efecto Piel y de Proximidad.

Forma del conductor	Ks	Kp
Conductor redondo compacto	1.0	1.0
Conductor redondo	1.0	1.0
Conductor compacto segmental	0.435	0.37

3.2.3 Regulación de Voltaje

Considerése un alimentador de una misma sección, con n cargas conectadas como se muestra en la Figura 3.19

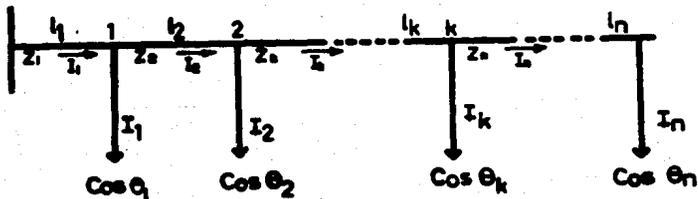


Figura 3.19 Alimentador Radial con Cargas Puntuales.

Conociendo la magnitud de la corriente, el factor de potencia y la impedancia por unidad de longitud, en cada carga la caída de tensión será:

$$\Delta VT = I_1 (\cos \theta_1 + j \text{sen } \theta_1) I_1 Z_1 + I_2 (\cos \theta_2 + j \text{sen } \theta_2) I_2 Z_2 + \dots + I_k (\cos \theta_k + j \text{sen } \theta_k) I_k Z_k + \dots + I_n (\cos \theta_n + j \text{sen } \theta_n) I_n Z_n \quad 3.38$$

donde:

ΔV_T : es la caída de tensión en Volts

I_K : es la corriente en la sección K-1 a K del alimentador en Amperes

L_K : Es la longitud al punto k en km.

$\cos \theta_k + \text{Sen } \theta_k$: es el factor de potencia en la carga k

Z : es la impedancia a lo largo del alimentador hasta el punto k en Ω/km .

De la Figura 3.19 se establece que en cada sección se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta V_T = (I \cos \theta - jI \text{Sen } \theta) (Z) l \quad 3.44$$

Sabiendo $Z = R+jX$ y considerando que se tiene una carga inductiva - la expresión 3.44 queda de la forma:

$$\Delta V_T = RI \cos \theta + IX \text{Sen } \theta + jX I \cos \theta - jR I \text{Sen } \theta$$

En la mayor parte de los casos que se presentan en las redes de distribución, los dos últimos términos son similares, es decir, $jX I \cos \theta \approx jR I \text{Sen } \theta$, de tal forma que la caída de tensión es:

$$\Delta V_T = RI \cos \theta + XI \text{Sen } \theta \quad 3.45$$

Lo que implica una simplificación en los cálculos en las redes de distribución, que se conoce como concepto de impedancia.

En forma gráfica se tiene simplificación y el error en que se incurre.

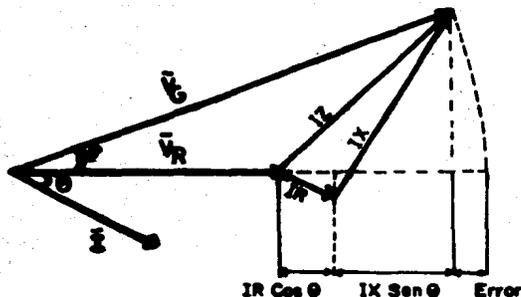


Figura 3.20 concepto de Impedancia.

Generalizando la expresión 3.45, para obtener la caída de tensión total en el alimentador de la Figura 3.19, se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta VT = (R_1 \cos \theta_1 + jX_1 \text{Sen } \theta_1) l_1 I_1 + (R_2 \cos \theta_2 + jX_2 \text{Sen } \theta_2) l_2 I_2 + \dots + (R_n \cos \theta_n + jX_n \text{Sen } \theta_n) l_n I_n$$

por lo tanto

$$\Delta VT = \sum_{i=1}^m (R_i \cos \theta_i + jX_i \text{Sen } \theta_i) l_i I_i \quad 3.46$$

La regulación de tensión de una línea es el incremento de la tensión en el extremo de recepción, expresado como un porcentaje de la tensión a plena carga, cuando se retira la carga con un factor de potencia, mientras que la tensión en el extremo de envío permanece constante. En forma de ecuación:

$$\% \text{ Reg.} = \frac{V_g - V_r}{V_r} (100) \quad 3.47$$

donde:

V_g : tensión sin carga

V_r : tensión con carga

3.2.4 Potencias Activa, Apariente y Reactiva.

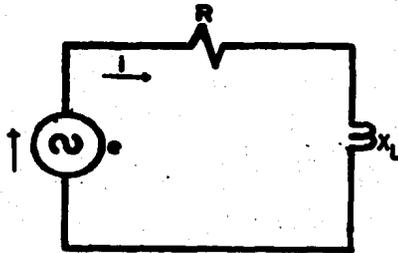


Figura 3.21 Circuito

La potencia media disipada en el circuito 3.21 es $P = I^2 R$, esta potencia disipada en la resistencia, se conoce como potencia activa (P).

La potencia almacenada en el campo magnético de la bobina, se denomina potencia reactiva (Q).

Para evitar cualquier error entre las potencias, disipada y almacenada, la unidad de potencia reactiva es el Volt-Ampere-Reactivo, abreviado (VAR), y la potencia disipada es el watt (W).

La potencia de entrada requerida para suministrar energía al circuito se denomina potencia aparente (S) y se expresa en Volts-Amperes (VA).

$$\vec{S} = \vec{P} + \vec{Q}$$

3.48

donde

P: es la potencia activa (I^2R)

Q: es la potencia reactiva (I^2X_L)

el factor de potencia está dado como:

$$f_p = \frac{P}{S} \frac{\text{potencia real}}{\text{potencia aparente}} \quad \left(\begin{array}{l} \text{Watts} \\ \text{Vars} \end{array} \right)$$

3.49

3.2.5 Análisis de Corto Circuito.

Una de las herramientas más poderosas para el estudio de los circuitos polifásicos desequilibrados es el de las componentes simétricas, que permite el estudio de las fallas asimétricas en sistemas de transmisión.

Las componentes simétricas consisten en un método que permite representar un sistema desequilibrado de "n" vectores relacionados entre sí, en "n" sistemas de vectores equilibrados.

Los "n" vectores de cada conjunto de componentes son de igual magnitud, siendo también iguales los ángulos formados por vectores adyacentes.

Aplicando la teoría de las componentes simétricas a un sistema trifásico de tensiones como el que se muestra en la Figura 3.22, el cual se descompone en tres sistemas equilibrados (ver Figura 3.23).

El vector tensión de cada fase, será igual a la suma de tres compo--

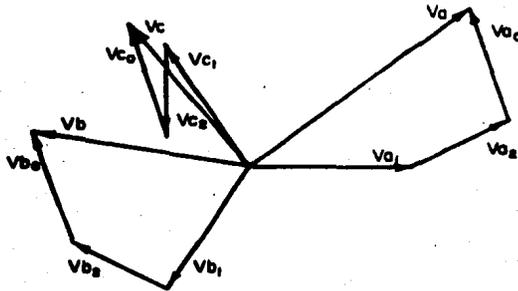
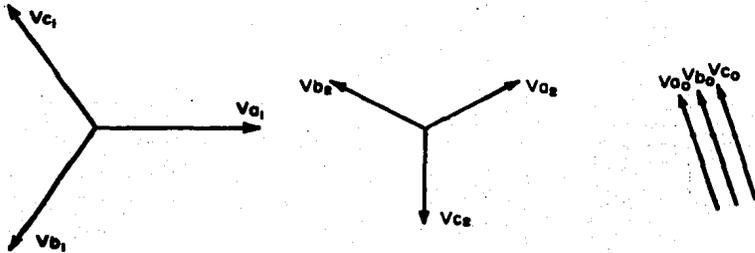


Figura 3.22 Sistema Trifásico Desequilibrado y sus Componentes Simétricas.



a) Sistema Trifásico balanceado secuencia positiva.

b) Sistema trifásico balanceado secuencia negativa.

c) Sistema trifásico balanceado secuencia cero.

Figura 3.23 Componentes Simétricas.

Componentes, llamadas cada una, secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero (Figura 3.23).

$$V_a = V_{a_1} + V_{a_2} + V_{a_0} \quad 3.50$$

$$V_b = V_{b_1} + V_{b_2} + V_{b_0} \quad 3.51$$

$$V_c = V_{c_1} + V_{c_2} + V_{c_0} \quad 3.52$$

Las componentes de secuencia positiva acompañadas con subíndice 1, - son tres vectores de igual magnitud y separación angular de 120° entre si, con secuencia "abc".

Las componentes de secuencia negativa acompañadas con subíndice 2, - son tres vectores de la misma magnitud y separación angular de 120° entre sí, con secuencia "acb".

Las componentes de secuencia cero, acompañados con subíndice 0, son tres vectores de la misma magnitud y con la misma dirección.

En el caso de un sistema trifásico, resulta conveniente definir al operador "a" como un vector de magnitud unitaria y dirección 120° en sentido contrario al de las manecillas del reloj, ver Figura 3.24

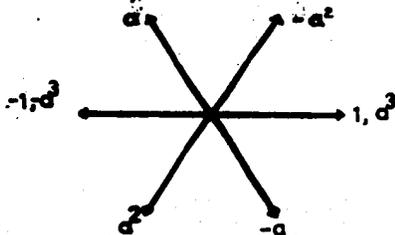


Figura 3.24 Diagrama Vectorial de las Potencias del Operador "a".

Por lo anterior resulta que:

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad \text{forma polar}$$

$$a = 1 (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ)$$

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{3}{2} \quad \text{forma carteciana}$$

también:

$$a^2 = -0.5 - j0.866$$

sumando $a^2 + a$ se tiene que:

$$a^2 = -0.5 - j0.866$$

$$a = -0.5 + j0.866$$

$$a + a^2 = -1$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

Haciendo uso de "a" se pueden obtener las siguientes ecuaciones en términos de las tensiones de secuencia positiva, negativa y cero.

$$V_a = V_{a_0} + V_{a_1} + V_{a_2} \quad 3.53$$

$$V_b = V_{a_0} + a^2 V_{a_1} + a V_{a_2} \quad 3.54$$

$$V_c = V_{a_0} + a V_{a_1} + a^2 V_{a_2} \quad 3.55$$

o en términos de las tensiones de fase

$$3 V_{a_0} = V_a + V_b + V_c \quad 3.56$$

$$3 V_{a_1} = V_a + a V_b + a^2 V_c \quad 3.57$$

$$3 V_{a_2} = V_a + a^2 V_b + a V_c \quad 3.58$$

De lo descrito anteriormente se pueden establecer las siguientes características:

- 1) Calcular las cantidades de fase; conocidas las componentes simétricas.
- 2) Calcular las componentes simétricas, conocidas las cantidades de fase
- 3) Las reglas que limitan el uso de las componentes simétricas son:
 - a) Tensiones de secuencia positiva, negativa o cero, inducen únicamente corrientes de secuencia positiva, negativa o cero respectivamente.
 - b) Corrientes de determinada secuencia, sólo podrán producir tensiones de esa misma secuencia.
 - c) Los elementos activos de la red, sólo generan tensiones de secuencia positiva.
 - d) Las tensiones de secuencia negativa y cero, se consideran generadas en el punto de falla y decrecen a medida que se van alejando de ese punto.
 - e) La tensión de secuencia positiva es mínima en el punto de falla y máxima en el punto de generación.
 - f) Como las corrientes de secuencia cero están en fase, y son de

igual magnitud, necesitan el neutro, cuarto conductor con conexión a tierra, para circular.

Interconexión de mallas de secuencias para distintos tipos de falla.

* Falla trifásica

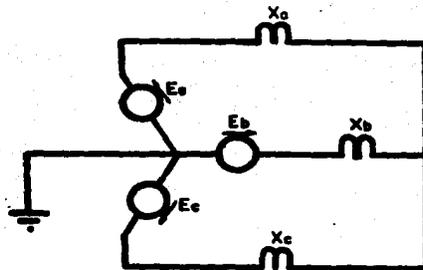


Figura 3.25 Diagrama Trifilar para Falla Trifásica.

Para secuencia positiva y tomando I_a como referencia.

$$3 I_{a_1} = I_a + a I_b + a^2 I_c \quad 3.59$$

como:

$$I_b = a^2 I_a ; \quad I_c = a I_a$$

sustituyendo en 3.59

$$3 I_{a_1} = 3 I_a$$

$$I_{a_1} = I_a$$

Para secuencia negativa

$$3 I_{a_2} = I_a + a^2 I_b + a I_c \quad 3.60$$

$$= I_a + a I_a + a^2 I_a$$

$$= (1 + a + a^2) I_a ; \quad 3 I_{a_2} = 0$$

Para secuencia cero

$$3 I_{a_0} = I_a + I_b + I_c$$

$$I_{a_0} = 0$$

En fallas trifásicas solo existe secuencia positiva, quedando la conexión de la siguiente manera:

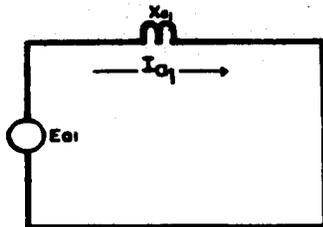


Figura 3.26 Circuito Equivalente de Falla Trifásica

$$I_{a_1} = I_{cc} = \frac{E_{a_1}}{X_{a_1}} \quad 3.61$$

* Falla de fase a tierra

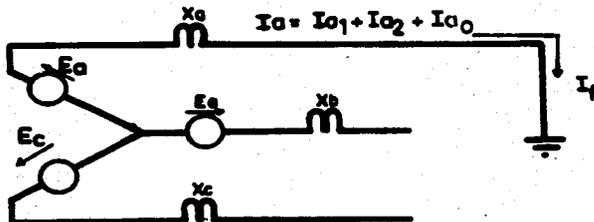


Figura 3.27 Falla de Fase a Tierra

Condiciones de falla:

$$V_a = 0$$

$$I_b = 0$$

$$I_c = 0$$

Como:

$$I_b = a^2 I_{a_1} + a I_{a_2} + I_{a_0} = 0$$

$$I_c = a I_{a_1} + a^2 I_{a_2} + I_{a_0} = 0$$

$$I_b - I_c = (a^2 - a) I_{a_1} + (a - a^2) I_{a_2} = 0$$

$$I_{a_1} = I_{a_2}$$

tambien:

$$I_b = a^2 I_{a_1} + a I_{a_1} + (I_{a_1} - I_{a_1}) + I_{a_0} = 0$$

$$I_b = (a^2 + a + 1) I_{a_1} - I_{a_1} + I_{a_0} = 0$$

$$I_{a_1} = I_{a_0} \quad \text{o sea} \quad I_{a_1} = I_{a_2} = I_{a_0}$$

Las redes deberán conectarse en serie para satisfacer este resultado.

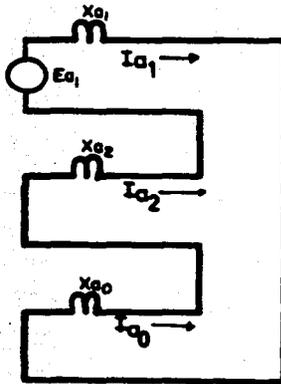


Figura 3.28 Conexión de las Redes de Secuencia para Falla de Fase a Tierra.

$$I_{a_1} = I_{a_2} = I_{a_0}$$

$$I_{a_1} = \frac{E_{a_1}}{X_{a_1} + X_{a_2} + X_{a_0}}$$

$$I_f = I_a = I_{a_1} = I_{a_2} = I_{a_0}$$

$$I_f = 3 I_{a_1}$$

$$I_f = \frac{3 E_{a_1}}{X_{a_1} + X_{a_2} + X_{a_0}}$$

3.62

* Falla de dos fases a tierra

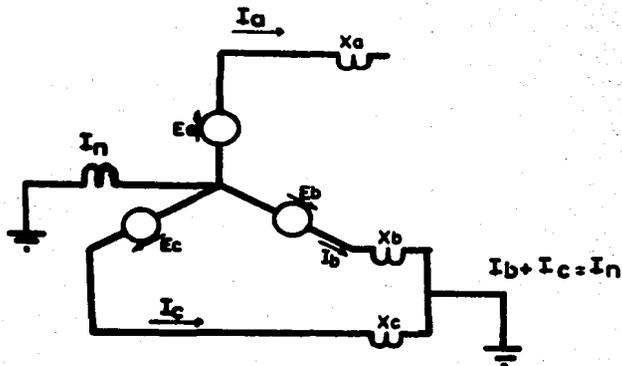


Figura 3.29 Falla de Dos Fases a Tierra

Condiciones de falla

$$V_b = 0 ; V_c = 0 ; I_a = 0$$

$$V_{a_1} = V_{a_2} = V_{a_0}$$

$$V_a = V_{a_1} + V_{a_2} + V_{a_0}$$

$$V_{a_1} = V_{a_2} = V_{a_0} = 1/3 V_a$$

Se pueden expresar:

$$Ea - Ia_1 Xa_1 = Ia_0 Xa_0$$

dividiendo entre Xa_0

$$\frac{Ea}{Xa_0} - Ia_1 \frac{Xa_1}{Xa_0} = Ia_0$$

$$Ea - Ia_1 Xa_1 = Ia_2 Xa_2$$

dividiendo entre Xa_2

$$\frac{Ea}{Xa_2} - Ia_1 \frac{Xa_1}{Xa_2} = Ia_2$$

$$Ea - Ia_1 Xa_1 = Ea_1 - Ia_1 Xa_1$$

$$\frac{Ea}{Xa_1} = \frac{Ea}{Xa_1}$$

Sabiendo que

$$\frac{Ea}{Xa_0} - Ia_1 \frac{Xa_1}{Xa_0} + \frac{Ea}{Xa_1} + \frac{Ea}{Xa_2} = \frac{Ea}{Xa_1}$$

$$Ia_1 \left(1 + \frac{Xa_1}{Xa_0} + \frac{Xa_1}{Xa_2} \right) = \frac{Ea (Xa_2 + Xa_0)}{Xa_2 Xa_0}$$

$$Ia_1 = \frac{Ea (Xa_2 + Xa_0)}{Xa_1 Xa_2 + Xa_1 Xa_0 + Xa_2 Xa_0}$$

$$Ia_1 = \frac{Ea}{Xa_1 + (Xa_2 Xa_0) / (Xa_2 + Xa_0)}$$

3.63

$$Xa_0 = 3 Xa_n + Xg_0$$

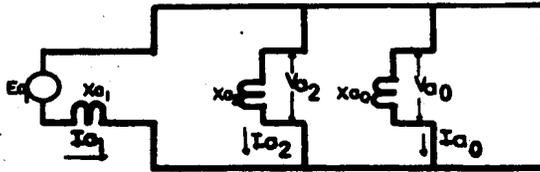


Figura 3.30 Conexión de las Redes de Secuencia para Falla de Dos Fases a Tierra

* Falla entre fases

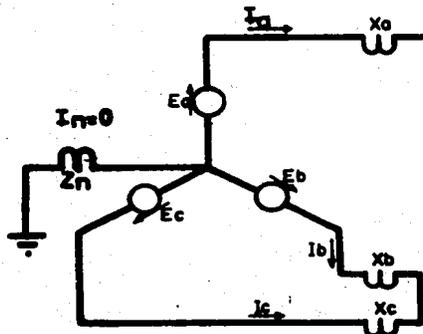


Figura 3.31 Falla Entre Fases

Condiciones de falla:

$$I_a = 0 \quad ; \quad I_b = -I_c \quad ; \quad I_{a_0} = 0$$

$$I_{a_1} = 1/3 (1 + a + a^2)(-I_c)$$

$$I_{a_2} = 1/3 (1 + a^2 + a) I_c$$

$$I_{a_2} = -I_{a_1}$$

Con una conexión desde el neutro al generador a tierra, X_{a_0} tiene un valor infinito por tanto $V_{a_0} = 0$

$$V_{a_1} = E_{a_1} - X_{a_1} I_{a_1}$$

$$V_{a_1} = X_{a_2} I_{a_2}$$

$$E_{a_1} - I_{a_1} X_{a_1} - I_{a_1} X_{a_2} = 0$$

$$I_{a_1} = \frac{E_{a_1}}{X_{a_1} + X_{a_2}}$$

3.64

Las redes se conectaron:

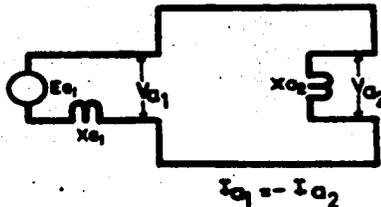


Figura 3.32 Conexión de las Redes de Secuencia para Falla entre dos Fases

3.2.6. Valores en Por Unidad.

El valor numérico en por unidad (P.U.) en una cantidad es el resultado de la relación de esta cantidad con la cantidad escogida como base.

Así, por ejemplo si se elige una base de 60 kV, entonces 57 kV y 66 kV serán 0.95 y 1.10 respectivamente, cuando se expresan en por unidad en la base ya mencionada.

Considerando que la información de parámetros de un sistema puede ser conocida en ohms, en por ciento o en por unidad, se reconoce la dificultad de aplicar factores $(V_1/V_2)^2$ cada vez que se presenta un transformador. Existe también la posibilidad de error al usar valores en por ciento, ya que el producto de dos cantidades debe dividirse por 100 y la división de dos cantidades debe multiplicarse por 100.

La eliminación de todas estas precauciones, para trabajar directamente con los valores, hace que el método en por unidad sea utilizado en cálculos de corto circuito, estudios de balance de potencia y estabilidad.

Por lo anteriormente mencionado, el método más conveniente a usar, es el de valores en por unidad, para el estudio de un sistema eléctrico se involucran potencias, tensiones, corrientes e impedancias que se deben referir a sus correspondientes bases de potencia, voltaje, corriente e impedancia.

De las cuatro cantidades mencionadas, basta escoger o fijar las bases para dos de ellas, con lo cual se conoceran todas, para tener completas las relaciones, mediante las ecuaciones básicas de electricidad.

Se elige la potencia base, con un valor que facilmente se recuerda y a la vez, simplifique las operaciones, con ventaja de que esta base permanece inalterable para cualquier parte considerada de la red eléctrica, independientemente de que se encuentren involucrados transformadores, los cuales modifican las otras tres bases.

Mediante el siguiente desarrollo, se puede concluir, que las relaciones mostradas son válidas, usando cantidades monofásicas o trifásicas.

Circuitos monofásicos

Se escoje kVA base y kV base

$$\text{corriente base } I = \frac{\text{kVA base}}{\text{kV base}} \quad 3.65$$

$$\text{impedancia base } Z = \frac{\text{kV base} \times 10^3}{I \text{ base}} \quad 3.66$$

$$Z \text{ base} = \frac{(\text{kV base})^2 \times 10^3}{\text{kVA base}}$$

$$Z \text{ base} = \frac{(\text{kV base})^2}{\text{MVA base}} \quad 3.67$$

Cuando se conoce la impedancia en ohms, se puede obtener el valor en por unidad, sin calcular antes la impedancia base, habrá que recordar que en cualquier parte de la red eléctrica en estudio, se conocen de inmediato y simple observación, la potencia base y el voltaje base, - así que conviene poder relacionar siempre estos valores en las operaciones que nos interesan.

$$\% \text{ en p.u.} = 100 \frac{Z \text{ ohms}}{Z \text{ Base}}$$

$$Z \text{ p.u.} = \frac{Z \text{ ohms}}{Z \text{ Base}} = Z \text{ ohms} \frac{\text{MVA base}}{(\text{kV base})^2}$$

Así también:

$$Z \text{ ohms} = Z \text{ p.u.} \frac{(\text{kV base})^2}{\text{MVA base}} \quad 3.68$$

Circuitos trifásicos

Se escoge kVA y kV base

$$\text{corriente base } I \text{ base} = \frac{\text{kVA base}}{\sqrt{3} \text{ kV base}} \quad 3.69$$

$$\text{impedancia base } Z \text{ base} = \frac{\frac{\text{kV base} \times 10^3}{\sqrt{3}}}{I \text{ base}} \quad 3.70$$

$$Z \text{ base} = \frac{\frac{\text{kV base} \times 10^3}{\sqrt{3}}}{\frac{\text{kVA base}}{\sqrt{3} \text{ kV base}}} = \frac{(\text{kV base})^2}{\text{kVA base}} \times 10^3 = \frac{(\text{kV base})^2}{\text{MVA base}}$$

nuevamente

$$Z \text{ p.u.} = \frac{Z \text{ ohms}}{Z \text{ base}} = Z \text{ ohms} \frac{\text{MVA base}}{(\text{kV base})^2}$$

Generalmente, las impedancias de las líneas de transmisión se calculan en ohms, mientras que las de equipo como generadores, motores y condensadores síncronos, son proporcionados por el fabricante en porcentaje o en por unidad, referidos a las bases de potencia y voltajes nominales del propio equipo, lo mismo pasa con los transformadores.

Es necesario que los parámetros a utilizar en un estudio queden referidos a las bases escogidas que les corresponden, por lo tanto, para conocer el nuevo valor en p.u. de un elemento del cual ya tenemos su anterior valor en p.u. referido a otras bases cualesquiera, bastará entender que la impedancia real (en ohms) es única para ese elemento.

$$Z_{\text{ohms}} = \frac{Z_{\text{pu}_v} (kV \text{ base}_v)^2}{MVA \text{ base}_v} \quad \begin{array}{l} v: \text{base anterior} \\ n: \text{base nueva} \end{array}$$

$$= \frac{Z_{\text{pu}_n} (kV \text{ base}_n)^2}{MVA \text{ base}_n}$$

Las dos ecuaciones anteriores, deben ser iguales por lo dicho anteriormente

$$Z_{\text{pu}_n} \frac{(kV \text{ base}_n)^2}{MVA \text{ base}_n} = Z_{\text{pu}_v} \frac{(kV \text{ base}_v)^2}{MVA \text{ base}_v}$$

$$Z_{\text{pu}_n} = Z_{\text{pu}_v} \frac{MVA \text{ base}_n}{MVA \text{ base}_v} \frac{(kV \text{ base}_v)^2}{(kV \text{ base}_n)^2} \quad 3.71$$

3.3 Características de los Cables de Energía.

3.3.1 Introducción.

Existen tres tipos de materiales, a usar, en lo que se refiere a con-

ducción de energía eléctrica y son:

Conductores
Semiconductores
Aislantes

Conductor: Es una sustancia que ofrece la mínima oposición o resistencia al flujo de corrientes eléctricas. Encontrándose aquí a los metales, los más usados en la construcción de conductores son el cobre y el aluminio, debido a sus características eléctricas y económicas.

Aislante: Es una sustancia que ofrece una resistencia extremadamente alta al flujo de corriente eléctrica. Por ejemplo, el polietileno que es un excelente aislante y se usa en recubrimiento de conductores.

Semiconductores: Estos son sustancias que tienen características entre conductores y aislantes y éstos son usados en la fabricación, de diodos, transistores, circuitos integrados y cables de energía.

3.3.2.- Descripción de un Cable de Energía Típico.

La función principal de un cable de energía aislado es la de transmitir energía eléctrica a una corriente y tensión preestablecidas, durante cierto tiempo. Es por ello que sus elementos constitutivos principales deben estar diseñados para soportar el efecto combinado producido por dichos parámetros.

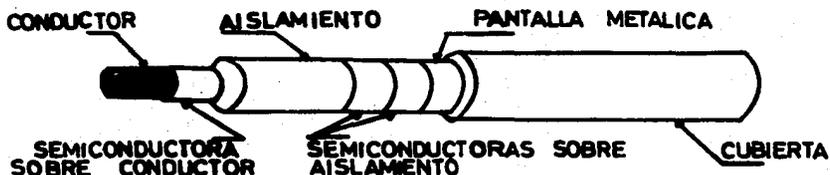
Elementos constitutivos de un cable:

- El conductor por el cual fluye la corriente eléctrica. El aislamiento que soporta la tensión aplicada. La cubierta que proporciona la protección mecánica, protección contra el ataque del tiempo y los agentes externos.

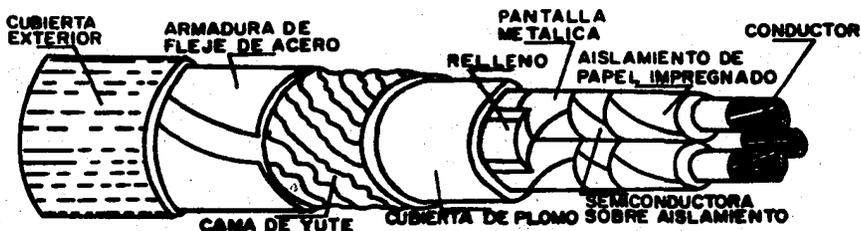
Un cuarto elemento fundamental en la operación correcta de un cable de energía aislado, lo constituyen las pantallas, cuya función principal es la de permitir una distribución de los esfuerzos eléctricos en

forma radial y simétrica.

Los elementos que conforman un cable de energía se muestran en la Figura 3.33.



a) Monofásico



b) Trifásico

Figura 3.33 Componentes de un Cable de Energía

Conductor.- Los materiales usados generalmente son el aluminio y el - cobre; sus propiedades físicas pueden verse en la tabla 3.7

El conductor puede ser de un solo hilo o de varios; cuando se emplean varios su formación podrá ser:

Cuerda redonda concéntrica normal: formada por hilos del mismo diámetro, dispuestos en coronas concéntricas, Figura 3.34 a .

Cuerda redonda compacta: Similar a la anterior, con la diferencia que se ha pasado por un dado reductor, forzando a que los hilos se deformen llenando los espacios vacíos, obteniéndose una reducción del diámetro total del 8% ver Figura 3.34 b.

Cuerda sectorial: Usada en cable trifásico con objeto de aprovechar al máximo el área del cable con la consiguiente reducción del diámetro total del mismo, ver Figura 3.34 c.

Cuerda anular: Se utiliza en cables superiores a los 1,000 MCM, ya -- que en ellos el efecto superficial o piel es considerable y resulta -- más económico que el redondo compacto, ver Figura 3.34 d.

Cuerda segmental: Se utiliza en cables de energía de calibres superiores a 12,500 MCM, con objeto de reducir las pérdidas por efecto piel. -- Los segmentos generalmente son 4 ó 6 y se aíslan en forma alternada, -- ver Figura 3.34 e.

El sentido de cableado puede ser derecho (Figura 3.34 f) o izquierdo, (Figura 3.34 g).

Tabla 3.7 Propiedades Físicas de Materiales Conductores.

Metal	Densidad	Temperatura de fusión	Coefficiente lineal de dilatación	Resistividad eléctrica a 20°C	Coefficiente térmico de resistencia eléctrica	Conductividad eléctrica
	g/cm ³	°C	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	ohm-mm ² /km	1.°C	% IACS*
Acero	7.90	1400	13	575-115	0.0016-0.0032	3-15
Aluminio	2.70	660	24	28.264	0.00403	61.0
Cobre duro	8.89	1083	17	17.922	0.00383	96.2
Cobre suave	8.89	1083	17	17.241	0.00393	100.0
Plomo	11.38	327	29	221.038	0.00410	7.8
Zinc	7.14	420	29	61.138	0.00400	28.2

* IACS = International Annealed Copper Standard.

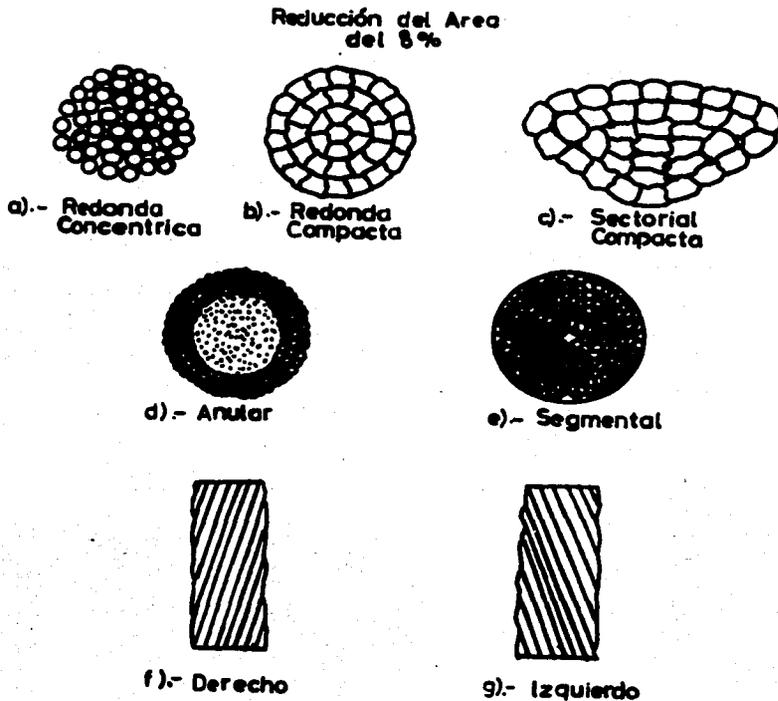


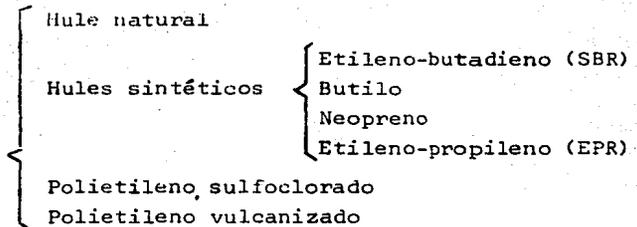
Figura 3.34 Tipos de Cuerdas y Sentido de Cableado.

La dimensión muy importante cumplir en un conductor de energía es la de su sección transversal, (calibre del conductor) ver Tabla 3.8.

Aislamiento.- La función del aislamiento es confinar la corriente -- eléctrica en el conductor y contener el campo eléctrico dentro de su masa.

Debido a diversidad de tipos de aislamiento que a la fecha existen -- para cables de energía, se deberán tener presentes las característi--

Termofijos



Pantallas Eléctricas.- Al aplicar una diferencia de potencial un conductor eléctrico y el plano de tierra o entre dos conductores, el dieléctrico intermedio se somete a esfuerzos eléctricos, los cuales pueden original efectos indeseables. A fin de reducir estos esfuerzos se incluyen en los cables pantallas eléctricas, las cuales confinan en forma adecuada el campo eléctrico generado por la aplicación de potencial.

Dependiendo del material empleado y su localización puede ser:

- Pantalla Semiconductora sobre el conductor.

Esta es utilizada en tensiones 2 kV y mayores, su principal función es evitar la concentración de esfuerzos eléctricos entre los pequeños espacios que existen entre los conductores, así como también eliminar la ionización del aire, que se encuentra en los pequeños espacios entre conductores y conductores aislante.

- Pantalla sobre el Aislamiento.

Esta es utilizada en tensiones de 5 kV o mayores y esta puede ser de dos tipos:

- Pantalla Semiconductora

- Pantalla Metálica.

Las funciones de la pantalla sobre el aislamiento son:

* Crear una distribución radial y simétrica de los esfuerzos eléctricos.

- * Proveer al cable de una capacitancia a tierra uniforme.
- * Reducir el peligro de descargas eléctricas al personal.

Cubiertas.- La función primordial de las cubiertas en sus diferentes combinaciones es la de proteger al cable de los agentes externos del medio ambiente que lo rodea, tanto en la operación como en la instalación.

Las cubiertas pueden ser principalmente de los siguientes materiales:

- a).- Metálicas
- b).- Termoplásticas
- c).- Elastomeras
- d).- Textiles.

Tabla 3.9 Características de los aislantes.

Características	PVC	Poliétileno baja densidad	Poliétileno alta densidad	Neopreno	Poliéstero clorosulfonado HYFALON	Plomo
Resistencia a la humedad	B	E	E	B	MB	E
Resistencia a la abrasión	B	B	E	MB	MB	M
Resistencia a golpes	B	B	MB	E	E	M
Flexibilidad	B	B	R	E	E	R
Doblez en frío	R	E	MB	B	R	—
Propiedades eléctricas	MB	E	E	R	B	—
Resistencia a la intemperie	MB	E+	E+	B	E+	MB
Resistencia a la flama	MR	M	M	B	B	B
Resistencia al calor	B	M	R	MB	E	MB
Resistencia a la radiación nuclear	R	B	R	B	MB	E
Resistencia a la oxidación	E	R	R	MB	E	B
Resistencia al ozono	E	E	E	B	E	E
Resistencia al efecto corona	E	B	B	R	B	E
Resistencia al corte por compresión	B	B	B	MB	B	M
Resistencia a ácidos:						
— Sulfúrico al 30%	E	E	E	R	R	E
— Sulfúrico al 5%	E	E	E	R	R	E
— Nítrico al 10%	R	E	E	R	R	M
— Clorhídrico al 10%	B	E	E	R	R	R
— Fosfórico al 10%	E	E	E	R	R	B
Resistencia a álcalis y sales:						
— Hidruro de sodio al 10%	E	E	E	M	R	B
— Carbonato de sodio al 2%	B	E	E	R	R	B
— Cloruro de sodio al 10%	E	E	E	B	B	B
Resistencia a agentes químicos orgánicos:						
— Acetona	M	B	B	B	B	E
— Tetracloruro de carbono	B	B	R	M	M	E
— Aceites	E	R	B	B	B	E
— Gasolina	B	B	B	B	B	E
— Creosoto	R	B	R	M	M	—
Límites de temperatura MIN. de operación (°C)	-55	-60	-60	-30	-30	
MAX.	+75	+75	-75	+90	+105	
Densidad relativa	1.4	0.9	1.0	1.3	1.2	11.3
Principales aplicaciones:	Uso general, cables para interiores y pesis. Cubiertas exteriores cubiertas.	Cables a la intemperie. Cubiertas sobre plomo.	Idem, pero cuando se requiere mayor resistencia a la abrasión.	Cables flexibles. Cables para minas.	Cables flexibles de alta calidad.	Cables con aislamiento de papel impregnado. Cables para refineries de petróleo y plantas petroquímicas.
E = Excelente	MB = Muy buena	B = Buena	R = Regular	M = Mala	+ Sólo en color negro, cubriendo negro de humo.	

3.3.3. Pérdidas de Energía.

Pérdidas en el Conductor.- Las pérdidas que causa calor generado en el conductor, se conocen como pérdidas por efecto Joule y están en -- función de la corriente que circula por el conductor de la resistencia efectiva que éste ofrece al paso de la corriente, en términos de potencia se puede escribir:

$$W_c = I^2 R_{CA} \times 10^{-3} \text{ kW/kM} \quad 3.72$$

donde :

I: Corriente en Amperes

R_{CA} : Resistencia a la corriente alterna Ohm/km

Con objeto de encontrar las pérdidas totales en un cierto período de tiempo (normalmente un año), se acostumbra a obtener las pérdidas - en unidades de energía (kilo Watts-hora) lo que implica que la ecuación 3.72 quede como:

$$W_c = W_c L N H F_p \text{ kW-h/año} \quad 3.73$$

donde:

W_c = Pérdidas evaluadas con la ecuación 3.72

L= Longitud del circuito en km

N= Número de cables del sistema

H= Horas efectivas de operación del sistema después de descontar -- mantenimiento, paros programados, etc.

F_p = Factor de pérdidas que se obtiene de la siguiente expresión:

$$F_p = 0.3 (F_c) + 0.7 (F_c)^2$$

Factor de Carga por unidad.

Pérdidas en el Dieléctrico.- Las pérdidas en el aislamiento de un ca

ble de energía dependerán fundamentalmente de las características -- del material, (tales como la permitividad del dieléctrico y el factor de potencia) estas características intervienen en el comportamiento y pérdidas de los cables. La expresión que permite calcular las pérdidas en el dieléctrico se muestra a continuación:

$$W_d = 2 \pi f C E_o^2 \tan \delta \times 10^{-3} \text{ kW/km} \quad 3.74$$

W_d: Pérdidas en el dieléctrico, en kW/km

f= Frecuencia, en Hz

E_o= Tensión al neutro, en Volts.

Tan δ = Factor de pérdidas del aislamiento a la frecuencia y temperatura de operación del cable (ver Tabla 3.10).

C = Capacitancia en farad/km y se obtiene mediante la expresión - 3.34

Tabla 3.10 Factor de Pérdidas del Aislamiento.

AISLAMIENTO	TANG (%)
Vulcanel EP	1.5
Vulcanel XLP	0.1
Sintenax	9.0
Papel impregnado	1.1

Para las pérdidas en un intervalo de tiempo se tiene la siguiente expresión:

$$W_D = W_d L N H \text{ kW-h/año} \quad 3.75$$

El factor no aparece, debido a que las pérdidas en el dieléctrico -- son constantes y no depende de las variaciones de la corriente.

Pérdidas en las Pantallas o Cubiertas Metálicas.- De manera similar-

al conductor, las pérdidas en la pantalla o cubierta se deben al efecto Joule y están dadas por:

$$W_p = I_p^2 R_p \times 10^{-3} \text{ kW/km}$$

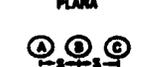
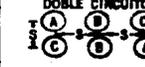
3.76

donde:

I_p : Corriente que circula por la pantalla (en Amperes) ver Tabla 3.11

R_p : Resistencia de la pantalla (en Ohms), ver Tabla 3.12

Tabla 3.11 Corriente en la Pantalla.

CONFIGURACION	I MONOFASICA 	II EQUILATERA 	III RECTANGULAR 	IV PLANA 	V DOBLE CIRCUITO 	VI DOBLE CIRCUITO 
PANTALLAS SOLIDAMENTE ATERRIZADAS						
$\frac{I_{01}^2}{I^2} = \frac{w_{01} \times 10^3}{I^2 R_p} = \frac{R_{01}}{R_p} =$ $\frac{I_{02}^2}{I^2} = \frac{w_{02} \times 10^3}{I^2 R_p} = \frac{R_{02}}{R_p} =$ $\frac{I_{03}^2}{I^2} = \frac{w_{03} \times 10^3}{I^2 R_p} = \frac{R_{03}}{R_p} =$ $\frac{w_{01} \times 10^3}{3 I^2 R_p} = \frac{R_{0\text{prom}}}{R_p}$	$\frac{X_m^2}{R_p^2 + X_m^2}$ $\frac{X_m^2}{R_p^2 + X_m^2}$ $\frac{X_m^2}{R_p^2 + X_m^2}$ $\frac{X_m^2}{R_p^2 + X_m^2}$	$\frac{X_m^2}{R_p^2 + X_m^2}$ $\frac{X_m^2}{R_p^2 + X_m^2}$ $\frac{X_m^2}{R_p^2 + X_m^2}$ $\frac{X_m^2}{R_p^2 + X_m^2}$	$\frac{(P^2 + 3Q^2) + 2\sqrt{3}(P - Q) + 4}{4(P^2 + 1)(Q^2 + 1)}$ $\frac{(P^2 + 3Q^2) - 2\sqrt{3}(P - Q) + 4}{4(P^2 + 1)(Q^2 + 1)}$ $\frac{P^2 + Q^2 + 2}{2(P^2 + 1)(Q^2 + 1)}$			
$P = \frac{R_p}{Y} \quad Q = \frac{R_p}{Z} \quad Z =$	X_m X_m	$\left(X_m + \frac{a}{2}\right)$ $\left(X_m - \frac{a}{6}\right)$	$\left(X_m + a\right)$ $\left(X_m - \frac{a}{3}\right)$	$\left(X_m + a + \frac{b}{2}\right)$ $\left(X_m + \frac{a}{3} - \frac{b}{6}\right)$	$\left(X_m + a + \frac{b}{2}\right)$ $\left(X_m + \frac{a}{3} - \frac{b}{6}\right)$	
$X_m = 2\pi f (2 \times 10^{-4} \ln \frac{S}{r_0}); \quad a = 2\pi f (2 \times 10^{-4} \ln 2); \quad b = 2\pi f (2 \times 10^{-4} \ln 5)$						
$\text{En ohms/km} \quad X_m = 0.0754 \ln \frac{S}{r_0}; \quad a = 0.0523; \quad b = 0.1214$						

Para calcular las pérdidas en unidades de energía:

$$W_p = W_p \times L \times H \times F_p \text{ kw-h/año}$$

3.77

3.3.4 Selección del Calibre Económico.

Las pérdidas analizadas en la sección anterior representan una parte

de los costos de operación de un sistema, por lo que se refiere a cables.

Para una carga determinada existe una sección o calibre que produce menos pérdidas y en consecuencia, menos costos de operación. Por otra parte el calibre mínimo representa los menores costos iniciales y las secciones mayores darán lugar a un incremento en tales costos.

Tabla 3.12 Resistencia de la Pantalla.

Pantalla de alambres	$R_p = \rho \frac{1.02}{0.7854 \times n \times d^2} \text{ ohm/km}$
Tubular de plomo	$R_p = \frac{\rho}{\pi \times d_m \times t} \text{ ohm/km}$
Pantalla de cintas de cobre tresapadas	$R_p = \frac{5.53 K}{d_m \times t} \text{ ohm/km}$

Material	Resistividad eléctrica a 20°C
	ohm-mm ² /km
Aluminio	28.264
Cobre nuevo	17.241
Plomo	221.038

donde: ρ = resistividad eléctrica del material del conductor en ohm-mm²/km
 d_m = diámetro medio de la pantalla o ferru metálico en mm
 d = diámetro de las alambres de la pantalla en mm
 t = espesor de la pantalla o ferru metálico en mm (aproximadamente 0.12 mm para cintas de cobre)
 n = número de alambres
 K = factor para incrementar la resistencia debido al contacto en el tresape ($K = 1$ para cables nuevos; $K = 2$ para cables que han estado en servicio).

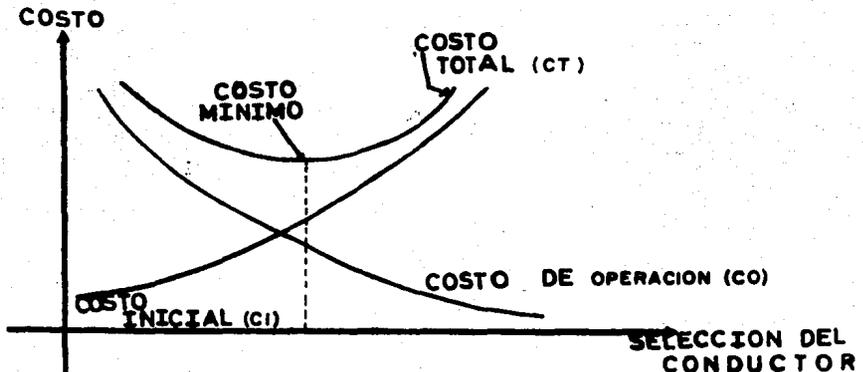


Figura 3.35 Costos de un Conductor

La curva de costos total (CT) Figura 3.35 se expresa como la suma del costo inicial (CI) más el costo de operación durante la vida útil del cable. Se presenta el mínimo de la curva (CT) cuando existe un cambio de decreciente a creciente, o bien; cuando los costos iniciales son iguales al costo de operación a valor presente.

El costo de operación se da en forma continua durante la vida útil del cable por lo que el análisis económico se debe realizar considerando que los egresos se realicen en tiempos diferentes. Uno de los métodos más utilizados es llevar el costo anual de operación (R), durante la vida útil, a valor presente (A); esto se logra empleando la siguiente expresión:

$$A_n = R \underbrace{\frac{1-(1+i)^{-n}}{i}}_A \quad 3.78$$

donde:

R= Pago total anual
 i= Interés por cada período
 n= Número de períodos
 A= Factor de interés de la anualidad.

El cálculo del costo total, combinación de costo inicial más el costo de operación, se obtiene de la expresión:

$$CT = CI + A \text{ (Exp) Pesos.} \quad 3.79$$

E= Pérdidas en el cable en kW-h/año
 P= Precio estimado de la energía eléctrica, \$/kW-h.

En el cálculo aproximado, se puede definir la sección económica haciendo las siguientes consideraciones:

A) La mayor parte de las pérdidas se producen en el conductor.

- B) Las pérdidas en la pantalla y dieléctrico sufren pequeñas variaciones al considerar distintos calibres.
- C) Las variaciones de precios para una tensión determinada están ligadas a la sección conductora y se pueden aproximar por una recta de pendiente G. (Figura 3.36) que cruza el eje de las ordenadas en un punto D que es variable, conforme a los precios del mercado.

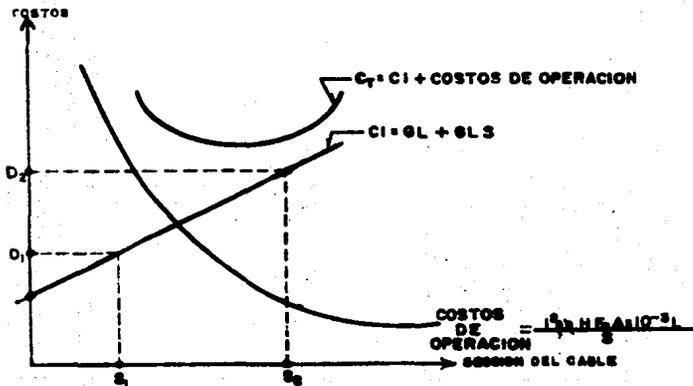


Figura 3.36 Costo aproximado para la Selección de un Conductor.

Se define el valor de G de la siguiente manera:

$$G = \frac{D_2 - D_1}{S_2 - S_1}$$

Siendo D_1 y D_2 precios de los calibres S_2 y S_1 respectivamente

Bajo estas consideraciones, la ecuación 3.79 queda de la siguiente -

manera:

$$CT = (G L + G S L) + \frac{(I^2 \rho_n \text{HPF}_p A \times 10^{-3} L)}{S}$$

Derivando con respecto a S se tiene:

$$0 = GL - \frac{I^2 \rho_n \text{HPF}_p A \times 10^{-3} L}{S^2}$$

Despejando S se tiene:

$$S_e = I \sqrt{\frac{\rho_n \text{HPF}_p A \times 10^{-3}}{G}} \quad 3.73$$

Ecuación que determina la sección del conductor más económica.

En donde:

S_e = Sección económica del conductor en mm^2

I = Corriente nominal en amperes

ρ = Resistividad del material del conductor a la temperatura de operación $\text{Ohm-mm}^2/\text{km}$.

n = Número de cables activos del sistema.

H = Número de horas de operación en un año.

F_p = Factor de pérdidas

P = Precios de la energía, $\$/\text{kW-h}$

A = Factor de interés

G = Pendiente de la recta precios vs área.

L = Longitud del circuito.

3.3.5 Capacidad de Conducción de Cables.

La capacidad de conducción de un cable aislado es función de diversos factores, tales como: La temperatura permisible de operación del cable, la resistencia térmica de los elementos que constituyen el aislamiento del cable, la resistencia del medio que rodea al cable y la temperatura del medio ambiente.

El diagrama de flujo de calor para el caso de un cable monopolar se muestra en la Figura 3.37

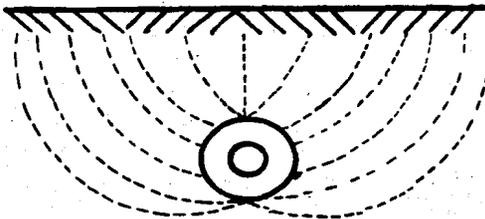


Figura 3.37 Flujo de Calor para Cable Monopolar.

En la Figura 3.38 se muestra el circuito térmico equivalente, en este caso el conductor de cable tiene una cierta temperatura y está conectada a un polo de la fuente de calor. La superficie de la tierra representa el otro polo, de tal forma que la diferencia de temperatura (análoga a la fuerza electromotriz de un circuito eléctrico) está dada por la diferencia entre temperatura del conductor y la del medio ambiente.

El calor fluye a través del aislamiento del cable " R_t " de la cinta semiconductor que abraza, al cable " R_p ", de la cubierta protectora " R_c " y de la resistencia térmica del suelo " R_s ".

El calor generado es igual al producto del cuadrado de la corriente que circula por el cable, por la resistencia óhmica por un cm de lon

gitud del conductor, a la temperatura de operación y por el número de cables considerado, lo cual se expresa como

$$C_g = I^2 R_{co} \quad 3.81$$

En donde:

C_g = Calor generado

I = Corriente que conduce el cable

R_{co} = Resistencia a la temperatura máxima de operación del conductor.

El calor disipado es igual al cociente de la diferencia de temperatura (θ) y la resistencia térmica total (R_T) o sea:

$$C_d = \frac{\theta}{R_T} \quad 3.82$$

Donde:

C_d = Calor disipado

θ = Diferencia de temperatura

R_T = Resistencia térmica total

Considerando que se alcanza un nivel de estabilidad cuando el calor disipado es igual al calor generado se tiene:

$$I^2 R_{co} = \frac{\theta}{R_T}$$

La corriente que puede conducir el cable es:

$$I = \left(\frac{\theta}{R_{co} R_T} \right)^{1/2} \quad 3.83$$

Sustituyendo el valor de θ , la ecuación 3.83 queda:

$$I = \left(\frac{T_c - T_a - T_d}{R_{co} R_T} \right)^{1/2} \quad 3.84$$

Donde:

I = Corriente del cable en amperes

Tc= Temperatura permisible de operación del cable, en °C.

Td= Elevación de temperatura debida a las pérdidas dieléctricas en --
°C

Ta= Temperatura ambiente en °C

Rco= Resistencia del conductor en ohms * cm

R_T = Resistencia térmica total del circuito que es igual a la suma --
de las resistencias térmicas del aislamiento, pantallas y cu --
bierta del cable y la resistencia térmica del suelo, o sea:

$$R_T = R_t + R_p + R_c + R_s$$

El valor de la resistencia térmica del aislamiento está contemplada --
en: la Figura 3.39.

Los valores asociados a diferentes resistividades térmicas se mues --
tran en la Tabla 3.13

Tabla 3.13 Resistividad Térmica de los Aislantes.

Aislamiento	P _t (°C-cm/w)
Papel	660
Polietileno	350
XLP	350
PVC*	500
EPR	600

* Valor promedio del PVC; ya que su P_t varía de acuerdo al compuesto.

El valor de la resistencia térmica del suelo es:

$$R_s = \frac{P_s}{2W} \ln \frac{4h}{D_a}$$

3.87

donde:

P_s: Resistividad térmica del suelo en °C- cm/W

h : Profundidad del cable en cm

D_a : Diámetro exterior del cable en cm

Para cables de baja tensión, la resistencia térmica de las pantallas R_p y de las cubiertas R_c son iguales a cero, también se desprecia el incremento de temperatura por pérdidas dieléctricas T_d ; debido a que representa un valor muy pequeño y el grado de error es mínimo. De -- tal manera que la ecuación 3.83 queda de la siguiente manera:

$$I = \left[\frac{T_c - T_a}{(R_t + R_s) R_{co}} \right]^{1/2} \quad 3.88$$

Cuando los circuitos que se emplean son trifásicos la resistencia -- térmica del suelo R_s se modifica de acuerdo a la separación entre -- los cables y su profundidad; obteniéndose R'_s de la siguiente manera:

$$R'_s = R_s + \sum_{j=1}^n B_{ij} \quad 3.89$$

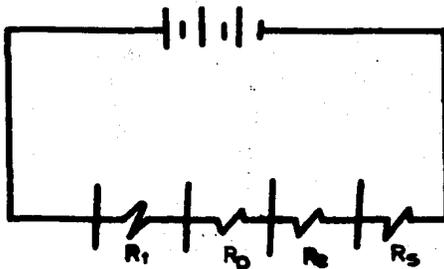
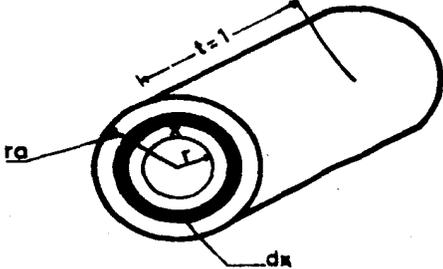


Figura 3.38 Circuito Térmico Equivalente.

Donde B_{ij} es función del número de cables, de su separación y de la -- profundidad a que estén enterrados; esta función se determina de la -- forma siguiente:

$$B_{ij} = \frac{f_s}{2\pi} L_n \left[1 + \left(\frac{2h}{X_{ij}} \right)^2 \right] \quad 3.90$$

SUPERFICIES CILINDRICAS



$$D_a = 2r_a$$

$$D = 2r$$

$$R_t = \rho \int_r^{r_a} \frac{dx}{2\pi x l}$$

$$R_t = \int_r^{r_a} \frac{dx}{\rho \frac{2\pi x l}{\rho}}$$

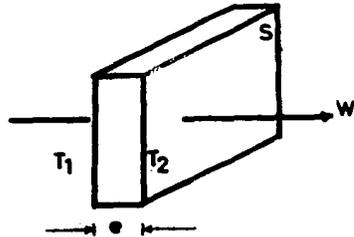
$$R_t = \frac{1}{2\pi l} \rho \ln \frac{r_a}{r}$$

$$R_t = \frac{2.3}{2\pi} \rho \log \frac{r_a}{r}$$

$$R_t = 0.336 \rho \log \frac{D_a}{D}$$

3.85

SUPERFICIES PLANAS



W = cantidad de calor (W/cm)
 R_t = resistencia termica (°C-cm/W)
 e = espesor (cm)
 ρ = resistividad termica (°C-cm/W)
 ΔT = diferencia de temperaturas (°C)

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

$$\Delta T = R_t \cdot W$$

donde

$$R_t = \rho \frac{e}{S}$$

3.86

Figura 3.39 Resistencia Térmica

En donde X_{ij} es la separación en cm entre el cable i y j; y h la profundidad en cm de los cables.

3.3.6 Instalación.

En redes subterráneas los conductores eléctricos se instalan en tres formas que son:

- Directamente Enterrados

- En ductos subterráneos
- En trincheras.



Figura 3.40 Instalación de Conductores.

Directamente Enterrados.- Los conductores se encuentran en contacto directo con el subsuelo y la tierra circundante le sirve para disipar el calor generado en el conductor.

Se recomienda tender el conductor directamente del carrete que lo contiene a la zanja donde se enterrará, cayendo por gravedad y sin ninguna tensión, sobre una cama de arena cernida de 10 cms. de espesor y cubriéndolo con otra capa de 10 cms. de espesor, el resto de la excavación se rellena con el material extraído procurando quitar las piedras y desechos de construcción. Figura 3.40 a.

En Ductos.- Los conductores se encuentran en contacto directo con el aire contenido en el ducto y éste es el que sirve para disipar el calor generado en los conductores y transmitirlo al material del ducto y éste a su vez al subsuelo, generalmente se instalan de uno a tres cables por ducto. Figura 3.40 b.

En la construcción de los ductos se recomienda que se eviten los filos en las terminaciones de los ductos, esto se logra emboquillando la entrada de los mismos, también se debe evitar la introducción de materiales o elementos extraños a la instalación como pudieran ser piedras o trozos de cemento en las uniones.

En Trincheras.- Las instalaciones en trincheras se hacen en dos formas:

- Tendiendo los conductores sobre el piso de la trinchera ver Figura 3.40 C.1, como puede observarse esto limita el uso de la trinchera a su parte inferior.
- En ménsulas sobre las paredes de las trincheras ver Figura 3.40 -- C.2 los conductores se encuentran en contacto con el aire y éste le sirve para disipar el calor generado por los conductores, los cuales se pueden instalar en grandes cantidades.

Zanjas y Pozos de Visita.- Las compañías suministradoras de energía normalizan las características y dimensiones de ductos, bancos de ductos y el contratista debe sujetarse a ellas al realizarles alguna instalación, en la Figura 3.41 se muestra un banco de ductos para circuitos trifásicos y monofásicos en alta tensión bajo banquetes, según normas para sistemas de distribución subterráneas de Compañía de Luz y Fuerza del Centro (C.L. y D.F.).

Las dimensiones de la zanja, dependen del número de cables que se alojarán así como las tensiones de operación. En la Figura 3.42 se muestran algunos ejemplos.

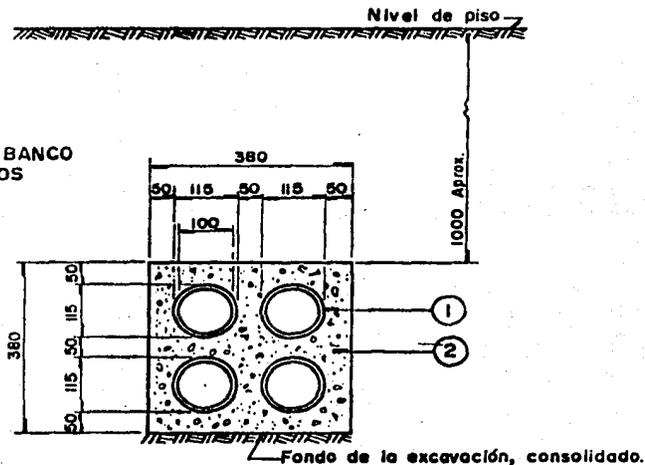
El sistema de bancos de ductos debe tener pozos de visita en los cambios de dirección y en los tramos rectos, cuando éstos sean mayores de 100 m. Estos también están normalizados por las compañías suministradoras.

Se recomienda que los pozos de visita cumplan con las siguientes características: (ver Figura 3.43).

DUCTO CRUCERO 4V

NORMAS LYF
MONTAJE
4.0113

SECCION DEL BANCO DE DUCTOS



Esc. 1:10

Acotaciones en mm

MATERIAL POR METRO LINEAL

Ref	NOMBRE	Norma LyF	Unidad	Cantidad
1	Ducto A100-1 (incluye Coples Ducto A100-1)	2.0251	m	4
2	Concreto 150 Kg/cm ² Aprox: Cemento Portland Arena C Grava 25	2.0304	Ton	0.0325
		2.0300	m ³	0.065
		2.0320	m ³	0.09

Figura 3.41 Normas de Montaje de Ductos.

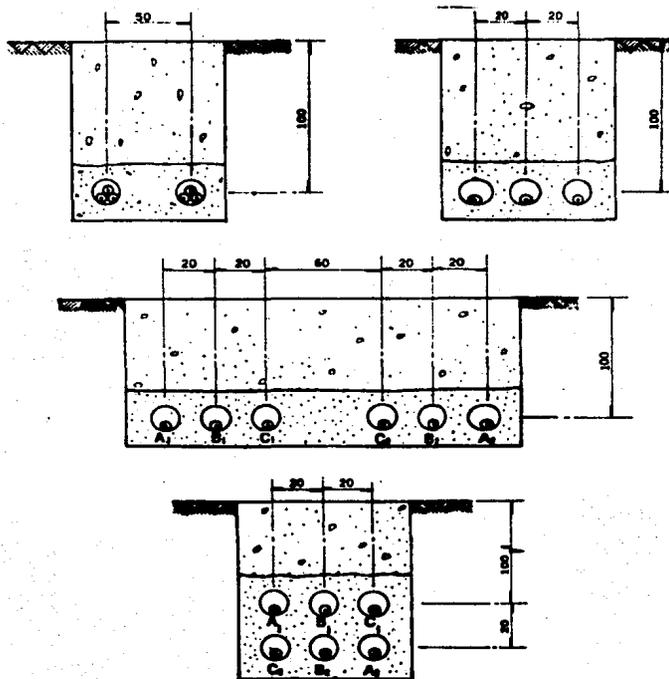


Figura 3.42 Diferentes Tipos de Zanjas.

- En general, no deberán adoptarse dimensiones que ocasionen en los cables radios de curvatura menores que los especificados por los fabricantes.
- Cuando el pozo de visita albergue empalmes, deberá tener espacio suficiente para éstos, además el espacio para maniobras.
- Las bocas de los ductos deben estar emboquilladas y pulidas.
- Tanto las tapas como los pozos mismos deben estar considerados con

suficiente resistencia para soportar, con amplio margen de seguridad de las cargas que se les impongan.

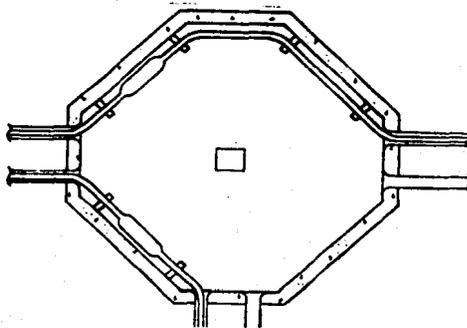


Figura 3.43 Pozo de visita.

3.4. Alternativas de Alimentación a las Líneas del S.T.C. Metro.

3.4.1 Introducción.

Originalmente el Sistema de Transporte Colectivo en su primera etapa comprendía una red de 60 km. (Líneas 1,2 y 3), las cuales son alimentadas desde una sola subestación conocida como Puesto Central de Control (PCC) y energizada en 85 kV. La entrega de energía en bloque a esta subestación es transformada a 15 kV., y enviada a través de alimentadores, propiedad del metro, a cada una de las unidades de rectificación distribuidas a lo largo de las trayectorias de las líneas.

Esta alimentación en un punto implica tener Líneas de distribución primaria muy largas, ya que desde este lugar localizado en el centro de la ciudad de México (calle de Delicias) salen alimentadores radiales en 15 kV., propiedad del Metro, hasta cada uno de los puestos de rectificación a lo largo de las trayectorias de las líneas, lo cual involucra distancias grandes, como por ejemplo, la distancia del PCC

a la estación Taxqueña es de 8 km, a la estación Tacuba 6.5 km., a la estación Zaragoza 5 km., etc., ésto se muestra en la Figura 3.44

La segunda etapa con una red de 45 km., contempla las ampliaciones a la Línea 3 en su parte norte y sur, así como las nuevas líneas 4 y 5. Esta segunda etapa se energizá con alimentadores exclusivos en 23 kV. La tercera etapa incluye ampliaciones a varias Líneas y la creación de otras, todo ésto energizado con alimentadores exclusivos de 23 kV.

3.4.2 Alternativas de Alimentación en 230 kV., a la Subestación General Puesto Central de Control (PCC).

La construcción de una nueva subestación en 230 kV., representaría una erogoción mayor en terrenos y derechos de vía, ya que la subestación existente alimentada en 85 kV., está saturada. La ubicación de esta nueva subestación representa problemas en su localización, para evitar tramos largos, así como probables restricciones de las rutas por dichos motivos. Debido a que se tienen en este caso alimentadores radiales a cada unidad de rectificación, al fallar éste en cualquier punto, las subestaciones laterales pueden absorber una sobrecarga del 50%, en un período no mayor de tres horas. Sin embargo, se ha estimado que el instalar una subestación de alta tensión y distribuir la energía a los diferentes puntos de utilización, equivale a -- instalar demasiados kilometros de cable de alta tensión. Por lo tanto para el suministro de energía debe tomarse en cuenta lo expuesto anteriormente así como considerar la mayor flexibilidad, confiabilidad y ahorro de materiales.

3.4.3 Alternativa de Suministro en 23 kV., a las Subestaciones Rectificadoras; Comunmente Llamadas Puestos de Rectificación (PR's).

En este caso la alimentación a las subestaciones rectificadoras se hace mediante un arreglo conocido como Primario Selectivo con transferencia automática a través de dos alimentadores subterráneos de 23 kV., de operación radial, (ver Figura 3.45), que parten de diferen--

tes subestaciones de potencia, como se muestra en la Figura 3.46

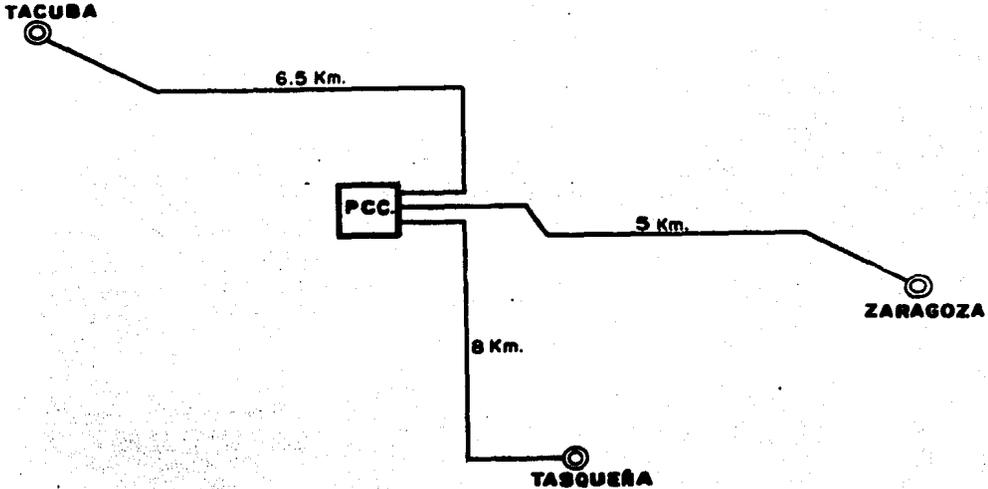


Figura 3.44 Alimentadores Radiales 15 kV., saliendo de la S.E. General del Metro a 3 Unidades de Rectificación.

En esta alternativa se tiene una diversificación de las fuentes de alimentación; obteniéndose una mayor confiabilidad. La selección de los puntos de alimentación, se hace tomando en cuenta la proximidad de los puestos de rectificación proyectados por el STC., así como -- otra características, de tal manera que la distancia entre una subestación de potencia de la compañía suministradora y un PR no exceda -- de 5km., lográndose con ello disminuir el número de fallas al reducir la longitud, así como una mayor continuidad en el servicio. Este arreglo permite una mayor flexibilidad en la expansión o construc --

ción futura de Líneas debido a la cantidad de subestaciones de potencia y/o puntos posibles de suministro que posee la compañía suministradora (C.L. y F.C.) en toda el área metropolitana del D.F. y zonas circunvecinas.

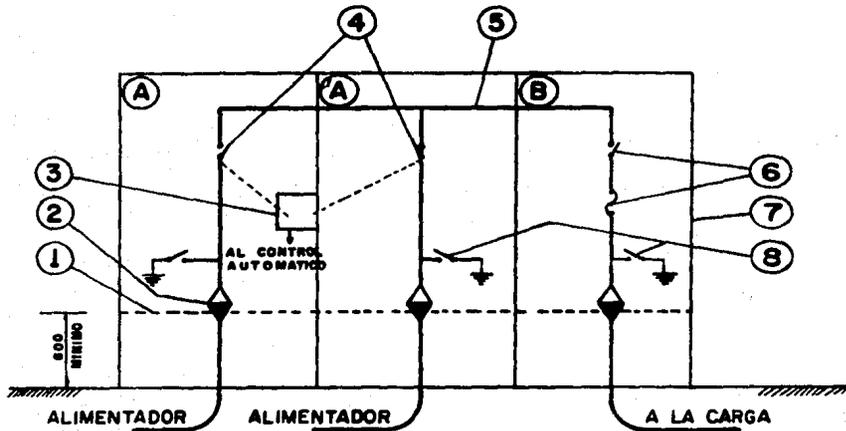


DIAGRAMA UNIFILAR ACOTACIONES EN MM.

REFERENCIAS.

- 1^o Soporte terminales monofásicos 23KV.
- 2^o Terminales monofásicos 23KV. (suministrados por CL y F).
- 3^o Mecanismo de operación.
- 4^o Interruptores en aire.
- 5^o Bus 23.KV
- 6^o Fusibles de potencia o fusibles limitadores con interruptor asociado.
- 7^o Gabinete.
- 8^o Cuchillas de puesta a tierra.
- A^o Compartimiento interruptores en aire.
- B^o Compartimiento portafusibles.

Figura 3.45 Interruptor en Aire 23 TACI.

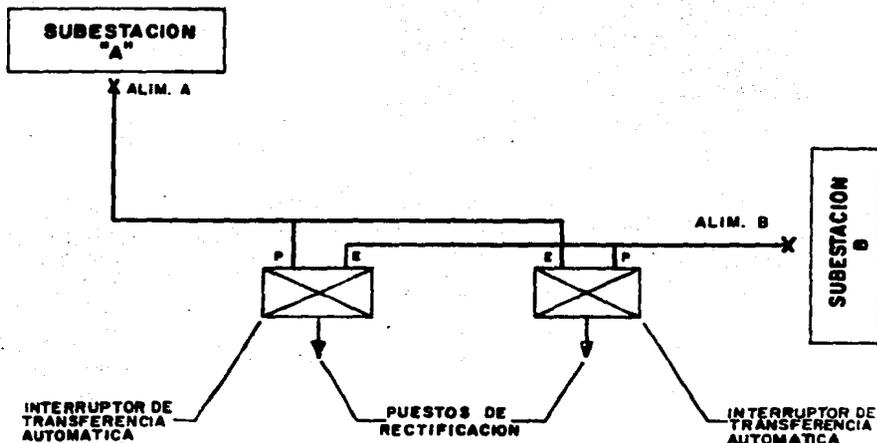


Figura 3.46 Diagrama Unifilar de Alimentación a los PR's.

3.4.4 Propiedades Comparativas de Métodos de Alimentación.

CONCEPTO	Radial	Anillo	Red
1) Tensión uniforme en las cargas	Si	No	Algo
2) Seguridad contra interrupciones de Línea.	No	Si	Si
3) Las variaciones de una carga afectan la tensión de otras.	No	muy poco	muy poco
4) Es posible reducir la carga total en la central generadora.	Si	No	No
5) Es posible comprobar el consumo desde la planta generadora.	Si	No	No
6) Es posible aumentar receptoras sin alterar tensión.	Si	Algo	Si
7) Clase de protección contra fallas de aislamiento.	Simple	Complicado	Muy complicado

- | | | | |
|---|--------|---------|--------|
| 8) Es posible regular la tensión en todas las cargas. | Si | Algo | No |
| 9) Volúmen de materia empleado | Mayor | Mediano | Máximo |
| 10) Intensidad de fallas | Mínima | Grande | Máxima |

Como puede observarse, el sistema radial sobresale en la mayoría de las consideraciones a excepción de una; que es la seguridad contra interrupciones de línea. Para evitar este inconveniente se pueden duplicar los circuitos para cada carga, la substitución de un circuito por otro puede ser automática.

La solución es muy costosa, pero es posible proyectar cada uno de los circuitos para la mitad de la carga total, con la mitad del volúmen de material que sería necesario para un solo alimentador, pero, con la capacidad térmica suficiente para conducir en emergencia toda la carga.

3.4.5 Confiabilidad de Alimentadores Aéreos y Subterráneos.

La tabla 3.14 muestra la cantidad de disturbios y horas de interrupción de los alimentadores de 23 kV., dentro de la zona metropolitana

Tabla 3.14 Comportamiento del Sistema de Distribución.

ZONA METROPOLITANA	ALIMENTADORES EN OPERACION	Kms. TOTALES	DISTURBIOS EN EL ALIMENTADOR		DESCONEXION DEL ALIMENTADOR				SUMAS		LICENCIA MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
					POR CAUSA DE FRECUENCIA		POR CAUSA DE FUERZA					
			CANT.	HORAS	CANT.	HORAS	CANT.	HORAS	CANT.	HORAS	CANT.	HORAS
AEREO 23 KV.	201	8843.21	2907	3322	794	295	301	112	3682	3720	2504	1849
SUBTERRANEO 23 KV.	30	777.39	44	88	-	-	44	4	88	88	88	34

De esta Tabla se obtiene la información de disturbios y mantenimiento por alimentador. Como puede observarse en la Tabla 3.15 aunque el alimentador subterráneo es 1.31 veces más largo que el aéreo, éste último se desconecta 4.43 veces más que el subterráneo durante 6.77 veces más de tiempo, a pesar de que al aéreo se le da mantenimiento preventivo 4.05 veces más de tiempo.

Tabla 3.15 Número y Tiempo de Interrupción en Alimentadores Aéreo y Subterráneo.

TIPO DE ALIMENTADOR	Nº. PROMEDIO POR ALIMENTADOR	DISTURBIOS TOTALES POR ALIMENTADOR		LICENCIA MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR ALIMENTADOR	
		CANT.	HORAS	CANT.	HORAS
AÉREO 22 KV.	10.72	12.00	12.00	0.01	0.00
SUBTERRÁNEO 22 KV.	25.91	2.00	1.00	0.2	3.10

En conclusión la mayor confiabilidad la tienen los alimentadores subterráneos, de 22 kV. Se analizó una muestra de 4 alimentadores subterráneos, exclusivos con doble alimentación, uno preferente y otro emergente, conectados a un interruptor de transferencia de tal forma que al fallar el alimentador preferente automáticamente se conecta el alimentador emergente. En estos casos no hubo pérdida del servicio, ya que éste, se transfirió en forma instantánea al alimentador emergente, por lo tanto se considera que la confiabilidad de estos alimentadores es de aproximadamente el 100%. Ver Tabla 3.16.

3.5 Estudio de Confiabilidad

3.5.1 Introducción.

En la fabricación de un producto el empresario busca siempre la relación óptima entre la calidad de un producto y el precio de venta, debido principalmente a la competencia en el mercado.

Esto causa acciones recíprocas permanentes entre los fabricantes y los consumidores encontrándose siempre, un balance o una relación óptima entre la calidad del producto y el uso que se le va a dar a éste.

Una compañía suministradora de energía eléctrica no puede estar sometida a la competencia, debido principalmente a que goza de un monopolio, que impide su desarrollo en el mercado libre del producto, en -

Tabla 3.16 Red de Fallas en Alimentadores Subterráneos de 23 kV Exclusivos para Servicios Importantes.

Servicios con cables Sub. 23 kV.	S.E.'s de potencia Provenientes.	- Numero de fallas anuales. - Nombre del alimentador.					Operación Emergencia.	No. de fallas totales y tiempo de regreso a preferente (en 5 años).	- Tipo de falla. - Tiempo de reparación.
		1973	1974	1975	1976	1977			
Laminadora Atzacotzotzo	Prof. Peters Emerg. Insurg.	1 Pat-26 *	Fallas del Cliente (2) en su equipo.	0	0	2 Pat-26 *	Instantáneo.	3 Nov/73 - 8 Hrs. May/77 - 8 Hrs. Nov/77 - 2 1/2 Hrs.	- Rehacer terminal en caja CS23-3-500-8 Hrs. - Rehacer terminal en caja CS23-3-500-8 Hrs. - Boquilla entrada a equipo de medición - 2 1/2 Hrs.
Torre de Telecomunicaciones.	Prof. Jamaica Emerg. San Andrés.	0	1 Comunic. *	0	0	1 Comunic. *	Instantáneo.	2 Jul/74 - 48 Hrs. Jan/77 - 26 Hrs.	- Falta en cable, se reemplazó 180m. cable a 35 23KV. y 2 empalmes - 48 Hrs. - Falta ocasionada por constructora particular, quemando fusible e int. CSF - 26 Hrs.
Edifera "El Universal"	Prof. P. Méx. (74) Emerg. P. Méx. (71)	No se tienen datos.	0	0	0	4 Red 74 *	Instantáneo.	4 Jul/77-10Hrs. Ago/77-10Hrs. Sep/77-10Hrs. Nov/77-10Hrs.	- Todas las 4 fallas en uniones universales 40-Hrs.
Palmolive	Prof. Morales (74) Emerg.- Morales (Ind. Militares)	3 Pat.-23 *	Fallas del Cliente (2) en su equipo	0	1 Pat.-23 *	1 Pat.-23 *	Instantáneo.	5 May/73-18 Hrs. Ago/73-4 Hrs. Sep/73-3 1/2Hrs. Abr/76-7 1/2Hrs.	- Falta en mufa de entrada al Serv- 18 1/2 Hrs. - Falta en mufa de entrada al serv. 4 Hrs. - Falta en reactor 3 1/2 Hrs. - Falta en equipo de medición 7 1/2 Hrs. - Fusible equipo medición quemado 3 Hrs.

* En todos estos casos, no hubo pérdida del servicio. Se transfirió en forma instantánea al alimentador emergente.

este caso la energía eléctrica.

Por lo tanto, las compañías suministradoras deben buscar otros medios de ajuste que permitan encontrar una relación lo más cercana a la óptima entre el producto que se está ofreciendo y la calidad de éste.

En esta forma las compañías suministradoras aplican el concepto de "calidad de servicio". que conlleva al concepto de confiabilidad involucrando además, en este concepto, el costo o el factor económico ligado a la calidad de servicio que la empresa debe ofrecer.

Este valor óptimo, que en este trabajo, al emplear un modelo de los tantos existentes se le ha llamado factor de conveniencia (Fcon) no es muy sencillo de encontrar especialmente dentro de un mercado cautivo. Aunque naturalmente este factor de conveniencia es necesario aplicarlo a todo el sistema de distribución, tiene mucho más impacto en los casos que por su naturaleza requieren de una mayor continuidad en el servicio eléctrico, como lo son las cargas comerciales e industriales.

Cada medida adoptada para aumentar la confiabilidad del sistema origina mayores costos, por lo que es importante determinar, qué tanto se está dispuesto a invertir para obtener un índice de confiabilidad determinado.

Se presenta un método cuantitativo que permita comparar las diferentes estructuras de alimentación en sistemas de distribución subterránea, utilizando un "Factor de conveniencia", que involucra tanto la "confiabilidad" como el costo de las diferentes alternativas de suministro de energía eléctrica, empleadas en la actualidad.

3.5.2 Factores que Intervienen en la Selección de una Estructura de Alimentación.

La compañía suministradora conciente de estos conceptos ha realizado un esfuerzo continuo para expandir su sistema de distribución subterráneo, logrando con ello aumentar, en forma considerable, la confiabilidad del suministro de energía eléctrica.

En la Figura 3.47 se muestra, tanto la zona existente de redes urbanas subterráneas, como su futura expansión.

Existen diferentes estructuras de alimentación (ver Figura 3.2), normalizadas por la compañía suministradora, que son factibles de proyectar para la alimentación a grandes cargas comerciales, dentro de los factores que en forma general, se toman en cuenta son:

- Zona geográfica.- Lugar geográfico en donde se presenta la carga.
- Carga Eléctrica.- MVA de carga instalada y tipo de carga (de alumbrado, de fuerza, etc.).
- Tensión preferente.- Alimentación en baja o mediana tensión.
- Niveles de corto circuito y regulación.
- Confiabilidad .- Niveles de confiabilidad mínima requeridos, tipos de carga; sensible, semi-sensible o normal.
- Arquitectura del edificio o centro comercial.
Area construída, niveles, concentraciones de carga, etc.
- Medición .- Requisitos mínimos, tarifas aplicables, etc.
- Factores .- Cálculo de los factores de carga, demanda y diversidad probables de la carga.
- Costos .- Costos de la instalación de los servicios y la contribución eventual del cliente.

Después de los estudios y análisis formulados por la compañía suministradora se determina si será o no necesario, la modificación de la estructura de mediana tensión del sistema de distribución, aunado a ésto y de acuerdo con todas las consideraciones anotadas se decidirá que estructura es la más adecuada para la alimentación de la carga. Cualquiera de estas estructuras cumple fundamentalmente con los requisitos de energía eléctrica para, centros comerciales, parques industriales, complejos turísticos o de oficinas y centros hospitalarios, adecuadas cada una de ellas a los límites de confiabilidad que

se requiere.

La configuración o estructura del circuito en sistemas subterráneos tiene una gran influencia en la confiabilidad considerando que ésta pueda ser expresada en términos del número promedio de interrupciones y la duración promedio total, el mayor impacto de la configuración del circuito está en el índice de duración de las interrupciones a los usuarios. La importancia entonces, en el diseño del sistema subterráneo, radica en implementar redundancias óptimas en los circuitos, que proporcionen las facilidades para aislar los componentes fallados del sistema y la rapidez en el restablecimiento del servicio a todos los usuarios.

3.5.3 Análisis de la Confiabilidad.

Existen cinco estructuras básicas normalizadas en sistemas primarios de distribución subterránea, (ver subcapítulo 3.1.2), las cuales son:

- Radial
- Anillo
- Selectivo primario
- Selectivo secundario
- Mancha de red.

Hay muchas variaciones en el diseño de los circuitos; pero generalmente se encuentran compuestos de uno o más elementos que componen estas estructuras básicas.

El sistema radial sobresale con varios de los requisitos necesarios para tener una cierta confiabilidad, después de analizar varios arreglos, el esquema que ofrece una mejor confiabilidad es el selectivo primario.

Este tipo de suministro ha sido el método tradicional para incremen-

tar la confiabilidad en el suministro de energía a cargas importantes ya sea en sistemas de distribución aéreo o subterránea. Consiste de dos alimentadores primarios que alimentan la carga a través de un interruptor de transferencia que puede ser de operación manual o automática, de manera que éste mantiene un alimentador normalmente conectado (Preferente) y otro normalmente abierto (Emergente). Este arreglo permite reducir la interrupción al cliente a un tiempo mínimo, que es lo que tarda el equipo en transferir la carga del alimentador preferente al emergente (ver Figura 3.48).

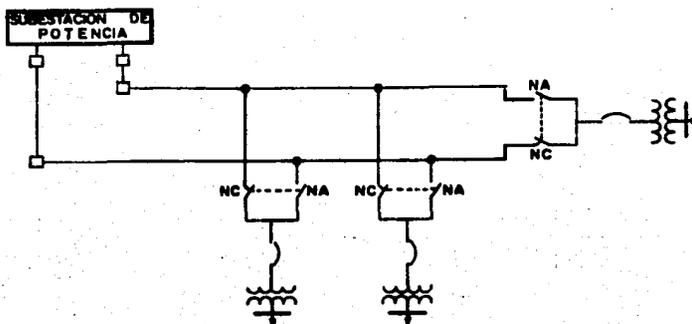


Figura 3.48 Estructura de Alimentación en Selectivo Primario.

La confiabilidad está íntimamente ligada con la calidad del servicio en términos de la presencia o ausencia de energía en la acometida -- del usuario, luego entonces, la confiabilidad se puede expresar en -- varias formas y desde diferentes puntos de vista. Desde el punto de -- vista del usuario, el índice de duración d , y el índice de frecuen -- cia de interrupción f son de gran importancia y se definen como:

- Índice de duración de interrupciones \bar{d}
- $\bar{d} = \frac{\text{Suma de duraciones de interrupción a todos los usuarios en un año}}{\text{número de usuarios atendidos}}$ 3.91
- = Tiempo de interrupciones por usuario por año
- Índice de frecuencia de interrupciones \bar{f}
- $\bar{f} = \frac{\text{Suma de interrupciones a todos los usuarios por año}}{\text{número de usuarios atendidos}}$ 3.92
- = Interrupciones por usuario por año.

Estos índices pueden ser obtenidos en valores promedio a partir de las tasas de falla de los componentes y de los tiempos de restablecimiento del servicio (tiempo de operación), en cuyo caso las expresiones de estos índices son los siguientes:

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n C_i t_i = \sum_{i=1}^n X_i \lambda_i \left[\sum_{j=1}^m C_{ij} t_{ij} \right] \quad 3.93$$

$$\bar{f} = \sum_{i=1}^n C_i X_i \lambda_i \quad 3.94$$

donde:

- n - Número de interrupciones en un año
- t_i - Duración de cada interrupción.
- C_i - Número de interrupciones por usuario.
- N - Número de consumidores atendidos
- X_i - Tasa de falla de la componente
- λ_i - Kilómetros de alimentador o número de componentes.
- C_{ij} - Consumidores en por unidad (pu) afectados durante la operación -- paso por -- paso de los trabajos de restablecimiento o secionamiento de la falla.

j - Índice de las funciones de restablecimiento o seccionamiento de la falla.

tij- Tiempo requerido durante la operación paso por paso de los trabajos de restablecimiento o seccionamiento de la falla.

Un criterio basado en la confiabilidad esperada del servicio y el costo de la instalación permite evaluar las diferentes estructuras de alimentación en distribución subterránea, con este propósito se define el empleo de un factor de conveniencia (Fcon), con el cual es posible establecer la comparación entre diferentes alternativas posibles de emplear para la alimentación de cargas importantes. Este índice se define como la inversa del producto del costo de la estructura por -- consumidor C y del índice de duración promedio de interrupción \bar{d} , la expresión matemática es:

$$Fcon = \frac{1}{C \bar{d}}$$

7.95

Este índice es una medida del mérito del diseño de la estructura en -- términos de costo y confiabilidad, de tal manera que mientras mayor -- sea este número, más conveniente resultará la estructura de diseño.

Uno de los parámetros que intervienen es la carga instalada y por lo tanto el costo, el cual variará en cada caso a analizar; ésto muestra la bondad del método desarrollado. con el propósito de ilustrar la aplicación del método descrito, se obtiene el desarrollo analítico para tres estructuras que alimentan un sistema de subestaciones de alumbrado y fuerza de una línea de metro.

En las tablas 3.17 y 3.18 se indican las tasas de falla y funciones -- de operación de los elementos que intervienen en la red subterránea. El costo de cada una de las estructuras es estimativo y en la tabla -- 3.19 aparecen los costos más significativos, es decir costos de material, costo de transporte y costo de labor. Aparecen también la capacidad instalada en toda la línea así como el costo por kVA instalado.

-Estructura Radial. En la Figura 3.49 se muestran las fallas consideradas en la estructura radial que a continuación se describen.

Falla No.	Elemento No.	Elemento fallado
F1	1	Cable troncal.
F2	7	Interruptor de operación manual sumergible.
F3	2	Cable subtroncal.
F4	6	Acometida interruptor en aire y cable.
F5	8	Interruptor de operación manual sumergible con limitador.

Falla 1 (Cable troncal).

$$d_1 = n_1 X_1 \lambda_1 \sum_{j=1}^n C_{ij} T_{ij} \quad \text{Si } n_1 = 3$$

$X_1 = 2.3 + 1.7 + 0.70 = 4.70 \text{ Km.}$
 $\lambda_1 = 0.043 / \text{km circuito/año}$

Tabla 3.17 Tasas de Falla para los Componentes de los Sistemas de Distribución Subterránea.

No.	DESCRIPCION	TASA DE FALLA λ
1	CABLE TRONCAL	0.043/KM. CIRCUITO/AÑO
2	CABLE SUBTRONCAL	0.03/KM. CIRCUITO/AÑO
3	INTERRUPTOR EN AIRE DE OPERACION MANUAL (GABINETE).	0.005/UNIDAD/AÑO.
4	CAJAS DE DERIVACION.	0.001/ UNIDAD/AÑO
5	INTERRUPTOR DE TRANSFERENCIA AUTOMATICA.	0.008/UNIDAD/ AÑO.
6	ACOMETIDAS (INTERRUPTOR EN AIRE Y CABLE).	0.03 /UNIDAD/AÑO
7	INTERRUPTOR DE OPERACION MANUAL SUMERGIBLE.	0.006/UNIDAD /AÑO
8	INTERRUPTOR DE OPERACION MANUAL SUMERGIBLE C/LIMITADORES	0.007/UNIDAD/AÑO.

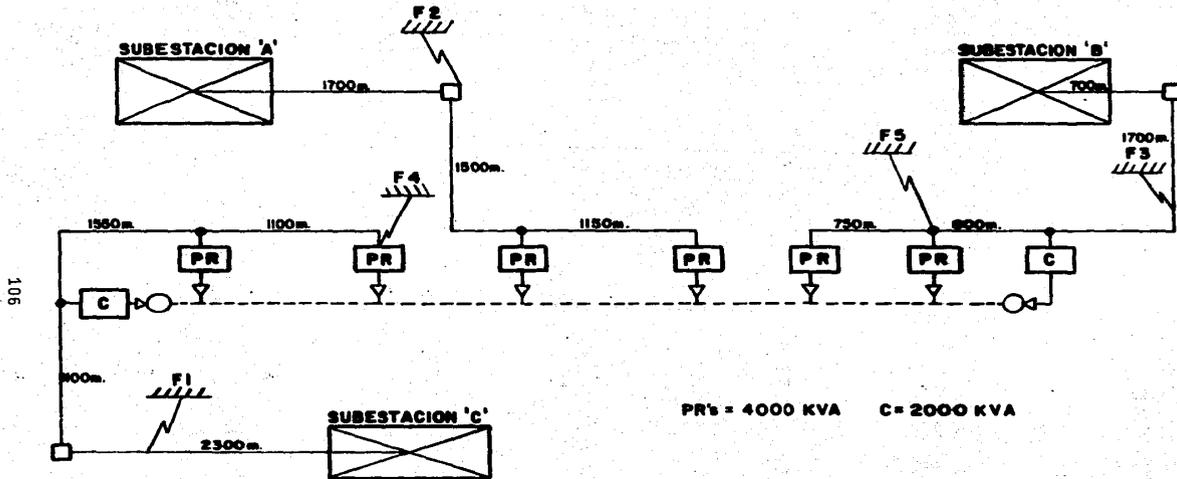


Figura 3.49 Red de Alimentadores Radiales para una Línea de Metro Mostrado sus puntos de Falla.

Tabla 3.18 Funciones de Operación y Tiempos promedio para poner en Servicio algún Elemento Fallado.

No. DE FUNCION	OPERACION	HORAS
1	RECEPCION DE LA QUEJA Y DESPLAZAMIENTO AL LUGAR.	1.25
2	OPERACION DE INTERRUPTOR MANUAL SUMERGIBLE.	0.30
3	LOCALIZACION PUNTUAL DE LA FALLA Y CAUSA (EN CABLE)	8.00
4	REPARACION DE LA FALLA (EN CABLE).	2.00
5	RESTAURACION O INTERRUPCION DEL SERVICIO DEL ALIMENTADOR TRONCAL O RAMAL.	0.08
6	IDENTIFICACION DEL EQUIPO FALLADO O REEMPLAZO DE FUSIBLES.	0.40
7	REEMPLAZO DE INTERRUPTOR (MANUAL SUMERGIBLE, AIRE ,TACI).	8.00
8	REEMPLAZO DE ACOMETIDA.	6.00

$C_{11} = 0.357$ pu. $t_{11} = 1.25$ hrs. (Recepción de la queja y desplazamiento al lugar).

$C_{12} = 0.357$ pu. $t_{12} = 0.08$ hrs. (Interrupción del servicio del alimentador).

$C_{13} = 0.357$ pu. $t_{13} = 0.30$ hrs. (Apertura de interruptor manual sumergible).

$C_{14} = 0.357$ pu. $t_{14} = 8.0$ hrs. (Localización puntual de la falla y causa).

$C_{15} = 0.357$ pu. $t_{15} = 2.0$ hrs. (Reparación de la falla).

$C_{16} = 0.357$ pu. $t_{16} = 0.30$ hrs. (Cierre de interruptor manual sumergible).

$C_{17} = 0.357$ pu. $t_{17} = 0.08$ hrs. (Restauración del servicio).

Sustituyendo valores:

$$d_1 = 3 \times 4.7 \times 0.043 \left[0.357 \times (1.25 + 0.08 + 0.3 + 8 + 2.0 + 0.3 + 0.08) \right]$$

$$= 2.599$$

$$f_1 = n_1 C_1 X_1 \lambda_1 = 3 \times 0.357 \times 4.7 \times 0.043 = 0.216$$

Falla 2 (Interruptor de operación manual sumergible).

$$d_2 = n_2 \times \lambda_2 \sum_{j=1}^m C_{2j} T_{2j}$$

Si $n_2 = 3$; $\lambda_2 = 0.006$ /unidad/año

- $C_{21} = 0.285$ pu. $t_{21} = 1.25$ hrs. (Recepción de la queja y desplazamiento al lugar).
 $C_{22} = 0.285$ pu. $t_{22} = 0.08$ hrs. (Interrupción del servicio del alimentador sub.A).
 $C_{23} = 0.285$ pu. $t_{23} = 0.40$ hrs. (Identificación del equipo fallado).
 $C_{24} = 0.285$ pu. $t_{24} = 8.00$ hrs. (Reemplazo de interruptor manual sumergible).
 $C_{25} = 0.285$ pu. $t_{25} = 0.08$ hrs. (Restauración del servicio del alimentador sub.A).

Sustituyendo valores:

$$\begin{aligned}
 d_2 &= 3 \times 1 \times 0.006 [0.285 (1.25 + 0.08 + 0.4 + 8.0 + 0.08)] \\
 &= 0.0503 \\
 f_2 &= n_2 C_2 \times \lambda_2 = 3 \times 0.285 \times 1 \times 0.006 \\
 &= 0.005
 \end{aligned}$$

Falla 3 (Cable subtruncal)

$$d_3 = n_3 \times \lambda_3 \sum_{j=1}^m C_{3j} T_{3j}$$

Si $n_3 = 8$; $\lambda_3 = 1.1 + 1.55 + 1.1 + 1.5 + 1.15 + 0.75 + 0.8 + 1.7 = 9.65$ km.
 $\lambda_3 = 0.03$ /Km-circ/año.

- $C_{31} = 0.357$ pu. $t_{31} = 1.25$ hrs. (Recepción de la queja y desplazamiento al lugar).
 $C_{32} = 0.357$ pu. $t_{32} = 0.08$ hrs. (Interrupción del servicio del alimentador sub.B).
 $C_{33} = 0.357$ pu. $t_{33} = 8.0$ hrs. (Localización puntual de la falla).

$$C_{34} = 0.357 \text{ pu. } t_{34} = 2.0 \text{ hrs. (Reparación de la falla)}$$

$$C_{35} = 0.357 \text{ pu. } t_{35} = 0.08 \text{ hrs. (Resturación del servicio).}$$

Sustituyendo valores:

$$d3 = 8 \times 9.65 \times 0.03 [0.357 (1.25 + 0.08 + 8 + 2 + 0.08)]$$

$$= 9.433$$

$$f3 = n3 C3 X3 \lambda3 = 8 \times 0.357 \times 9.65 \times 0.03$$

$$= 0.826$$

Falla 4 (Acometida interruptor en aire y cable).

$$d4 = n4 X4 \lambda4 \sum_{j=1}^m C4j T4j$$

Si $n4=8$; $X4=1$ $\lambda4=0.03$ /unidades/año

$C_{41} = 0.142 \text{ pu. } t_{41} = 1.25 \text{ hrs. (Recepción de la queja y desplazamiento al lugar).}$

$C_{42} = 0.357 \text{ pu. } t_{42} = 0.08 \text{ hrs. (Interrupción del servicio).}$

$C_{43} = 0.357 \text{ pu. } t_{43} = 0.30 \text{ hrs. (Operación de interruptor manual sumergible).}$

$C_{44} = 0.357 \text{ pu. } t_{44} = 0.08 \text{ hrs. (Restauración del servicio).}$

$C_{45} = 0.142 \text{ pu. } t_{45} = 0.40 \text{ hrs. (Identificación del equipo fallado).}$

$C_{46} = 0.142 \text{ pu. } t_{46} = 6.0 \text{ hrs. (Reemplazo de acometida)}$

$C_{47} = 0.357 \text{ pu. } t_{47} = 0.08 \text{ hrs. (Restauración del servicio).}$

Sustituyendo valores:

$$d4 = 8 \times 1 \times 0.03 [0.142 (1.25 + 0.4 + 6) + 0.357 (0.08 + 0.3 + 0.08 + 0.08)]$$

$$= 0.307$$

$$f4 = n4 C4 X4 \lambda4 = 8 \times 0.357 \times 1 \times 0.03$$

$$= 0.086$$

Falla 5 (Interruptor de operación manual sumergible con limitador.

$$d5 = n5 X5 \lambda5 \sum_{j=1}^m C5j T5j$$

Si $n_5=5$ $X_5=1$ $\lambda_5=0.007$ /unidades/año

$C_{51} = 0.285$ pu. $t_{51}=1.25$ hrs. (Recepción de la queja y desplazamiento al lugar).

$C_{52} = 0.357$ pu. $t_{52}=0.08$ hrs. (Interrupción del servicio).

$C_{53} = 0.357$ pu. $t_{53}=0.40$ hrs. (Identificación del equipo fallado).

$C_{54} = 0.357$ pu. $t_{54}=0.08$ hrs. (Resturación del servicio).

$C_{55} = 0.285$ pu. $t_{55}=8.0$ hrs. (Reemplazo de interruptor manual sumergible con limitador).

$C_{56} = 0.357$ pu. $t_{56}=0.08$ hrs. (Restauración del servicio).

Sustituyendo valores:

$$d_5 = 5 \times 1 \times 0.007 [0.285 (1.25+8.0) + 0.357 (0.08+0.4+0.08+0.08)] \\ = 0.100$$

$$f_5 = n_5 C_5 X_5 \lambda_5 = 5 \times 0.357 \times 1 \times 0.007 \\ = 0.012$$

La duración promedio total de interrupciones será:

$$d_t = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 \\ = 2.599 + 0.22 + 9.433 + 0.307 + 0.100 \\ = 12.489$$

La frecuencia promedio total resulta:

$$F_t = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 \\ = 0.216 + 0.005 + 0.826 + 0.086 + 0.012 \\ = 1.145$$

El factor de conveniencia será:

$$F_{con} = \frac{1}{C \cdot d_t} \text{ donde } C - \text{Costo por KVA instalado (ver Tabla 3.19).} \\ = \frac{1}{9.693 \times 12.489}$$

$$F_{con} = 0.008$$

Estructura anillo abierto.

La Figura 3.50 muestra la estructura con las fallas que a continuación se indican.

Falla No.	Elemento No.	Elemento fallado.
F1	1	Cable troncal.
F2	3	Interruptor en aire
F3	2	Cable subtroncal
F4	7	Interruptor de operación manual sugergible.
F5	6	Acometida (Int.en aire y cable).

Falla 1 (Cable troncal)

$$d_1 = n_1 \times X_1 \times \lambda_1 \sum_{j=1}^m C_{1j} T_{1j}$$

Si $n_1 = 4$; $X_1 = 2.4 + 1.1 + 2.26 + 1.5 + 3.2 + 1.1$
 $= 11.56$ Km.

$\lambda_1 = 0.043$ /Km circuito/año

$C_{11} = 0.285$ pu. $t_{11} = 1.25$ hrs. (Recepción de la queja y desplazamiento al lugar).

$C_{12} = 0.285$ pu. $t_{12} = 0.08$ hrs. (Interrupción del servicio de alimentador B-22).

$C_{13} = 0$ $t_{13} = 8.0$ hrs. (Localización puntual de la falla en cable).

$C_{14} = 0$ $t_{14} = 2.0$ hrs. (Reparación de la falla).

$C_{15} = 0$ $t_{15} = 0.08$ hrs. (Restauración del servicio de alimentador B-22).

Sustituyendo valores:

$$d_1 = 4 \times 11.56 \times 0.043 \left[0.285 (1.25 + 0.08) + 0 (8 + 2 + 0.08) \right]$$

$$= 0.753$$

$$f_1 = n_1 C_1 X_1 \lambda_1 = 4 \times 0.285 \times 11.56 \times 0.043$$

$$= 0.566$$

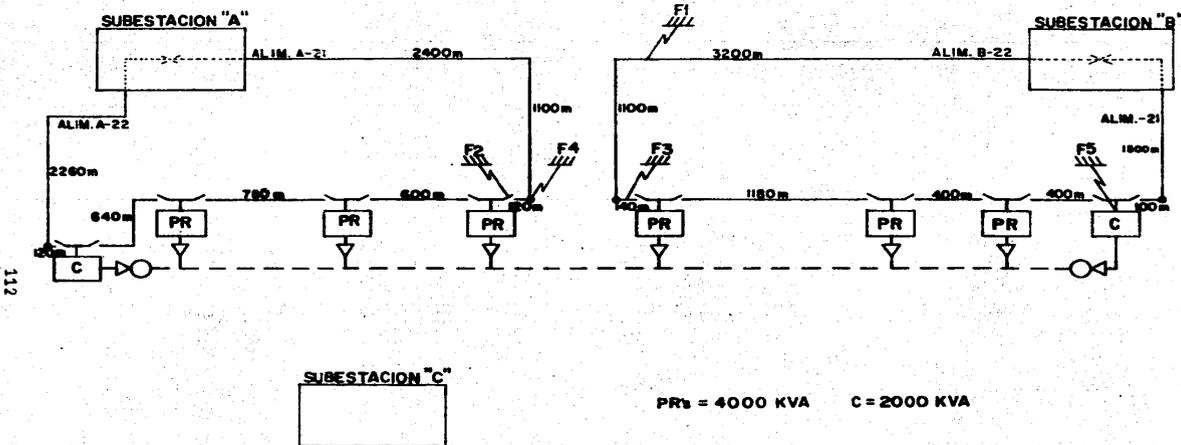


Figura 3.50 Red de Alimentadores en Anillo para una Línea de Metro, Mostrando sus Puntos de Falla.

Falla 2 (Interruptor en aire de operación manual).

$$d2 = n2 \times X2 \times \lambda2 \sum_{j=1}^m C2j \cdot T2j$$

Si $n2 = 16; X2 = 1 \quad \lambda2 = 0.005/\text{unidad/año}$

$C_{21} = 0.285$ pu.	$t_{21} = 1.25$ hrs.	(Recepción de la queja y desplazamiento al lugar).
$C_{22} = 0.285$ pu.	$t_{22} = 0.08$ hrs.	(Interrupción del servicio del alimentador A-21)
$C_{23} = 0.285$ pu.	$t_{23} = 0.40$ hrs.	(Identificación del equipo fallado).
$C_{24} = 0.285$ pu.	$t_{24} = 0.08$ hrs.	(Restauración del servicio).
$C_{25} = 0$	$t_{25} = 8.0$ hrs.	(Reemplazo de interruptor manual).
$C_{26} = 0$	$t_{26} = 0.25$ hrs.	(Operación de interruptor manual en -- aire).
$C_{27} = 0$	$t_{27} = 0.08$ hrs.	(Restauración del servicio alimentador A-21).

Sustituyendo valores:

$$d2 = 16 \times 1 \times 0.005 [0.285 (1.25 + 0.08 + 0.4 + 0.08)]$$

$$= 0.041$$

$$f2 = n2 \times C2 \times X2 \times \lambda2 = 16 \times 0.285 \times 1 \times 0.005$$

$$= 0.023$$

Falla 3 (cable subtruncal).

$$d3 = n3 \times X3 \times \lambda3 \sum_{j=1}^m C3j \cdot T3j$$

Si $n3 = 10; X3 = 0.12 + 0.64 + 0.78 + 0.6 + 0.12 + 0.14 + 1.18 + 0.40 + 0.4 + 0.10$

$\lambda3 = 0.03/\text{Km}$
Circuito/año

$= 4.48 \text{ Km.}$

$C_{31} = 0.285$ pu. $t_{31} = 1.25$ hrs. (Recepción de la queja y desplazamiento al lugar).

$C_{32} = 0.285$ pu. $t_{32} = 0.08$ hrs. (Interrupción del servicio del alimentador B-22).
 $C_{33} = 0$ $t_{33} = 8.0$ hrs. (Localización puntual de la falla en-cable).
 $C_{34} = 0$ $t_{34} = 2.0$ hrs. (Reparación de la falla).
 $C_{35} = 0$ $t_{35} = 0.08$ hrs. (Restauración del servicio del alimentador B-22).

Sustituyendo valores:

$$d_3 = 10 \times 4.48 \times 0.03 [0.285 (1.25 + 0.08)] = 0.509$$

$$f_3 = n_3 C_3 \lambda_3 = 10 \times 0.285 \times 4.48 \times 0.03 = 0.383$$

Falla 4 (Interruptor de operación manual sumergible).

$$d_4 = n_4 X_4 \lambda_4 \sum_{j=1}^m C_{4j} T_{4j}$$

Si $n_4 = 4$; $X_4 = 1$; $\lambda_4 = 0.006$ /unidad/año

$C_{41} = 0.285$ pu. $t_{41} = 1.25$ hrs. (Recepción de la queja y desplazamiento al lugar).
 $C_{42} = 0.285$ pu. $t_{42} = 0.08$ hrs. (Interrupción del servicio del alimentador A-21).
 $C_{43} = 0$ $t_{43} = 0.40$ hrs. (Identificación del equipo fallado).
 $C_{44} = 0$ $t_{44} = 8.0$ hrs. (Reemplazo de interruptor manual sumergible).
 $C_{45} = 0$ $t_{45} = 0.30$ hrs. (Operación de interruptor manual sumergible).

Sustituyendo valores:

$$d_4 = 4 \times 1 \times 0.006 \times 0.285 (1.25 + 0.008) = 0.009$$

$$f_4 = n_4 C_4 X_4 \lambda_4 = 4 \times 0.285 \times 1 \times 0.006 = 0.007$$

Falla 5 (Acometida Interruptor en aire y cable)

$$d_5 = n_5 \times 5 \times \lambda_5 \sum_{j=1}^m C_{5j} T_{5j}$$

Si $n_5 = 8$; $\lambda_5 = 0.03/\text{unidad/año}$

$C_{51} = 0.142$ pu $t_{51} = 1.25$ hrs. (Recepción de la queja y desplazamiento al lugar).

$C_{52} = 0.214$ pu. $t_{52} = 0.08$ hrs. (Interrupción del servicio en el alimentador B-21).

$C_{53} = 0$ $t_{53} = 0.40$ hrs. (Identificación del equipo fallado).

$C_{54} = 0$ $t_{54} = 6.0$ hrs. (Reemplazo de interruptor en aire).

$C_{55} = 0$ $t_{55} = 0.08$ hrs. (Restauración del servicio en el alimentador B-21).

Sustituyendo valores:

$$d_5 = 8 \times 1 \times 0.03 [0.214 (0.214 (0.08) + 0.142 (1.25))] = 0.047$$

$$f_5 = n_5 C_5 \times 5 \times \lambda_5 = 8 \times 0.214 \times 1 \times 0.03 = 0.051$$

La duración promedio total será:

$$d_t = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 = 0.753 + 0.041 + 0.509 + 0.009 + 0.047 = 1.359$$

La frecuencia promedio total es:

$$f_t = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 = 0.566 + 0.023 + 0.385 + 0.006 + 0.051 = 1.030$$

El factor de conveniencia es:

$$F_{con} = \frac{1}{c \cdot d_t}$$

donde: c-costo por kVA instalado ver Tabla 3.19

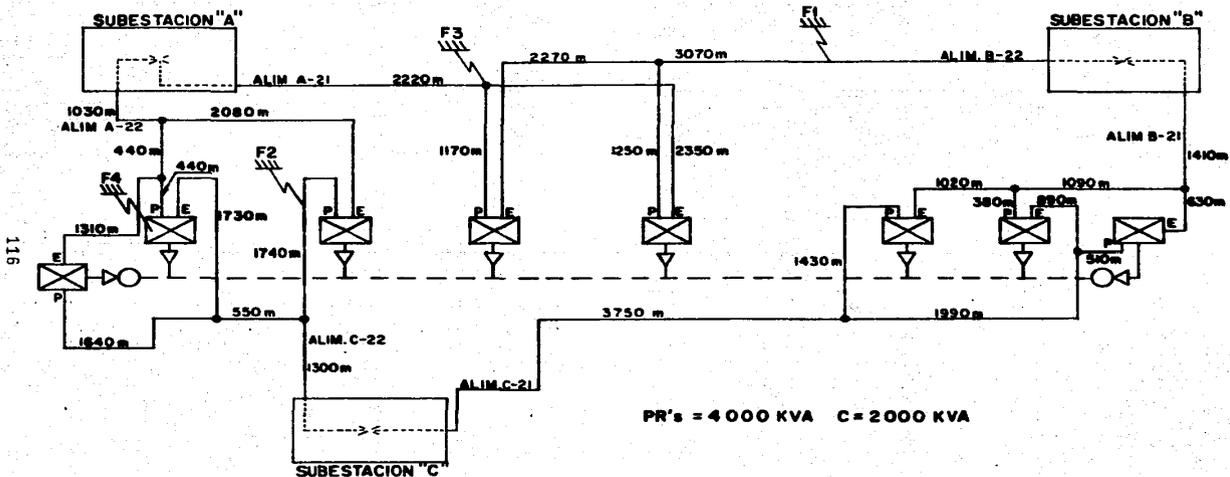


Figura 3.51 Red de Alimentación en Selectivo Primario para una Línea de Metro, Mostrando sus Puntos de Falla.

$$F_{con} = \frac{1}{13.015 \times 1.358}$$

$$F_{con} = 0.057$$

=====

- Estructura selectivo primario.

Obteniendo ahora índices de frecuencia y duración para la estructura selectivo primario, (ver Figura 3.51), de acuerdo con las expresiones ya descritas se tienen las siguientes fallas.

Falla N°.	Elemento N°.	Elemento fallado.
F1	1	Cable troncal
F2	2	Cable subtroncal
F3	7	Interruptor de operación manual sumergible.
F4	5	Interruptor de transferencia.

Falla 1 (Cable troncal).

$$d_1 = n_1 \times \lambda_1 \sum_{j=1}^m C_{ij} T_{ij} \quad \text{donde } n_1=6; X_1=2.22+(1.03+0.44)+(1.41+1.09) \\ +3.07+(3.75+1.99)+ (1.3+0.55)=16. \\ = 16.85 \text{ km.}$$

$\lambda_1 = 0.043/\text{km-circuito/año}$

$C_{11}=0 \quad t_{11}=1.25 \text{ hrs. (Recepción de la queja y desplazamiento al-lugar).}$

$C_{12}=0 \quad t_{12}=0.30 \text{ hrs. (Apertura de interruptor manual).}$

Sustituyendo valores:

$$d_1 = 6 \times 16.85 \times 0.043 \times (1.25 + 0.30) \\ = 0$$

$$f_1 = n_1 \times C_1 \times \lambda_1 = 6 \times 0 \times 16.85 \times 0.043 \\ = 0$$

Falla 2 (Cable subtroncal).

$$d_2 = n_2 \times X_2 \times \lambda_2 \sum_{j=1}^m C_{2j} T_{2j}$$

Si $n_2 = 16$ $X_2 = 1.17 + 2.35 + 2.08 + 0.44 + 1.31 + 0.63 + 0.38 + 1.02 + 1.25 + 2.27 + 1.43 + 0.51 + 0.89 + 1.74 + 1.73 + 1.64 = 20.84$ km.
 $\lambda_2 = 0.03/\text{km-circuito/año}$

$C_{21} = 0$ $t_{21} = 1.25$ hrs. (Recepción de la queja y desplazamiento al-lugar).
 $C_{22} = 0$ $t_{22} = 0.30$ hrs. (Apertura de interruptor manual sumergible).

Sustituyendo valores:

$$d_2 = 16 \times 20.84 \times 0.03 [0 (1.25 + 0.30)]$$

$$= 0$$

$$f_2 = n_2 \times C_2 \times X_2 \times \lambda_2 = 16 \times 0 \times 20.84 \times 0.03 = 0$$

Falla 3 (Interruptor de operación manual sumergible).

$$d_3 = n_3 \times X_3 \times \lambda_3 \sum_{j=1}^m C_{3j} T_{3j}$$

Si $n_3 = 10$; $X_3 = 1$; $\lambda_3 = 0.006/\text{unidad/año}$

$C_{31} = 0$ $t_{31} = 1.25$ hrs. (Recepción de la queja y desplazamiento al-lugar).
 $C_{32} = 0$ $t_{32} = 0.4$ hrs. (Identificación del equipo fallado).

Sustituyendo valores:

$$d_3 = 10 \times 1 \times 0.006 [0 (1.25 + 0.40)]$$

$$= 0$$

$$f_3 = n_3 \times C_3 \times X_3 \times \lambda_3 = 10 \times 0 \times 1 \times 0.006$$

$$= 0$$

Falla 4 (Interruptor de transferencia automática).

$$d_4 = n_4 \sum_{j=1}^m C_{4j} T_{4j} \lambda_4$$

Si $n_4=8$; $\lambda_4=1$; $\lambda_4=0.008$ /unidad/año

$C_{41} = 0.142$ pu- $t_{41}=1.25$ hrs. (Recepción de la queja y desplazamiento al lugar).

$C_{42} = 0.142$ pu. $t_{42}=0.30$ hrs. (Apertura de interruptor manual sumergible A-22).

$C_{43} = 0.142$ pu. $t_{43}=0.08$ hrs. (Restauración del servicio A-22).

$C_{44} = 0.142$ pu. $t_{44}=0.30$ hrs. (Apertura de interruptor manual sumergible C-22).

$C_{45} = 0.142$ pu. $t_{45}=0.08$ hrs. (Restauración del servicio C-22).

$C_{46} = 0.142$ pu. $t_{46}=0.40$ hrs. (Identificación del equipo fallado).

$C_{47}=0.142$ pu. $t_{47}=8.0$ hrs. (Reemplazo de interruptor TACI).

Sustituyendo valores:

$$d_4 = 8 \times 1 \times 0.008 [0.142(1.25+0.30+0.08+0.30+0.08+0.40+8.0)] = 0.095$$

$$f_4 = n_4 C_4 \lambda_4 = 8 \times 0.142 \times 1 \times 0.008$$

$$= 0.009$$

La duración promedio total de interruptor será:

$$d_t = d_1 + d_2 + d_3 + d_4$$

$$= 0 + 0 + 0 + 0.095$$

$$= 0.095$$

La frecuencia promedio total resulta:

$$f_t = f_1 + f_2 + f_3 + f_4$$

$$= 0 + 0 + 0 + 0.009 = 0.009$$

El factor de conveniencia será:

$$F_{con} = \frac{1}{C \cdot d_t}$$

donde C: es el costo kVA instalado (ver Tabla 3.19)

$$F_{con} = \frac{1}{26.007 \times 0.095}$$

$$= 0.405$$

En la Tabla 3.20 se resumen todos los resultados obtenidos de las tres estructuras analizadas.

Tabla 3.19 Resumen de Costos.

CONCEPTO	RADIAL	ANILLO ABIERTO	SELECTIVO PRIMARIO
COSTO LABOR En miles de pesos	49 017.799	65 818.031	131 515
COSTO MATERIAL En miles de pesos	214 519.91	288 043.9	575 558
COSTO TRANSPORTE En miles de pesos	7 872.881	10 571.211	21 123
COSTO TOTAL En miles de pesos	271 410.59	364 433.142	728 196
COSTO EN pu #	1.00	1.343	2.683
CAPACIDAD INSTALADA EN KVA	28 000	28 000	28 000
COSTO/KVA INST.	9.693	13.015	26.007

* Se tomó como base los valores de la estructura radial

Tabla 3.20 Resultados.

ESTRUCTURA	\bar{f}	\bar{d}	F_{con}	F_{con}^*
RADIAL	1.145	12.489	0.008	1.0
ANILLO ABIERTO	1.030	1.359	0.057	7.125
SELECTIVO PRIM	0.009	0.095	0.405	50.625

* Se tomó como base el caso de la estructura radial

C A P I T U L O 4

M A T E R I A L R O D A N T E

4.1 Introducción.

Conforme a la Ley de Coulomb una rueda sometida a un par motor, no se deslizará en tanto que el esfuerzo "F" permanezca inferior a una fracción de peso propio de la rueda. Esto se puede expresar matemáticamente con la siguiente expresión:

$$|F| < fP$$

4.1.

donde:

|F| : El valor absoluto del esfuerzo

f : Coeficiente de adherencia.

P : Peso

La experiencia ha demostrado que "f" disminuye con la velocidad y en la práctica se ha generalizado el empleo de valores medios para el coeficiente f. Así se tienen como ejemplo los siguientes factores:

f = 0.15 para un rodamiento hierro con hierro

f = 0.6 para un automóvil

f = 0.3 para un material metálico sobre neumáticos.

La adherencia está determinada por el esfuerzo máximo admisible del contacto rueda-plano de rodamiento. De acuerdo al principio de la dinámica de los cuerpos y refiriéndose a una rueda sometida a su peso y acoplada a un motor que genera el esfuerzo F (ver Figura 4.1) se tiene que:

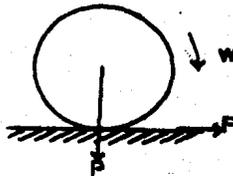


Figura 4.1 Contacto Rueda-Plano de Rodamiento.

$F = m \ddot{y}$
donde:

4.2

m : masa de la rueda
 \ddot{y} : aceleración inducida.
 w : velocidad angular

Sabiendo que F tiene un esfuerzo máximo $f P$ y por otra parte $P=mg$, -- donde g es la aceleración de la gravedad, es posible igualar ambas expresiones de tal forma que:

$$F = fP = \frac{P}{g} \ddot{y} \quad \text{despejando}$$

$$= fg$$

4.3

la expresión permite concluir que la aceleración máxima inducida depende del material en cuestión, así por ejemplo la aceleración máxima para materiales hierro-hierro y neumático-hierro es:

$\ddot{y}_{\max} = 0.8 \text{ m/seg}^2$ para un material rodante hierro-hierro.

$\ddot{y}_{\max} = 1.2 \text{ m/seg}^2$ para un material rodante neumático-hierro.

4.2 Resistencias al Avance.

Los esfuerzos que se oponen a la marcha de un tren se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Resistencia debida al rodamiento
- Resistencia de la fricción con el aire
- Resistencia a las curvas
- Resistencia a la gravedad
- Resistencia debida al rodamiento.- Como su nombre lo indica esta resistencia se opone al rodamiento.

Para cuestiones prácticas se emplea un método que permite incluir todas las resistencias en una constante α tal que:

$\alpha = 0.116$ N/kg para material hierro-hierro
 $\alpha = 0.0475$ N/kg para un material sobre neumáticos.

La masa a considerar será la masa estática del material.

- Resistencia de fricción con el aire.- Esta resistencia se presenta desde que existe un desplazamiento de un cuerpo en contacto con el aire, su valor varia proporcionalmente al cuadrado de la velocidad, dependiendo si el material rodante se desplaza en túnel o al aire libre.

Para un material rodante que se desplaza al aire libre la resistencia se calculará mediante la siguiente expresión:

$$R_f = \left(1.3 \frac{10}{m_e} + 0.01v \right) m_t + C v^2 \quad 4.4$$

donde:

R_f : Resistencia de fricción en Kgf

m_t : Masa del tren en toneladas

m_e : Masa del eje en toneladas

v : Velocidad Km/h

C : Es calculado en cada caso en particular.

$$C = 0.035 \left(s+p \frac{L}{100} \right) + 0.0021 N_p \quad 4.5$$

donde:

s : Superficie frontal del tren m^2

p : Perímetro de la parte frontal del tren m

L : Longitud del tren

N_p : Número de pantografos.

Para desplazamiento por túnel, la fórmula 4.4 es válida; pero considerando que el valor para C es 2 C.

Resistencia a las curvas.- Las curvas introducen una resistencia debido a que los ejes son rígidos y una rueda se desliza por efecto de la otra, en la obtención de esta resistencia interviene la longitud, del radio de la curva, así como el material rodante (hierro/hierro ó neumático/hierro).

Resistencia a la gravedad.- Esta resistencia se presenta cuando existen tramos con pendientes y se determina de acuerdo a la figura 4.2, con la expresión 4.6

$$R = p \operatorname{sen} \beta \quad 4.6$$

Donde: R: resistencia kgf
p: peso kgf
 β : ángulo de la pendiente.

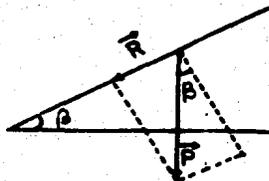


Figura 4.2 Resistencia a la Gravedad (R).

4.3 El Motor de Tracción.

El tipo de motor utilizado para la tracción del tren será del tipo serie y deberá reunir las siguientes características.

- Para una demanda de corriente el par que se ejerce debe ser menor al

que ejercen otros tipos de motores.

- Garantizar el arranque del tren
- Facilitar la regulación de la velocidad
- Eventualmente permitir el frenado eléctrico.

Analizando la curva par-velocidad que se muestra en la Figura 4.3 los puntos de intersección indican la velocidad de desplazamiento.

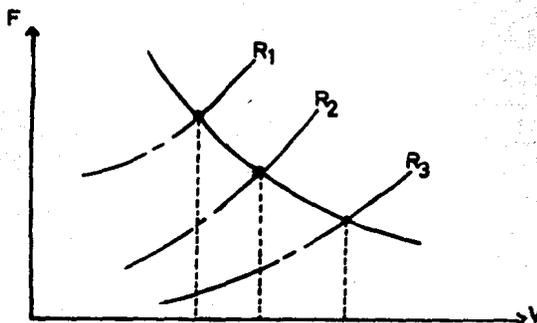


Figura 4.3 Curva Par-Velocidad.

Esta Figura muestra que a cada tipo de esfuerzo de resistencia, la velocidad toma un valor diferente, lo que implica que el par y la velocidad están sujetos a las condiciones locales de la línea, para lo cual es necesario tener el motor y su arreglo de circuitos de tal forma que pueda absorber las condiciones del terreno.

Arreglo como Inductor-Tensión.

Acción sobre el campo inductor.- La fuerza contraelectromotriz "E" generada por el motor a la velocidad v es proporcional al flujo (ϕ).

$$E = K v \phi$$

4.7

Si se mantiene E-cte, implica que si disminuye el flujo, aumenta la velocidad. En la práctica se disminuye el flujo inductor en el devanado, en un motor serie para el caso de un material rodante de sistema-

Jeumont Heidmann (JH) la corriente es inducida por las resistencias - de valores decrecientes y para un material rodante de sistema Hacheur - la corriente es inducida mediante una derivación. En los dos casos, se define una tasa de derivación que expresa el porcentaje de flujo - retirado.

Acción sobre la tensión.

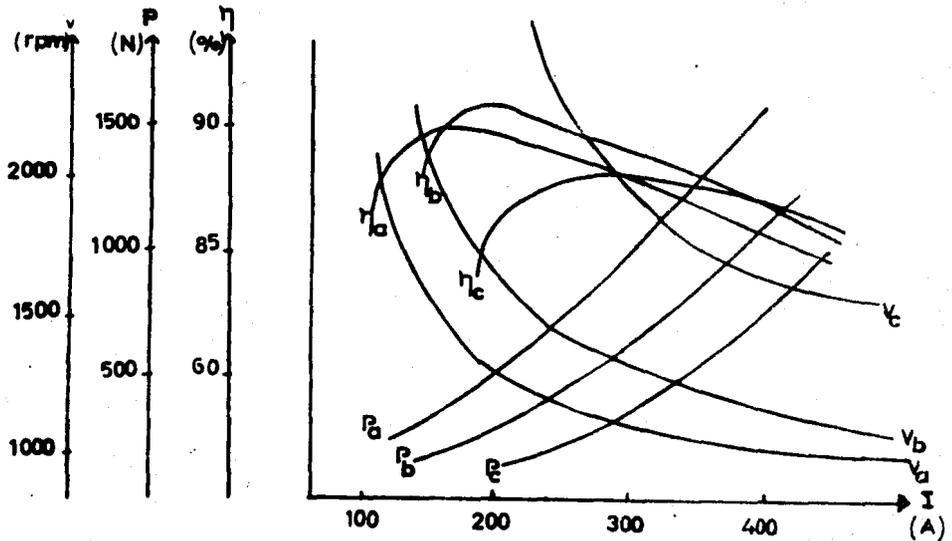
Se mantiene el flujo $\emptyset = \text{cte}$ lo que da lugar a que varíe "E". En la - práctica la variación de E para un motor en serie en el caso de material rodante de sistema JH. Se hará mediante resistencias de valores - decrecientes. Para el caso de un material rodante de sistema Hacheur - la variación de "E" se hace por regulación directa de la tensión.

Acción sobre el acoplamiento de algunos motores.- Los carros motrices - constan de dos conjuntos formados por motores o motor, soporte del mo - tor, ejes y conexiones; llamándose a cada conjunto "bogíe". Cada bogíe - tiene al menos un motor llamándose en este caso monomotor o si cuenta - con dos motores se llamará bimotor.

Si la motriz dispone de 2 motores por bogíe, se pueden realizar algu - nos acoplamientos como son:

4 motores en serie, 2 motores en serie sobre 2 en paralelo, 4 motores - en paralelo. Globalmente, en el acoplamiento en serie, cada motor re - quiere la mitad de la tensión que el arreglo en paralelo.

Curvas Típicas.- La familia más importante para la tracción es la fa - milia esfuerzo-velocidad. Si no se tiene la familia se puede obtener - mediante las curvas par-corriente y velocidad-corriente, ver Figura - 4.4



v: Velocidad r.p.m.; P: par N; η : Eficiencia %, I corriente A

Figura 4.4 Curvas Típicas de un Motor de Tracción.

Para la demanda de bajas velocidades, el arreglo de tensión será utilizado tal que permita el funcionamiento de flujo máximo (par máximo) y suministre así el esfuerzo más importante a la motriz. Para las velocidades más elevadas donde los motores ya son alimentados por toda la tensión disponible, se presenta una disminución de campo, que permite mantener un esfuerzo acelerador en las velocidades superiores a la velocidad nominal del motor.

Tabla 4.1 Ejemplo de características de un Motor Utilizado.

Características	Régimen continuo		Régimen Unihorario
	Campo máximo	Campo derivado	
Tensión	360 V	360 V	360 V
Intensidad	305 A	340 A	315 A
Velocidad	1035 rpm	1740 rpm	1030 rpm
Potencia	96 k w	104 k w	99 k w

Velocidad máxima en servicio 3000 rpm

Resistencia a 110 °c

° bobina de campo en serie 0.0265 ohm

° bobina de campo en conmutación 0.0201 ohm

° Inducido 0.0688 ohm

Este motor posee cuatro polos principales y cuatro polos de conmutación, el aislamiento de las bobinas es de clase H y tiene una masa de 700 kg.

4.4 Concepto de una Motriz.

La función esencial de una motriz es la de impulsar el conjunto de cargas que le son impuestas, además de ejecutar esta función con la flexibilidad necesaria y respetando una marcha impuesta por la demanda de la línea, como es; el intervalo entre trenes, tiempo de carga y descarga en estaciones de los pasajeros, etc.

La motriz esta integrada por:

- Motor de Tracción.
- Equipos de control
- Reductor de velocidad

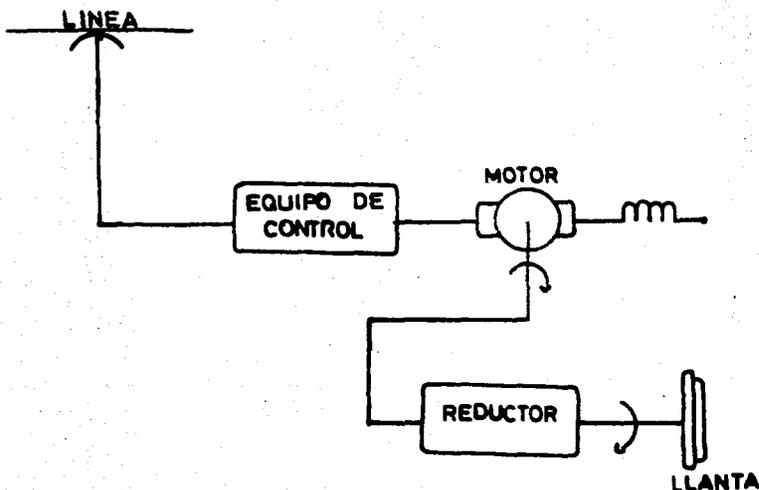


Figura 4.5 Diagrama de una Motriz.

Reductor de Velocidad.- El reductor es el que asegura la transmisión de la potencia mecánica disponible sobre el árbol del motor, con el mínimo de pérdidas y reduce la velocidad de rotación del motor, para que sea compatible con las velocidades lineales de las llantas. Este integrante cuenta con indicadores precisos que dan un rendimiento en el rango de velocidades que varían de 0.92 a 0.33 y la relación de transmisión en general se encuentra entre 5 a 6 para un material de rodamiento hierro/hiervo y de 8 a 11 para un material de rodamiento neumático/hiervo.

Equipos de Control.- Se pueden agrupar en:

- + Las funciones que aseguran la configuración eléctrica de los motores.
- + Las regulaciones que aseguran el buen funcionamiento del motor y los

resultados dinámicos tales como la aceleración, la limitación de -- "Jerk" (pendiente de la aceleración).

- + Las protecciones que pueden estar incluidas dentro de las regulaciones y que supervisan a ciertos parámetros del circuito de tracción-- para que estos no sean sobrepasados (supervisión de la tensión en -- línea, corriente en los motores, rodamiento, etc.).

4.5 El Control del Material Rodante.

Las funciones de control son efectuadas por los equipos de control de acuerdo al tipo de sistema. Existen dos sistemas usados y son:

- Sistema Jeumont Heidmann (JH)
- Sistema Hecheur

Sistema Jeumont Heidmann. (JH).- Este sistema utiliza un modo de arreglo de tensión y campo, donde el control de velocidad es efectuado -- por un dispositivo de eliminación de resistencias, permitiendo que la velocidad del motor no varíe instantáneamente, evitando así que exista un incremento brusco en la corriente y se tenga una discontinuidad, logrando mantener un esfuerzo medio constante en la llanta con una -- aceleración constante y una velocidad aproximadamente lineal.

El incremento de la velocidad que se obtiene es ejecutado por desconexión de resistencias mediante un programa de tracción que cierra los con-- tadores necesarios para cada etapa del programa.

Sistema Hecheur.- Este sistema utiliza un arreglo directo a la ten-- sión de los motores, mediante un equipo electrónico de tiristores -- llamado Hecheur con el cual se controla la velocidad. La variación-- de la tensión en corriente continua se hace mediante la desconexión del generador por medio de un interruptor; para evitar que la co -- rriente se anule a cada apertura, se cuenta con un conjunto de bobina y diodo que asegura la continuidad eléctrica.

- Equipos de Control de Frenado.- El material rodante utiliza dos ti-

pos de frenado que son:

Mecánico por fricción

Eléctrico { Reostático
Recuperación

- Mecánico por fricción.- Este es efectuado mediante la fricción de las zapatas sobre la banda de la rueda o bien el frotamiento de zapatas sobre un disco (ver Figura 4.6).

$$\vec{F} = \zeta \vec{p}$$

4.3

donde:

\vec{F} : Esfuerzo tangencial proporcional a \vec{p}

\vec{p} : Esfuerzo que aplica la zapata

ζ : Coeficiente de proporcionalidad y es característico para el tipo de control JH ó Hecheur.

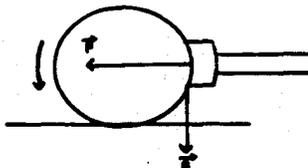


Figura 4.6 Frenado Mecánico.

Eléctrico

° Frenado Reostático.- Para el sistema JH los motores en el frenado funcionan como generadores, donde la energía mecánica de la motriz es disipada en calor mediante la regulación de un reostato, dando así un esfuerzo constante ajustado a la carga.

Para el sistema Hecheur la generación en el frenado es transmitida sobre un conjunto, cuya resistencia aparente varía conjuntamente al suministro cíclico del Hecheur, la variación impondrá un esfuerzo constan

te a la motriz.

° Frenado por recuperación.- Para el tipo sistema JH, en posición de - frenado, parte de la energía de la motriz es renviada a la fuente mediante un dispositivo de conversión, debido a que el circuito de tracción impone el flujo sobre la línea.

En el sistema Hacheur por medio de la corriente de excitación, se logra una tensión mayor en los motores que en la línea, con lo cual se logra disminuir la velocidad y recircular energía en la línea.

Auxiliares.- Los auxiliares en el material rodante son:

° Aire comprimido para el freno mecánico y cierre de puertas.

° Fuente de tensión

° Ventilación de los carros.

Estos auxiliares son generalmente compuestos de un grupo motor compresor para suministro de aire y de un grupo motor alternador para el suministro de la fuente de tensión.

En la línea los auxiliares constituyen una carga de fondo relativamente pequeña en comparación con la demanda de corriente de tracción.

C A P I T U L O 5

P U E S T O S D E R E C T I F I C A C I O N

5.1 Generalidades.

Se define como puesto de rectificación (PR) al local, en el cual se lleva a cabo la transformación de energía eléctrica de corriente alterna en corriente rectificadora, adecuada para alimentar directamente los motores de tracción.

El puesto de rectificación básicamente se compone de los siguientes elementos. (Ver Figura 5.1).

Acometida

- Equipo de Transferencia
- Equipo de Medición

Tablero de alta tensión

- Cuchilla Desconectadora
- Transformador de Auxiliares
- Interruptor de Potencia.

Transformador - Rectificador

- Transformador de potencia
- Equipo Rectificador
- Interruptor Ultrarápido

5.2 Descripción de un Puesto de Rectificación.

5.2.1 Acometida.

El suministro de energía eléctrica para un puesto de rectificación se realiza mediante un sistema de corriente alterna (23 kV, 3 Ø, 60-Hz) que es parte de la red de distribución de la compañía suministra

dora.

A cada puesto de rectificación llegan dos alimentadores que provienen de diferentes subestaciones de la compañía suministradora, uno de servicio preferente y el otro de servicio emergente. Cada uno de estos alimentadores puede servir a dos puestos de rectificación como máximo, mientras en uno de ellos actúe como alimentador preferente (servicio normal) y en otro puesto de rectificación el mismo alimentador se designe de servicio emergente, es decir, cada uno de estos alimentadores deberá de soportar el 100% de carga de dos puestos de rectificación, además de las sobrecargas que se especifiquen.

Equipo de Transferencia.- Este equipo, es el que realiza la conmutación del alimentador preferente al emergente cuando falla el suministro normal de energía al puesto de rectificación.

Equipo de Medición.- Está integrado por los instrumentos de medición propiedad de la compañía suministradora de energía, que miden el consumo de energía del puesto de rectificación.

5.2.2 Tablero de Alta Tensión.

El tablero de alta tensión conforma un grupo de gabinetes metálicos formados por secciones verticales donde se montan los equipos de alta tensión como son: cuchilla desconectadora, transformador de auxiliares, interruptor de potencia y cuchillas de puesta a tierra.

Cuchilla Desconectadora.- Después del equipo de medición se tiene un juego de cuchillas desconectadoras de operación en grupo y bajo carga. Este equipo tiene como fin el establecer el límite eléctrico entre la compañía suministradora de energía y el sistema de transporte colectivo, asimismo facilita las maniobras de mantenimiento que se requiere hacer con equipos desenergizadas.

Transformador de Auxiliares.- Este equipo, el cual consta de un --

transformador trifásico que suministra la energía eléctrica necesaria para el alumbrado, fuerza y control de todo el puesto de rectificación.

La protección del transformador de auxiliares consta de un juego de cuchillas desconectadoras trifásicas de operación en grupo para - - abrir bajo carga y fusibles.

Interruptor de Potencia.- Es un interruptor trifásico que tiene como fin abrir el circuito de alimentación al transformador de potencia - cuando ocurra una falla en el circuito de alta tensión.

5.2.3 Conjunto Transformador-Rectificador.

El conjunto transformador-rectificador tiene como fin reducir y rectificar la tensión alterna a tensión continua adecuada (750 V) y aumentar la red de tracción.

Transformador de Potencia.- Es un transformador trifásico, el cual - tiene como fin el reducir la tensión de acometida de la compañía suministradora de energía a un nivel de tensión apropiado para alimentar el rectificador de la subestación.

Rectificador.- Consta de una serie de diodos de silicio montados en configuración de un puente de GRAETZ (rectificador hexafásico), que tienen como fin rectificar la tensión alterna que entrega el transformador de potencia en tensión continua.

Interruptor Ultrafápido.- Este interruptor tiene como fin proteger - la red de tracción y aislar al rectificador y transformador de potencia contra fallas de corto circuito en el lado de corriente continua. Cuenta también con limitadores de tensión para absorber las sobretensiones que se presentan durante la apertura del interruptor.

Los dispositivos que cumandan la apertura del interruptor son:

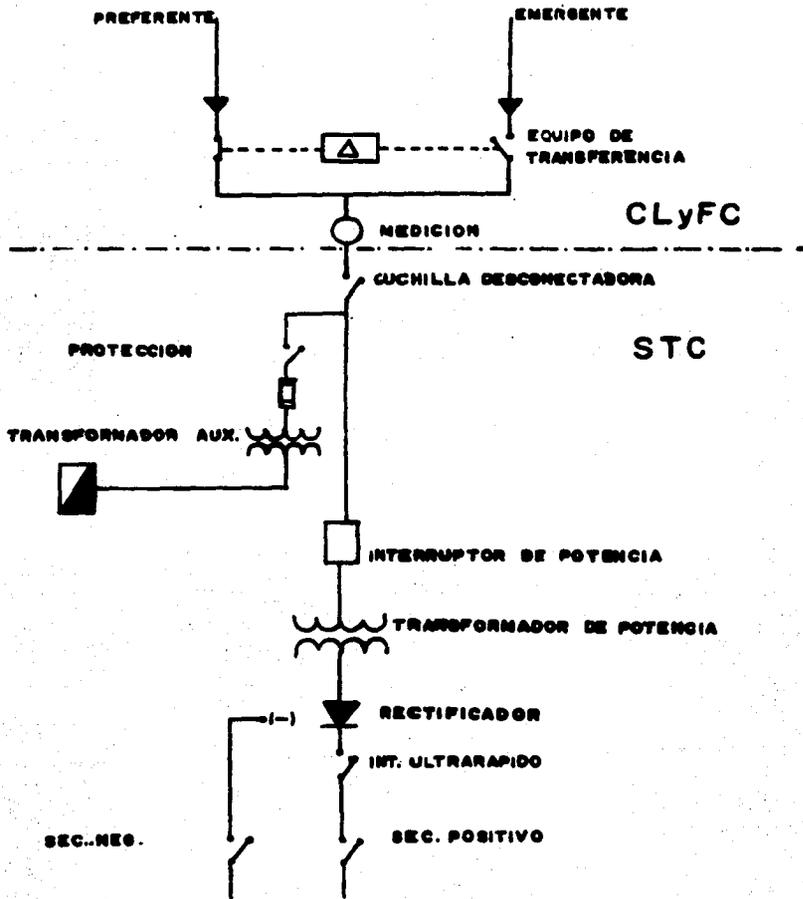


Figura 5.1 Diagrama Unifilar de un Puesto de Rectificación.

Armario de Control y Relevadores.

En éste se encuentran los dispositivos con que se equipa al rectificador para protegerlo y son: control de temperatura de los diodos, - control de los diodos detectando la falla de uno de ellos, dispositivo de detección de corriente inversa y dispositivo que ordene el disparo del grupo rectificador en caso de una falla a tierra.

- Detector de Corto Circuito.

Este detector tiene como finalidad reconocer las sobrecargas y las - corrientes de corto circuito franco en línea, en base al incremento de corriente en función del tiempo.

5.3 Teoría de la Rectificación.

5.3.1 Principales Características de los Diodos de Potencia.

Los principales parámetros que permiten caracterizar y eventualmente comparar a los diferentes diodos de potencia disponibles en el mercado son:

- Intensidades de corriente directa
- Caída de tensión
- Pérdidas
- Temperatura de la unión
- Resistencia térmica
- Tensión y corriente en inversa.

Intensidades de corriente directa.- Una celda semiconductor se define generalmente para la corriente media rectificada (I_o), --- que puede manejar en un montaje monofásico, bajo carga resistiva y - dentro de condiciones de temperatura y de enfriamiento definidas --- (ver Figura 5.2).

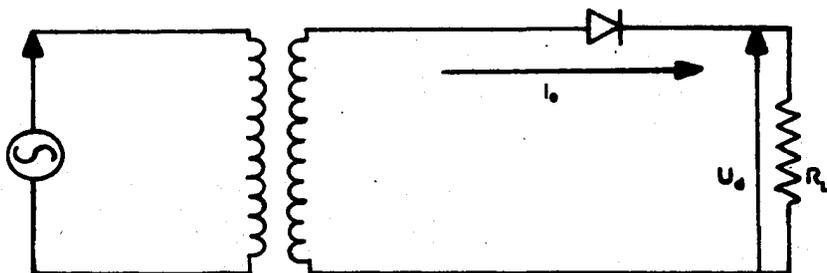


Figura 5.2 Montaje Monofásico

En principio la intensidad I_o y la temperatura de la unión (T_j) son suficientes para determinar los límites de funcionamiento de la celda semiconductora en régimen permanente, si las siguientes dos condiciones se respetan simultáneamente:

- El valor de la intensidad de corriente, I_o - Fija la densidad de corriente permitida por el fabricante dentro de la unión.
- El incremento en la T_j , requiere de un método de enfriamiento para que esta no se eleve por encima del límite especificado.

Desafortunadamente la temperatura de la unión es de difícil acceso - para medirla directamente, independientemente de la dificultad que presenta la débil inercia térmica del cristal de silicio. Por esto - el punto de referencia en la medición de la temperatura, es sobre el encapsulado de la unión; esta temperatura (T_c) es suficiente y admisible para utilizarla a reserva de que el punto de medición sea bien especificado y que el límite de la corriente media I_o sea respetado - (ver Figura 5.3).

En régimen permanente, las relaciones entre los diferentes parámetros que caracterizan una celda semiconductor son:

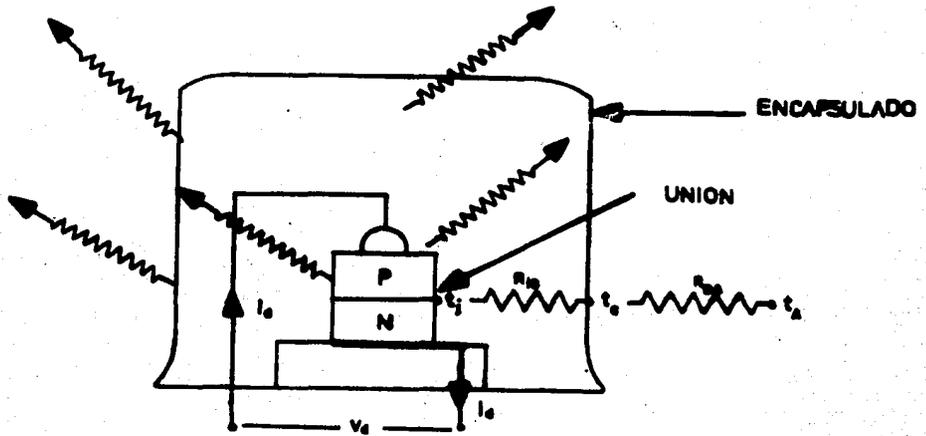


Figura 5.3 Transferencia de Calor de una Celda de Potencia.

$$P = \frac{1}{T} \int_0 V_F I_F dt. \quad 5.1$$

$$T_j = T_A + (R_{jB} + R_{BA}) P \quad 5.2$$

$$T_c = T_j - R_{jB} P = T_A + R_{BA} P \quad 5.3$$

donde P representa la pérdida en watts en la celda debida a I_c

V_F La caída de tensión instantánea en el diodo en volts.

I_d La corriente instantánea en el diodo en amperes.

T_A Temperatura ambiente en °C

T_j Temperatura de la unión en °C

T_c Temperatura del encapsulado en $^{\circ}C$

R_{jB} La resistencia térmica unión-encapsulado en $^{\circ}C/Watts$

R_{BA} La resistencia térmica encapsulado-ambiente (y por consecuencia la resistencia térmica de contacto y los disipadores) en $^{\circ}C/watts$.

los parámetros I_o y T_c dependen de R_{jB} y R_{BA}

R_{jB} depende del fabricante y R_{BA} se puede modificar a voluntad.

En general, los fabricantes proporcionan un valor de la resistencia térmica en base a la temperatura máxima para la cual la unión disipa una potencia media.

$$R_{jB} = \frac{T_{jmax} - T_c}{P} \quad 5.4$$

Pérdidas.- La expresión del diodo en conducción directa permite expresar las pérdidas en función de la corriente eficaz correspondiente.

$$V_d = V_o + R_d I_d \quad 5.5$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V_d I_d dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_o I_d dt + \frac{1}{T} \int_0^T R_d I_d^2 dt$$

donde

V_o : Voltaje de cendido del diodo en volts

R_d : Resistencia dinámica del diodo en ohms

$$P = V_o I_o + R_d I_e^2 \quad 5.6$$

donde

I_e : Es el valor eficaz de la corriente en el diodo en Amperes.

La utilización de esta fórmula requiere conocer el valor de V_o y R_d ; - los cuales se pueden deducir fácilmente de la curva característica - de la celda semiconductor polarizada en directa (ver Figura 5.4).

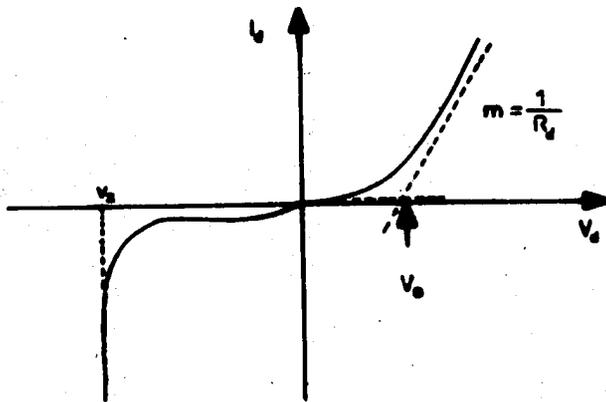


Figura 5.4 Curva Característica de un Diodo Semiconductor

donde:

V_2 : Voltaje de avalancha en Volts.

Para el caso de un montaje de rectificación trifásico las pérdidas - por diodo son el producto de la caída de tensión de pico en el diodo por la corriente media correspondiente.

$$P = V_F I_o$$

- Corriente eficaz y corriente de pico

La definición de corriente media I_o fija un valor de corriente eficaz I_e y un valor de corriente de pico repetitiva I_{FW} que atraviesa el diodo. Tanto la corriente eficaz como la corriente media, son impor-

tantes para el cálculo de las pérdidas. La corriente de pico repetitiva I_{PW} , por el contrario, fija la densidad de corriente máxima admisible en la unión y su valor está directamente relacionado con las fluctuaciones de temperatura que afectan al cristal. Es necesario -- que el fabricante proporcione este valor, a falta de éste, el valor de I_0 constituirá el límite.

La Figura 5.5 muestra una gráfica de pérdidas en función de la corriente, para diferentes montajes, así como los límites de potencia.

El punto A corresponde a la característica monofásica en el límite de potencia, el punto B corresponde a la utilización industrial del elemento que da no solamente un margen de seguridad, sino también la posibilidad de sobrecargas.

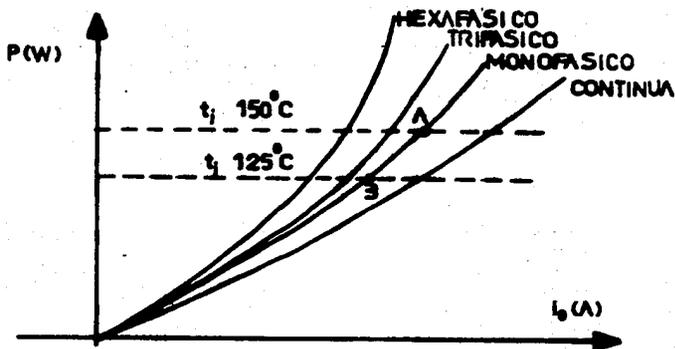


Figura 5.5 Pérdidas de una Celda Semiconductor.

Tensiones en inversa.- La característica inversa de una celda de silicio indica que la corriente inversa se debilita hasta la tensión de avalancha (ver Figura 5.4). Su valor a la temperatura de operación varía de algunos microamperes para diodos de difusión y de mili

amperes hasta decenas de miliamperes para diodos fabricados por el método de aleación.

En condiciones de operación, las pérdidas que esta corriente involucra se pueden considerar despreciables. Sin embargo en la celda semiconductor las variaciones de la corriente inversa dentro de la región de avalancha conducen a una característica de la celda para diferentes tensiones (ver Figura 5.6).

Dichas tensiones son:

- La tensión inversa transitoria V_{RSM} que puede soportar la celda durante un tiempo dado.
- La tensión inversa repetitiva de punto V_{ARM} que puede contener una onda fundamental y los puntos de tensión se producen en cada período.
- La tensión inversa es senoidal V_{RWM} .

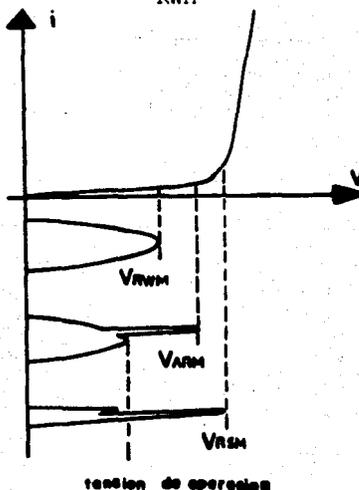
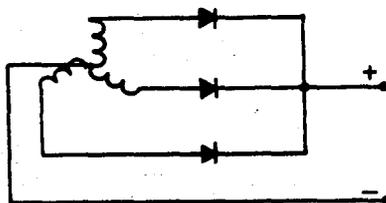


Figura 5.6 Característica en Inversa y Definición de Tensiones.

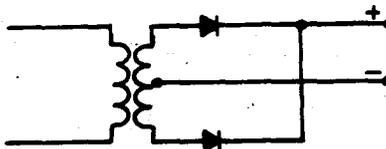
5.3.2 Tipos de Montajes de Rectificación.

Un sistema rectificador se caracteriza por el número de fases de la tensión a rectificar, y por el montaje utilizado (número de grupos conmutantes y sus diferentes asociaciones).

Montajes simples o montajes a un solo grupo conmutante.- Estos montajes dan una tensión rectificadora cuyo número de conmutaciones es igual al número de fases de la red de alimentación. Es decir si "m" es el número de fases de la red de alimentación, "m" es igualmente el número de diodos que conmutan ciclicamente formando así un elemento rectificador a "m" fases que recibe el nombre de grupos de conmutación (ver Figura 5.7).



Montaje Trifásico



Montaje Monofásico

Figura 5.7 Montajes de Rectificación.

En un grupo de conmutación el cebado de los diodos está defasado $2\pi/m$.

Los rectificadores pueden estar montados en cátodo común (montaje policátodico), así como en ánodo común (montaje poliánodico).

Montajes polifásicos complejos.- Estos montajes son el resultado de la puesta en serie o en paralelo de grupos de conmutación defasados entre ellos. Sea "q" el número de grupos de conmutación independientes (dos grupos de conmutación son independientes si el cebado de -- uno está sistemáticamente defasado en relación al otro) y sea "m" el número de fases de la red de alimentación, la tensión rectificadora resultante está caracterizada por "p" lóbulos, número de conmutaciones no simultáneas durante un período de la red de alimentación tal que:

$$p = mq$$

5.7

La tensión rectificadora es entonces periódica, de período $\frac{2\pi}{p}$

Por ejemplo el puente de Graetz trifásico (Figura 5.9) resulta de la puesta en serie de un montaje policatódico y de un montaje polianódico.

donde: $m = 3 \quad q = 2 \quad p = 6$

Este montaje dá así una conmutación idéntica al montaje hexafásico.

5.3.3. Montaje de Rectificación Monofásico.

Aunque es muy poco utilizado en la práctica debido a su elevada tasa de ondulación, el montaje monofásico permite comprobar los parámetros fundamentales dados por los fabricantes de semiconductores y familiarizarse con los diferentes símbolos comúnmente utilizados en los montajes de rectificación (ver Figura 5.9).

- Funcionamiento en vacío.- Durante el semiciclo positivo el diodo se comporta como un interruptor cerrado; por el contrario durante el semiciclo negativo el diodo se comporta como un interruptor abierto.

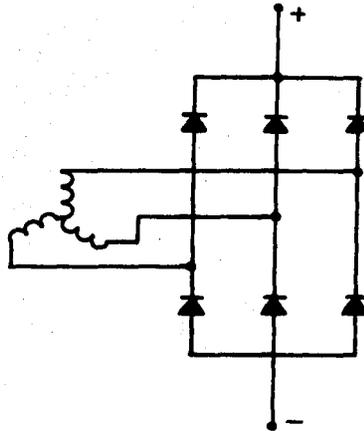


Figura 5.8 Puente de Graetz Trifásico.

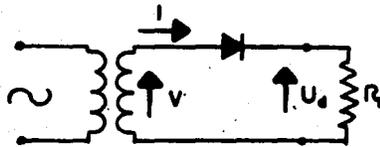


Figura 5.9 Montaje Monofásico.

ic (polarizado en inversa), siendo toda la tensión de fase aplicada al diodo (tensión inversa).

La tensión rectificadora que se obtiene con este montaje es una tensión ondulada, como se puede observar en la Figura 5.10, la frecuencia de ondulación es igual a la de la tensión que alimenta al rectificador.

- donde:
- U - Tensión eficaz en volts
 - U_d - Tensión media rectificadora en volts.

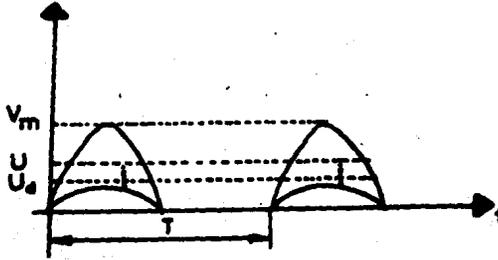


Figura 5.10 Tensión y Corriente Rectificada.

- Tensión media Rectificada.

En régimen sinusoidal la tensión de alimentación es de la forma:

$$v = V_m \text{ Sen } \omega t = 2 V \text{ Sen } \omega t \quad 5.8$$

Siendo V_m la tensión máxima (de pico) de fase.

Como el diodo conduce durante el semiciclo positivo de la tensión se noidal, la tensión media rectificada es:

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_m \text{ Sen } \omega t \, dt = \frac{V_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2} V}{\pi}$$

$$U_d = 0.45 V = 0.318 V_m. \quad 5.9$$

- Tensión eficaz rectificada.

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_m^2 \text{ Sen}^2 \omega t \, dt} = \sqrt{\frac{V_m^2}{4}}$$

$$U = \frac{V_m}{2} = \frac{V}{\sqrt{2}} \quad 5.10$$

Factor de forma de la tensión rectificada (F)

Se define por la relación entre la tensión eficaz y la tensión media

rectificadas:

$$F = \frac{U}{U_d} \quad 5.11$$

$$F = \frac{\frac{V}{\sqrt{2}}}{\frac{V}{\sqrt{2}}} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$

- Tasa de ondulación de la tensión rectificada.

Se define en función del factor de forma mediante la siguiente expresión:

$$\beta = \sqrt{F^2 - 1} \quad 5.12$$

Sustituyendo el valor de F se tiene que

$$\beta = \sqrt{(1.57)^2 - 1} = 1.21$$

Así la ondulación expresada en por ciento es del 121%.

- Tensión inversa de pico en el diodo (V_{RM}).

La tensión total que soporta el diodo durante el semiciclo negativos:

$$V_{RM} = V_m = \sqrt{2} V \quad 5.13$$

en función de U_d :

$$V_{RM} = \pi U_d \quad 5.14$$

Funcionamiento bajo carga.- Para obtener los parámetros bajo carga en este montaje, se considera la carga a alimentar puramente resistiva.

Corriente media rectificada.

$$I_d = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \text{Sen } \omega t \, dt = \frac{I_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2} I}{\pi} \quad 5.15$$

Corriente eficaz rectificada.

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m^2 \text{Sen}^2 \omega t \, dt} = \sqrt{\frac{I_m^2}{4}}$$

5.16

$$I_e = \frac{I_m}{2} = \frac{I}{\sqrt{2}}$$

5.3.4 Montaje de Rectificación Trifásico.

Es un montaje típico de rectificación polifásica industrial muy empleado cuando se manejan potencias pequeñas (ver Figura 5.11).

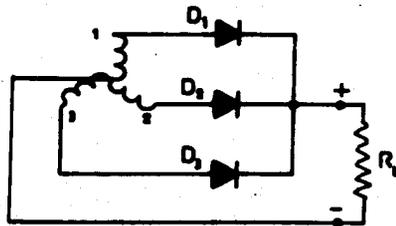


Figura 5.11 Montaje Trifásico.

Forma de onda de la tensión rectificada.- La tensión rectificada que se obtiene con este tipo de montaje, consta de tres lóbulos senoidales por período de la tensión de la alimentación, en todo instante - el ánodo de potencial más alto suministra la conmutación, se repite tres veces por período (ver Figura 5.12).

La tensión rectificada tiene, así, tres máximos por período (T), con una frecuencia de 3f.

En el instante de una conmutación, la tensión rectificada instantánea es mínima e igual a la mitad de la tensión máxima (ver Figura -- 5.12).

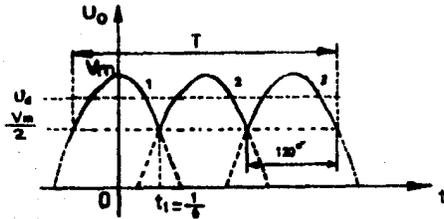


Figura 5.12 Tensión Rectificada.

Por la tanto las tres fases (lóbulos) tienen por expresión:

$$V_1 = V_m \cos \omega t \quad 5.17$$

$$V_2 = V_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad 5.18$$

$$V_3 = V_m \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \quad 5.19$$

El valor máximo de la tensión rectificada instantanea (U_o) es V_m y - su valor mínimo corresponde a una conmutación. Para la conmutación - ánodo 1- ánodo 2, por ejemplo, $U_o = V_1 = V_2$ que se procede en el tiempo t_1 (ver Figura 5.12).

tal que:

$$V_m \cos \omega t_1 = V_m \cos \left(\omega t_1 - \frac{2\pi}{3} \right)$$

donde:

$$\omega t_1 = \frac{\pi}{3} = 60^\circ$$

ó:

$$\cos \frac{\pi}{3} = \frac{1}{2}$$

así:

$$U_o = V_1 = V_2 = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad 5.20$$

Funcionamiento en vacío.- Es la operación del montaje de rectificación cuando este se encuentra sin carga conectada.

- Tensión media rectificada.

Si V_1 representa la tensión eficaz de la fase 1, la tensión instantánea es de acuerdo a la expresión 5.17

$$v_1 = V_1 \sqrt{2} \cos \omega t = V_m \cos \omega t$$

o sea, es suficiente buscar el valor medio de la tensión dentro del intervalo $-\pi/6$ a $+\pi/6$ (ver Figura 5.12).

$$U_d = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{+\pi/6} V_m \cos \omega t \, dt = \frac{3\sqrt{3}}{\pi 2} V_m \quad 5.21$$

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} V_1$$

$$U_d = 0.827 V_m = 1.17 V_1$$

Este valor es superior a la tensión a la tensión media monofásica para la misma tensión de alimentación.

- Tensión eficaz rectificada (U)

$$U^2 = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{+\pi/6} V_m^2 \cos^2 \omega t \, dt = V_m^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \right)$$

de donde:

$$U = \sqrt{V_m^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \right)} \quad 5.22$$

$$U = V_m \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi}} = 0.841 V_m$$

- Factor de forma de la tensión rectificadora (F)

$$F = \frac{U}{U_d} = \frac{0.841 V_m}{0.827 V_m} = 1.016$$

- Tasa de ondulación de la tensión rectificadora (β)

De acuerdo a la expresión general 5.11 de la tasa de ondulación se tiene:

$$\beta = \sqrt{(1.016)^2 - 1}$$

$$\beta = 0.185$$

que expresado el porcentaje es de 18.5%

- Tensión inversa de pico entre fases (V_{RM})

Es igual a la tensión de pico entre fases (V_{RM})

$$V_{RM} = \sqrt{3} V_m = \frac{2\sqrt{3}}{3} U_d \quad 5.23$$

$$V_{RM} = 2.1 U_d$$

Funcionamiento bajo carga.- Como hipótesis; se admitirá que la corriente rectificadora es perfectamente continua, que implica considerar como infinitamente grande la reactancia del circuito de utilización: esta hipótesis es prácticamente exacta, por ejemplo, para una red de tracción donde la longitud de las líneas es importante dado que de $I_d \approx I$.

-Corriente circulante dentro de la fase

La corriente de fase del secundario, es decir, la corriente en el ánodo de un diodo tiene un sentido constante, pasa bruscamente del cero al valor I_d de la corriente rectificadora que se conserva durante $T/3$ segundos, después cesa bruscamente (ver Figura 5.13).

Se denominan I_d e I_a a la corriente media y a la eficaz de fase respectivamente, cuyas expresiones que las definen son (ver Figura 5.13)

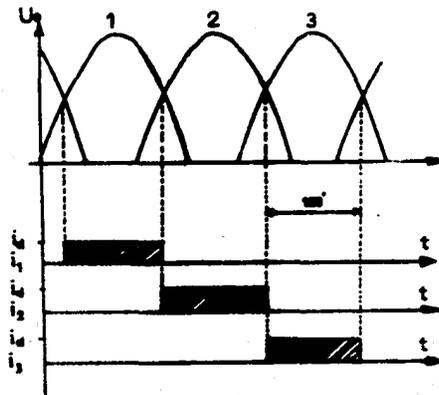


Figura 5.13 Forma de Onda de la Corriente en los Diodos.

$$I_d = 1/T \int_0^{T/3} i_d dt = \frac{i_d}{3} \quad 5.24$$

$$I^2 = 1/T \int_0^{T/3} i_d^2 dt = \frac{i_d^2}{3} \quad 5.25$$

Caída de tensión (ΔU).— La expresión 5.21 define la tensión media -- rectificadora en vacío y bajo carga ésta expresión se modifica de la siguiente forma (ver Figura 5.14):

$$U_d \text{ carga} = \frac{1}{T/3} \int_0^{\Delta T} U_d dt + \frac{1}{T/3} \int_{\Delta T}^{T/3} \mathcal{V}_2 dt \quad 5.26$$

La caída de tensión se deduce de estas dos ecuaciones:

$$\Delta U = U_{d \text{ vacío}} - U_{d \text{ carga}}$$

$$\Delta U = \frac{1}{T/3} \int_0^{\Delta T} (\mathcal{V}_2 - U_d) dt \quad 5.27$$

La integral representa exactamente el área ashuurada que se ha marcada en la Figura 5.14

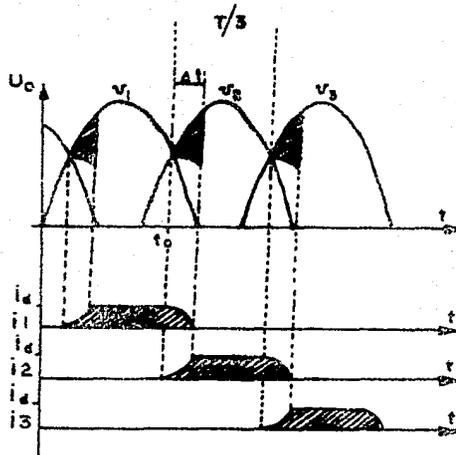


Figura 5.14 Caída de Tensión en los Diodos con Carga.

Dentro del intervalo de conmutación (t_0 a ΔT)

$$U_d = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$\Delta U = \frac{1}{T/3} \int_0^{\Delta T} \frac{v_2 - v_1}{2} dt \quad 5.28$$

restando (5.21) de (5.23) y teniendo en cuenta (5.28)

$$\frac{v_2 - v_1}{2} = L \frac{di_2}{dt}$$

Ya que la diferencia de estas tensiones esta asignada a la misma bobina del transformador.

$$\Delta U = \frac{1}{T/3} \int_0^{\Delta T} L \frac{di_2}{dt} dt = \frac{3L}{T} (i_2(\Delta t) - i_2(0))$$

i_2 para $t = 0$ es igual a cero

i_2 para $t = \Delta t$ es igual i_d

así:

$$\Delta U = \frac{3L i_d}{T} \quad 5.29$$

En caso de un número "m" cualesquiera de fases, la fórmula se generaliza:

$$\Delta U = m \frac{L i_d}{T} = \frac{m}{2\pi} L \omega i_d \quad 5.30$$

Cabe hacer notar, que esta última expresión ha sido obtenida sin ninguna hipótesis sobre la forma de la tensión y sólo es aplicable a las tensiones senoidales, por que se ha supuesto únicamente que la tensión tenía un período igual a $T/3$.

- Duración de la conmutación de los diodos.

de acuerdo a la expresión 5.28 y tomando como nuevo origen el punto de intersección de las dos senoides \mathcal{V}_1 y \mathcal{V}_2 (translación de $\pi/3$) tenemos:

$$\mathcal{V}_1 = V_m \cos (wt + \pi/3)$$

$$\mathcal{V}_2 = V_m \cos (wt - \pi/3)$$

de donde:

$$\begin{aligned} \frac{\mathcal{V}_2 - \mathcal{V}_1}{2} &= \frac{V_m}{2} \cos (wt - \frac{\pi}{3}) - \cos (wt + \frac{\pi}{3}) \\ &= V_m (\text{Sen } wt)(\text{Sen } \pi/3) = \frac{\sqrt{3}}{2} V_m \text{Sen } wt \end{aligned}$$

$$\Delta U = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{V_m}{2} \int \text{Sen } wt \, dt$$

$$= \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} V_m (1 - \text{Cos } wt) = \frac{U_d}{2} (1 - \text{Cos } \mu)$$

donde $wt = \mu$ angulo de conmutación.

Como se observa en la expresión 5.30

$$\Delta U = \frac{3 L w}{2 \pi} I_d$$

siendo:

$$\frac{3 L w I_d}{2 \pi} = \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} V_m (1 - \text{Cos } \mu)$$

y así:

$$\text{Cos } \mu = 1 - \frac{\sqrt{2} L w I_d}{\sqrt{3} V_m} \quad 5.31$$

Pendiente de la corriente de bloqueo y de cebado de los diodos.- Los de la pendiente de la corriente que atraviesa los diodos para cebarlos y bloquearlos, intervienen dentro de su comportamiento dinámico. Para calcularlos, se considera la conmutación binaria entre los diodos 1 y 2, hasta la cual ambos ponen en corto circuito la tensión en tre las fases del montaje polifásico simple, del cual, la expresión, siempre tomando el origen en el punto de entrecruce de las dos senoi des v_1 y v_2 es:

$$v_1 - v_2 = -2 V_m \text{ Sen } wt \text{ Sen } \pi/3$$

$$= -L \left(\frac{di_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right) = -2L \frac{di_1}{dt}$$

para $wt = 0$ el cebado del diodo 2 se produce y se tiene:

$$\left[\frac{di_2}{dt} \right]_{wt=0} = 0 \quad 5.32$$

para $\omega t = \mu$ (ángulo de conmutación) el bloqueo del diodo 1 se produce y se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= \frac{V_m}{L} \text{Sen } \frac{T}{3} \text{Sen } \mu \\ \omega t &= \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2L} V_m \text{Sen } \mu \end{aligned} \quad 5.33$$

Características bajo carga de un rectificador en montaje trifásico simple.- Siendo "R" la resistencia de la fase del secundario y "e" la caída de tensión en el diodo, la tensión en el límite de cargas normales es de la forma:

$$U_{d \text{ carga}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} V - \frac{3}{2\pi} L \omega Id - R Id - e \quad 5.34$$

La característica es pues rectilínea en el límite de una conmutación binaria.

Dimensionamiento del Transformador.- El transformador debe proveer la tensión:

$$V = \frac{\pi\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} U_d \quad 5.35$$

La sección de cobre de los arrollamientos debe ser calculada de manera que soporte el calentamiento debido a la corriente que atraviesa, la intensidad eficaz es:

$$I = \frac{Id}{3}$$

El factor de potencia del secundario se determina por la relación entre la potencia en el rectificador y la potencia trifásica equivalente:

$$\frac{P_c}{P_a} = \frac{U_d I_d}{3 V I}$$

5.36

Sustituyendo:

$$\frac{P_c}{P_a} = \frac{.3}{\pi\sqrt{2}} = 0.675$$

El factor de potencia, en el sentido estricto del término, no corresponde a un defasamiento entre la tensión y la corriente, como corriente senoidal.

5.3.5 Montaje Puente de Graetz.

El montaje de rectificación puente de Graetz, se forma al conectar en serie un montaje en estrella polianódico y montaje en estrella policatódico (ver Figura 5.15).

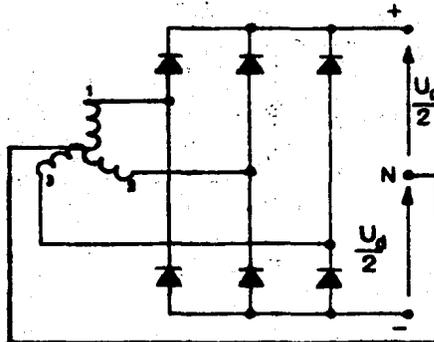


Figura 5.15 Montaje Puente de Graetz.

Cada fase de la red trifásica está conectada a dos diodos en sentidos opuestos. Los tres cátodos están unidos y constituyen el polo positivo, mientras que los tres ánodos constituyen el polo negativo. Si el neutro del sistema está accesible, se puede alimentar sin difi

cultad una red de corriente continua de 3 hilos ($U_d/2$ entre polo y - neutro, U_d entre polos).

Funcionamiento en Vacío.- El polo positivo del rectificador, toma en cada instante el potencial de la fase que tenga el voltaje más elevado. De la misma manera el polo negativo del rectificador toma en cada instante el potencial de la fase que tenga el voltaje menos elevado (ver Figura 5.16).

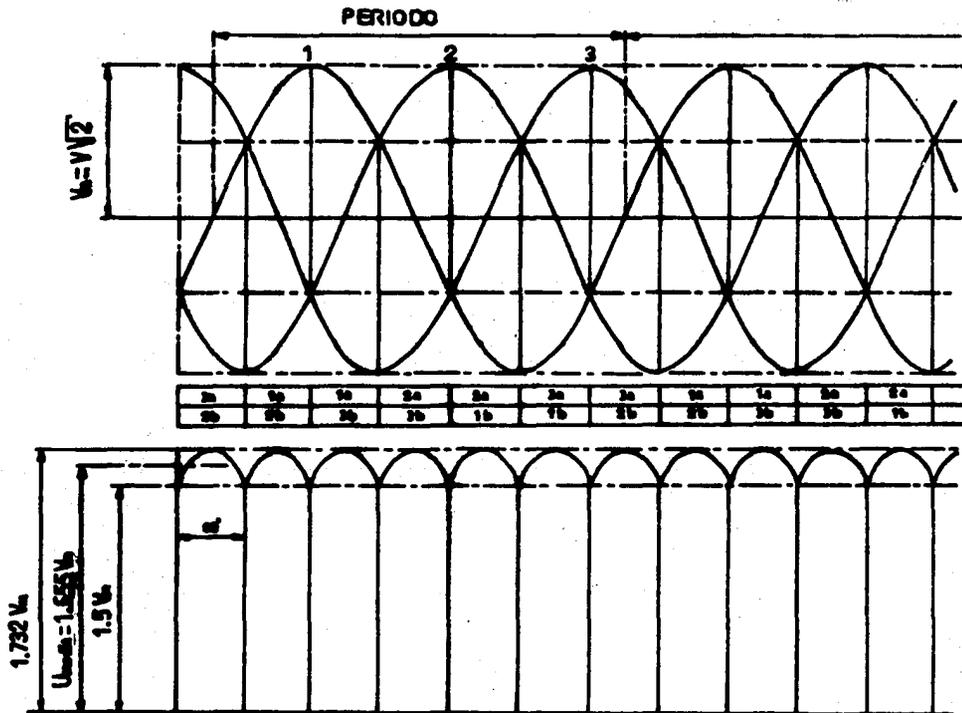


Figura 5.16 Conmutación de los Diodos.

En cualquier instante, la tensión continua instantánea U_0 en la más-grande de las diferencias entre V_1 , V_2 y V_3 .

$$V_1 = V_m \cos wt$$

$$V_2 = V_m \cos \left(wt - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$V_3 = V_m \cos \left(wt - \frac{4\pi}{3} \right)$$

- entre 0 y $\frac{\pi}{3}$ de la Figura 5.16, de las fases V_1 y V_3 se tiene una tensión.

$$U_0 = V_1 - V_3 = V_m \left[\cos wt - \cos \left(wt - \frac{4\pi}{3} \right) \right]$$

$$U_0 = V_m \sqrt{3} \operatorname{Sen} \left(wt - \frac{2\pi}{3} \right) \quad 5.37$$

- entre $\frac{\pi}{3}$ y $\frac{2\pi}{3}$ de las fases V_2 y V_3 se tiene una tensión:

$$U_0 = V_2 - V_3 = V_m \left[\cos \left(wt - \frac{2\pi}{3} \right) - \cos \left(wt - \frac{4\pi}{3} \right) \right]$$

$$U_0 = -V_m \sqrt{3} \operatorname{Sen} (wt - \pi) \quad 5.38$$

Si comparamos (5.37) y (5.38), se comprueba que estas dos tensiones tienen un defasamiento de:

$$\frac{4\pi}{3} - \frac{\pi}{3} = \frac{\pi}{3}$$

La ondulación se reproduce así idénticamente con un período igual a $\frac{\pi}{3}$

De donde el resultado notable es que:

Para la tensión continua, el montaje puente de Graetz, es equivalente a un rectificador hexafásico simple, que proporciona tensiones de amplitud $\sqrt{3}$ veces mayores que el montaje hexafásico y desplazados $-\frac{\pi}{6}$ (ver Figura 5.16).

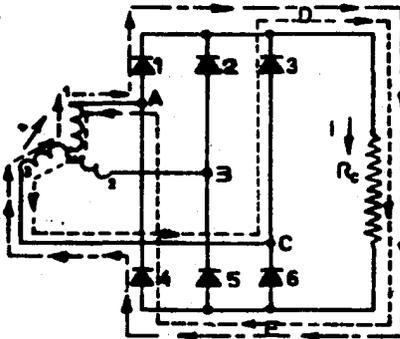


Figura 5.17 Montaje Puente de Graetz.

Amplitud de la ondulación.

$$\text{Valor de pico: } \sqrt{3} V_m \quad 5.39$$

$$\text{Valor mínimo: } \sqrt{3} V_m \text{ Sen} \left(\frac{-2\pi}{3} \right) = \frac{3}{2} V_m \quad 5.40$$

Valor medio de la tensión Rectificada.

$$U_d = \frac{6}{T} \int_{-T/12}^{+T/12} \sqrt{3} V_m \text{ Cos } \omega t \, dt = \frac{6}{T} \frac{\sqrt{3} V_m}{\frac{2\pi}{T}} 2 \text{ Sen } \frac{\pi}{6} \quad 5.41$$

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = \frac{3}{\pi} \frac{\sqrt{3} \cdot 2}{2} V = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{AB}$$

donde:

V_{AB} : Es el voltaje entre fases

Como para la tensión continua, el puente de Graetz, es equivalente a dos rectificadores trifásicos, la tensión del puente de Graetz, es dos veces más grande que en un montaje trifásico simple:

$$U_d = 2 \frac{3 \sqrt{2}}{2 \pi} V_m = \frac{3 \sqrt{2}}{\pi} V_{AB}$$

Tensión eficaz rectificada (U).- Esta es prácticamente igual a U_d .

Tasa de ondulación.- Debido a que la tensión eficaz y la tensión media son prácticamente iguales para este tipo de montaje, la tasa de ondulación se obtiene a partir del desarrollo en serie de Fourier de la tensión rectificada.

La expresión general del desarrollo en serie de Fourier de la tensión rectificada es:

$$u_d = U_d + \dots + \frac{2 U_d}{p^2 k^2 - 1} \cos (PK \omega t) \quad 5.42$$

Para $p = 6$ y considerando las tres primeras armónicas tenemos:

$$u_d = U_d \left(1 + \frac{2}{35} \cos 6 \omega t + \frac{2}{143} \cos 12 \omega t + \frac{2}{305} \cos 18 \omega t \right)$$

La expresión que define la tasa de ondulación en función de las armónicas de la tensión rectificada es:

$$\rho = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_n^2}}{U_d} \quad 5.43$$

La tensión continua de un puente de Graetz, contiene armónicas de todos los rangos múltiplos de 6 veces la frecuencia de la red de tensión alterna que alimenta al rectificador.

Si se toman los tres primeros términos, la tasa de ondulación es:

$$\epsilon = \frac{2}{\sqrt{2}} \sqrt{(0.0285)^2 + (0.00699)^2 + (0.00309)^2}$$

$$\epsilon = \frac{2}{\sqrt{2}} \sqrt{880.6} \times 10^{-3} = 4.21 \times 10^{-3}$$

$$= 4.2\%$$

Tensión inversa.- Cuando los diodos 1 y 6 en un instante determinado conducen (ver Figura 5.17), los puntos A y D están al mismo potencial, los puntos C y E se encuentran a otro mismo potencial; y los diodos 4 y 3 están sometidos a un potencial ($V_D - V_E$), esta tensión, es la tensión entre fases del transformador que para el valor de pico es $\sqrt{2} V_a$

$$V_{RM} = \sqrt{2} V_{AB} = \frac{2}{3} U_d \quad 5.44$$

Funcionamiento bajo carga.- La corriente media que atraviesa un brazo del puente de Graetz es:

$$I_d = \frac{1}{T} \int_0^{T/3} i_d dt = \frac{i_d}{3} \quad 5.45$$

- Corriente eficaz que atraviesa un brazo del puente.

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^{T/3} i^2 dt = \frac{i^2}{3}$$

$$I = \frac{i_d}{\sqrt{3}} = 0.577 i_d \quad 5.46$$

$$e \quad i_{\text{pico}} = i_d$$

- Valor eficaz de la corriente circulante en la fase.

$$I_a^2 = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/3} i_d^2 dt = \frac{2}{3} i_d^2 \quad 5.47$$

$$I_a = \sqrt{\frac{2}{3}} i_d = 0.816 i_d$$

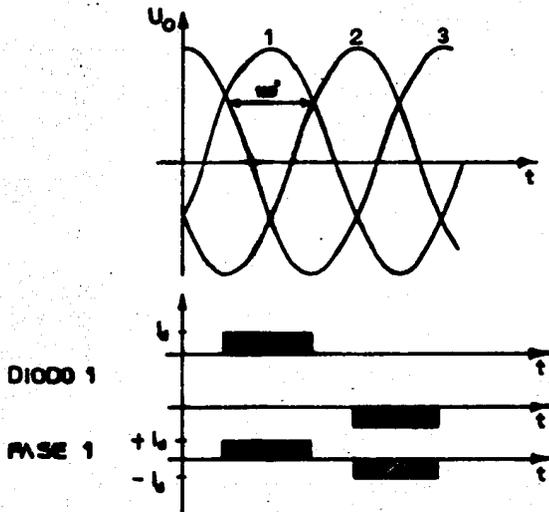


Figura 5.18 Corriente en el Puente con Reactancia de Fase Nula.

- Caída de tensión por avance anódico.

Esta caída, es tres veces mayor que en el montaje trifásico monoal--ternante. La característica bajo carga es pues decreciente (ver Figu--ra 5.19) la fórmula general de la caída de tensión es:

$$\Delta U = m \frac{L i_d}{T} = \frac{6 L i_d}{2\pi/w}$$

$$\Delta U = \frac{3L w i_d}{\pi}$$

5.48

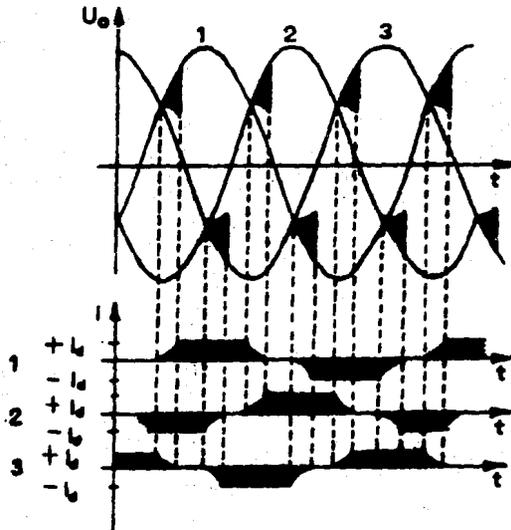


Figura 5.19 Corriente en el Puesto.

- Característica bajo carga del montaje puente de Graetz si llamamos "R" a la resistencia de fase del secundario y si "e" es la caída de tensión en un diodo, la tensión en el límite de la carga normal es de la forma:

$$U_d \text{ carga} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot V_{AB} - \frac{3}{\pi} L w i_d - 2 R i_d - 2 e \quad 5.49$$

Caída de tensión

$$\Delta U_{\text{Media}} = 2 \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/6 + \mu} 1/2 (V_1 - V_2) dt$$

$$\Delta U_{\text{media}} = 2 \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/6 + \mu} 1/2 V_m [\text{Sen } \theta - \text{Sen } (\theta + 2\pi/3)] d\theta$$

$$\Delta U_{\text{Media}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m (1 - \text{Cos } \mu) = \frac{3\sqrt{2}}{2} V_{AB} (1 - \text{Cos } \mu)$$

$$\Delta U_{\text{Media}} = \frac{U_d}{2} (1 - \text{Cos } \mu)$$

5.50

Cálculo de potencias en el puente.

- Potencia activa para una red polifásica equilibrada

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T q i(t) V(t) dt$$

q = número de fase

$V(t)$ = tensión instantánea entre fases

$i(t)$ = corriente instantánea en una fase

a) En corriente continua

$$P = U_d I_d$$

b) En corriente alterna; q = 3

$$P = 1/T \int_0^T 3 i(t) V(t) dt$$

Hipótesis: $V(t) = V_m \text{ Sen } \omega t$, que significa que se considera a la ten
sión perfectamente senoidal y de frecuencia $f = 1/T$

Por lo tanto, no existen armónicas de tensión.

La descomposición en serie de Fourier de $i(t)$ nos da una fundamental y varias armónicas. La integral en un período del producto de dos -- funciones senoidales de frecuencia diferente es nula, por consiguiente, sólo la corriente fundamental interviene dentro del cálculo de -- la potencia activa.

sea

$$P = V_{AB} I_f \sqrt{3} \text{ Cos } \psi \quad 5.51$$

En la expresión anterior que define a la potencia activa, se aprecia que sólo el valor eficaz de la armónica fundamental de la corriente- (I_f) interviene dentro de la potencia activa (ψ : defasamiento entre la tensión simple y la armónica fundamental de la corriente).

$$I_f = \sqrt{3/2} \text{ id } \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2\mu - \text{Sen } 2\mu)^2 + (\text{Cos } 2\mu - 1)^2}{(1 - \text{Cos } \mu)^2}} \quad 5.52$$

- Potencia reactiva

$$Q = V_{AB} I_f \text{ Sen } \psi \quad 5.53$$

De la misma manera que para la potencia activa en la potencia reactiva, sólo interviene el valor eficaz de la armónica fundamental de co
rriente.

- Potencia aparente para una red polifásica equilibrada:

$$S = q V I$$

V: tensión eficaz simple

I: corriente eficaz.

Si $q = 3$

$$s = \sqrt{3} V_{AB} I \quad 5.54$$

La potencia aparente toma en cuenta la armónica fundamental de la corriente y todas sus armónicas.

- Potencia deformante.- Dado que la potencia aparente toma en cuenta todas las armónicas de la corriente, en tanto que, en las potencias activa y reactiva sólo interviene la armónica fundamental de la corriente, se observa que la potencia aparente no es igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la potencia activa y reactiva.

o sea

$$S \neq \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Se define la potencia deformante (D) de la siguiente manera:

$$D = S^2 - (P^2 + Q^2) \quad 5.55$$

La potencia deformante sólo concierne a las armónicas de la corriente.

- Potencia activa del puente

a) Lado continuo.

$$P = U_d I_d$$

b) Lado alterno

Sustituyendo el valor de I_p (expresión 5.52) y tomando en cuenta la expresión 5.41 en la expresión 5.51 se tiene que:

$$P = U_d I_d \frac{1}{4} \sqrt{\frac{(2\mu - \text{Sen } 2\mu)^2 + (\text{Cos } 2\mu - 1)^2}{(1 - \text{Cos } \mu)^2}} \text{Cos } \varphi \quad 5.56$$

Cálculo del coeficiente en función de

μ	b
10	0.999
20	0.996
30	0.992
40	0.986
50	0.979
60	0.969

Se puede decir que en la primera aproximación

$$P = U_d i_d \cos \varphi \quad 5.57$$

- Potencia reactiva en el puente.

$$Q = V_{AB} I_f \sqrt{3} \operatorname{Sen} \varphi$$

Sustituyendo el valor de I_f (expresión 5.52) y tomando en cuenta la expresión 5.41 en la expresión 5.53 se tiene:

$$Q = U_d i_d b \operatorname{Sen} \varphi \quad 5.58$$

Al igual que para la potencia activa, se puede decir que en la primera aproximación.

$$Q = U_d i_d \operatorname{Sen} \varphi \quad 5.59$$

- Potencia aparente en el puente

La expresión que define el valor eficaz de la corriente es:

$$I = \sqrt{2/3} i_d \sqrt{1 - \frac{\operatorname{Sen} (2 + \operatorname{Cos} \mu) - \mu (1 + 2 \operatorname{Cos} \mu)}{(2\pi/3) (\operatorname{Cos} \mu - 1)^2}} \quad 5.60$$

Se tiene que:

$$I = \sqrt{2/3} \text{ id } \sqrt{1 - a} \quad 5.61$$

μ	a	$\sqrt{1 - a}$
10	0.021	0.989
20	0.044	0.978
30	0.067	0.966
40	0.089	0.954
50	0.112	0.942
60	0.135	0.930

Sustituyendo la expresión 5.61 y tomando en cuenta 5.41 en 5.54 se tiene:

$$S = \frac{U}{3} \text{ id } \sqrt{1 - a} \quad 5.62$$

Se puede decir que en primera aproximación

$$S \neq U \text{ id}$$

- Potencia deformante en el puente

Esta potencia sólo está relacionada con las armónicas de la corriente.

Por definición la potencia deformante es de la forma:

$$D = S^2 - (P^2 + Q^2)$$

por lo tanto

$$D = \sqrt{3} U \sqrt{\sum_{j=2}^m i_j^2} \quad 5.63$$

5.4 Esquema General de las Protecciones de los P.R.'s.

5.4.1 Mando y Control de las Subestaciones.

Las subestaciones son diseñadas para que en el caso de falla de una de éstas, las dos adyacentes absorban la carga de la subestación fallada. Sin embargo si una de estas dos mencionadas queda fuera de servicio, tendra que operarse la línea en forma degradada ya que toda una zona de línea queda sin la potencia suficiente para satisfacer la carga.

Esto obliga a poseer dentro de la subestación, una señalización adecuada para identificar rápidamente el tipo de falla y tener una rápida intervención en la misma.

Para lograr esto, los P.R.'s cuenta con un armario de automaticidad que posee relevadores que comandan apertura de interruptores, señalización de fallas y coordinación de protecciones, y contiene además la conmutación entre el mando local y remoto (PCC).

Las fallas se dividen en dos tipos:

- Avería de grupo.- Abarca fallas de equipos propios de la subestación y de la red de alimentación.
- Incidente en línea.- Considera fallas en la red de tracción que provocan la apertura de la subestación.

Los diferentes equipos instalados en un puesto de rectificación, tales como, cuchillas desconectadoras, interruptores, etc., cuentan con placas de identificación tanto para el material, como para la posición en la cual se encuentra el equipo, así como, la dirección que debe seguir cada manija para realizar la operación correspondiente.

También se cuenta con los bloqueos mecánicos necesarios para evitar errores en las maniobras de operación, dichos bloqueos son por ejemplo: evitar un posible cierre de las cuchillas de puesta a tierra --

del transformador cuando las cuchillas de protección del transformador auxiliar se encuentren cerradas.

5.4.2 Avería de Grupo.

Este tipo de señalización se presenta para las siguientes fallas:

a) En corriente alterna

- Sobrecarga y corto circuito en corriente alterna (media tensión) y transformador de potencia.
- Sobrecarga y corto circuito en buses alimentadores de corriente alterna del rectificador de potencia.
- Ausencia de tensión en 23 kV
- Ausencia de tensión en 220 Volts
- Sobre tensiones en corriente alterna
- Temperatura elevada en el transformador de potencia
- Sobre presión en el transformador de potencia
- Falla a tierra de equipos

b) En corriente directa.

- Temperatura elevada en el rectificador
- Fusión de dos diodos
- Retorno de corriente
- Temperatura elevada en el interruptor ultrarápido
- Falla a tierra
- Sobre tensión en la línea de tracción

Los disturbios arriba mencionados se señalizan en el PCC como avería de grupo, sin embargo, en el armario de automatización se identifica la falla en particular. Así mismo cualquiera de estas provoca la - - apertura del Interruptor de Potencia el cual comanda, posteriormente al Interruptor Ultrarápido.

5.4.3 Incidente en Línea.

En esta señalización se involucran las dos siguientes anomalías:

- Sobrecarga en la red de tracción
- Corto circuito en línea
- Accionamiento de los ruptores de emergencia en línea.

Para el caso del corto circuito en línea el P.R posee un equipo detector de la variación de corriente con respecto al tiempo, el cual, al detectar un valor superior a su calibración comanda la apertura -- del Interruptor Ultrarápido y este a su vez despues de dos recierres (al persistir la falla), demanda la apertura de los contactores de - seccionamientos y UR's pertenecientes a la zona donde se detecta la falla.

El accionamiento de ruptores, elimina la alimentación tracción en la zona, con apertura de UR's y CS's, como en el caso anterior, señalizandose en el PCC la causa original para evitar la acción del personal de mantenimiento.

C A P I T U L O 6

C I R C U I T O S D E T R A C C I O N

Introducción.- Por razones de operación y mantenimiento la línea que opera con una tensión rectificada de 750 Vcc, debe contar con los medios de seccionamiento, que permitan aislar los elementos fallados - cuando se presenten contingencias en la línea, de tal manera que - - existan las alternativas suficientes para no interrumpir la continuidad del servicio o en su caso no afectar la totalidad de la línea.

Para satisfacer lo anteriormente expuesto las vías principales se auxilian de interruptores y contactores comandados desde el Puesto Central de Control (PCC) y equipados con elementos para lograr la detección de: sobre corrientes y cortos circuitos.

Las acciones de mantenimiento se ven apoyadas mediante seccionadores que bloquean el cierre de interruptores con el objeto de evitar falsas maniobras; también por su configuración dentro del circuito de tracción, estos equipos permiten aislar tramos de cables y/o aparatos a inspeccionar.

Por otro lado, las vías donde circulan los trenes son los elementos que sirven como medio de transmisión de la energía, hasta el punto donde ésta es requerida por el material rodante (tren).

Luego entonces el circuito de tracción está formado por:

- Vías
- Enlaces de las vías a los puestos de rectificación
- Dispositivos de seccionamiento de las vías
- Accesorios

6.1 Enlace de los Puestos de Rectificación (P.R.'s) con las Vías.

Las dimensiones que tienen los puestos de rectificación, hacen incostruible su construcción a nivel de línea, es decir integrando éste a la obra de la red eléctrica de tracción. Además esta disposición de los P.R.'s causaría problemas de operación cuando se requiere cam --

biar algunos de sus componentes. De lo anterior se concluye que la --
ubicación de un P.R. no siempre es tan cercana a la línea como se de
searía.

La unión de los P.R.'s hacia las vías se realiza a través de conduc-
tores con aislamiento apropiado a la tensión de operación de la lí-
nea.

El número de conductores depende de la carga que maneja el P.R.

En el caso particular del Sistema de Transporte Colectivo (METRO) de
la ciudad de México se emplean conductores monopolares, cuyas carac-
terísticas eléctricas son las siguientes:

Area del Conductor:	240.5 m.m ²
Número de alambres:	91
Aislamiento:	1 kV
Peso nominal:	2.200 kg/km.

Estos valores en combinación con las características mecánicas del -
conductor, lo hacen el adecuado para las necesidades de este tipo de
instalaciones ya que proporcionarán un perfil de tensión que satisfa
ce los rangos de operación de los equipos conectados y la carga que
se le demanda al P.R. Además por sus características mecánicas el --
conductor permite realizar las maniobras necesarias, requerimiento -
básico en la instalación.

En el desarrollo y trayectoria de la línea, existen nichos donde se
instalan seccionadores con los cuales se pueden aislar los conducto-
res en las labores de mantenimiento; ésto permite independizar en ca
so de ser necesario la alimentación de las dos vías.

Por el lado de la subestación el rectificador cuenta, ya que es inter
cambiable, con seccionadores, tanto en el lado positivo como el neg
tivo.

A esta configuración de los P.R.'s se le conoce como "P.R.s en T", -

un diagrama unifilar representativo se muestra en la Figura 6.1.

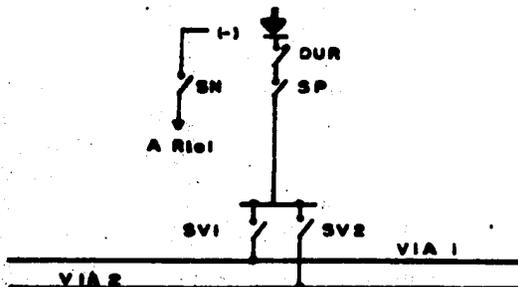


Figura 6.1. Alimentación con P.R.'s en T.

6.2 Vías

Son los elementos que proporcionan las trayectorias o caminos que -- han de seguir los trenes por lo que una buena selección y trazado de estos componentes son indispensables para el óptimo funcionamiento -- del sistema.

6.2.1 Funcionalidad Eléctrica de las Vías.

La Figura 6.2 muestra un tramo de línea donde destacan los siguien-- tes elementos:

- Barra Guía
- Pista de Rodamiento
- Riel.

Barra Guía.- Mecánicamente este dispositivo como su nombre lo indica sirve para guiar el recorrido y proporcionar estabilidad dinámica al material rodante.

Son fabricados con acero tipo A-36 (de calidad soldable), deben sa-- tisfacer lo establecido en la norma mexicana NOM-B-254, en su última revisión.

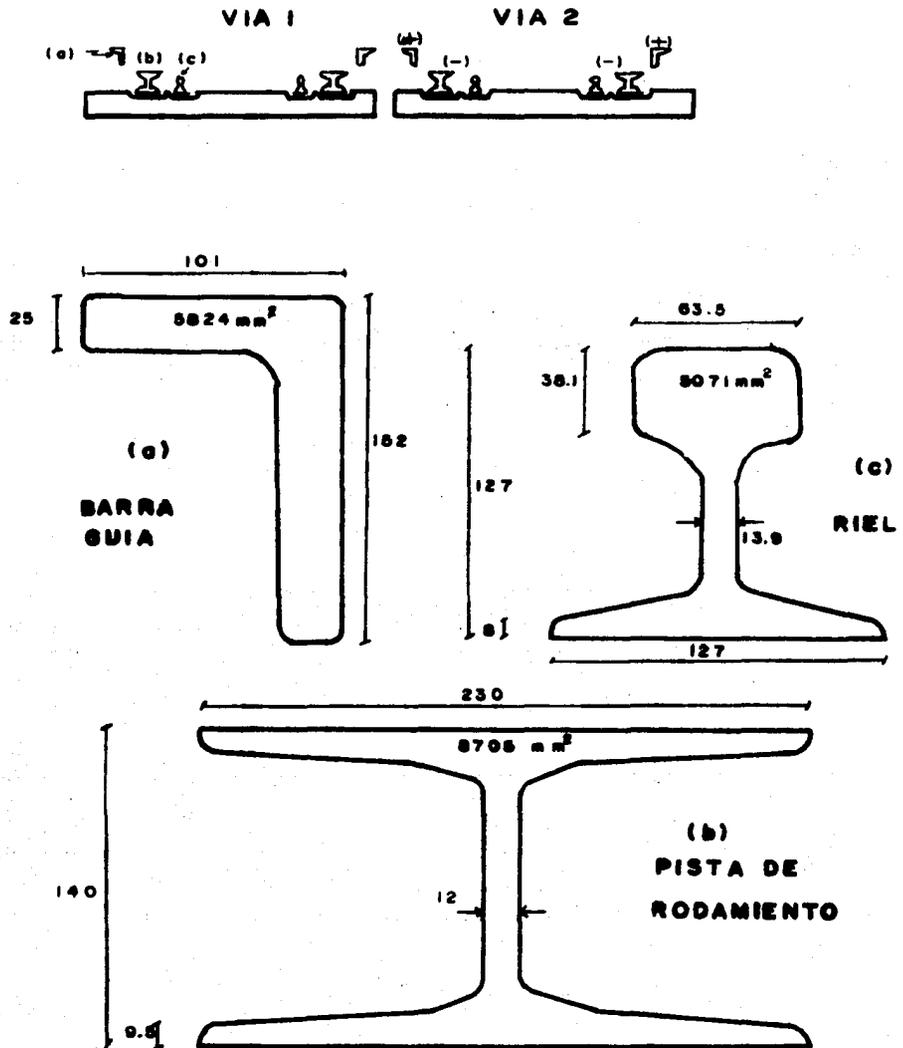


Figura 6.2 Vías

Para el control de velocidad, tipo de marcha y nivel de aceleración del tren, la barra guía es utilizada para soportar el tapete de pilotaje automático el cual maneja en alta frecuencia (137 kHz) las instrucciones que transmite el control automático de los motores.

Desde el punto de vista eléctrico y de tracción la barra guía representa el alimentador positivo a las escobillas del tren y como tal para su selección se calcula la capacidad de conducción (Ampacidad) y la influencia que tiene en la caída de tensión debido a su resistencia propia.

Como se puede apreciar en la Figura 6.2 por vía existen dos barras guías, las cuales, para las escobillas del tren representan el mismo punto, es decir, eléctricamente están en paralelo.

Pinta de Rodamiento.- Este es el elemento de la vía que soporta todo el peso del tren, permite el deslizamiento de los neumáticos y absorbe las tracciones mecánicas.

Son fabricados también en acero A-36 y deben satisfacer lo establecido en la norma NOM-B-254.

En la Figura 6.2.b se puede observar las dimensiones de la pista de rodamiento.

La pista comparte con el riel todas las funciones eléctricas, tanto de retorno de la corriente de tracción como de señalización de la posición de los trenes.

Riel Metálico.- Sirve como soporte auxiliar del tren en caso de falla del sistema neumático así como de guía en los cambios de vía. Para los móviles utilizados en mantenimiento de la línea es el soporte principal.

Los rieles son de acero no tratado y de calidad ordinaria (80 ASCE), su fabricación se rige bajo la norma ASTM-A-I y las dimensiones son las mostradas en la Figura 6.2.c.

Como se mencionó comparte con la pista de rodamiento las funciones eléctricas, tanto para señalización como para el circuito de la corriente de tracción.

Una necesidad para tracción es mantener la continuidad de la línea - desde las escobillas negativas del tren hasta el cátodo del rectificador. Para la señalización se requiere dividir la vía en porciones - que permitan distinguir la ubicación de un tren e inhibir la posibilidad de impacto entre trenes así como la detección de ruptura de algún riel o rieles.

Para lograr lo descrito se emplea un transformador conocido con el - nombre de junta inductiva, ver Figura 6.3. este arreglo permite el - paso de corriente continua del emboinado receptor, el emisor genera una señal polarizada que viaja por un lado a lo largo de la vía - - (riel y pista) hasta llegar al receptor de la próxima junta aislante que consiste de un relevador, retornando el emisor por el otro lado de la vía. Cuando se interrumpe la energización del relevador del receptor, todo el circuito conocido como Circuito de vía (Cdv), se marca, ocupado, a través de un semáforo e impidiendo mediante la interfase - con mando centralizado que el tren aborde el CdV marcado como ocupa - do.

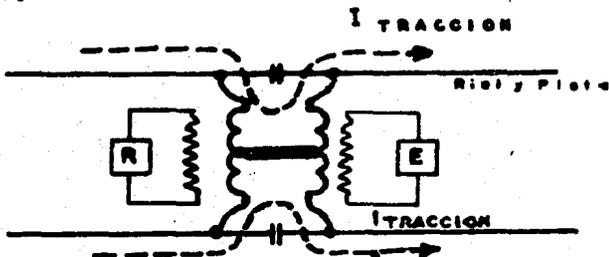
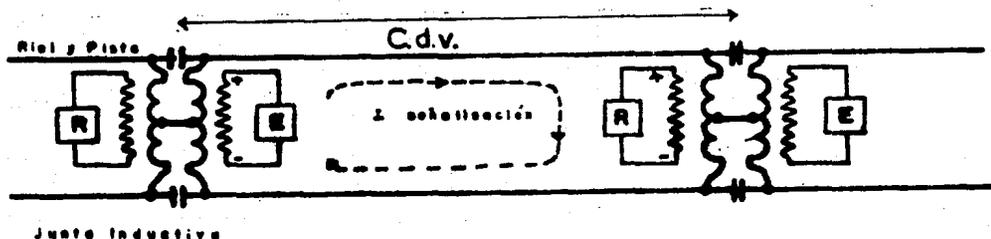


Figura 6.3. Circuito de Vía.

En la misma forma que el circuito positivo, los rieles laterales de una misma vía representan el mismo punto para el tren, es decir están en paralelo. Desde el punto de vista, vía doble, el paralelo entre las vías, se localiza en los puntos de inyección de los P.R.'s.

6.2.2 Resistencia Kilométrica de las Vías.

En el capítulo de cálculo de implantación, de P.R.'s, se puede apreciar que después del criterio de potencia, la caída de tensión es el parámetro que más influye en la selección.

La caída está en función del cociente v/k_a que se conoce como pendiente de los P.R.'s y de la resistencia de los rieles.

Esta resistencia, se puede calcular en base a la experiencia de los constructores de las líneas, lo cual se hace aplicando un factor al peso del material. En este trabajo la resistencia reportada son los valores obtenidos en las pruebas realizadas a tres muestras de acero nacional (ASTM-A-36) a diferentes temperaturas, en los laboratorios del S.T.C.

Datos: Muestras de longitud 285 mm y Area. de 40 mm² a una temperatura de 60°C, se tiene una resistividad media de:

$$\rho = 0.192 \text{ m}\Omega / \text{mm}$$

De acuerdo a las secciones transversales de cada elemento de vía se tiene:

Area mm ²	Barra Guía	Pista	Riel
	5824	8705	5071
Resistencia lado de vía-R' mΩ/km	32.97	11.02	18.93

De acuerdo a la configuración por vía

$$R'' = R(+) + R(-)$$

donde:

$$R(+) = R'(+) // R' (+) = R' (+) / 2$$

$$R(-) = \frac{R'_{\text{pista}} // R'_{\text{riel}}}{2}$$

Así

$$\begin{aligned} R'' &= \frac{R'(+) }{2} + \frac{R'_{\text{pista}} // R'_{\text{riel}}}{2} \\ &= \frac{R'(+) }{2} + \frac{R'_{\text{pista}} // R'_{\text{riel}}}{2} \end{aligned} \quad 6.1$$

por lo que, la resistencia por kilómetro de vía doble, "R" es:

$$R = 1.15 \times \sqrt[4]{R'(+) + \frac{R'_{\text{pista}} \cdot R'_{\text{riel}}}{R'_{\text{pista}} + R'_{\text{riel}}}} \text{ m}\Omega/\text{km} \quad 6.2$$

donde el factor 1.15 contempla las pérdidas del material por fricción, variaciones de temperatura, calidad del material y la resistencia de las uniones con los cables, etc.

Empleado el tipo de riel de la prueba en la ecuación 6.2 se tiene:

$$R = 11.515 \text{ m}\Omega/\text{km} \text{ vía doble}$$

6.3 Cupones de Protección y Cortes de las Barras.

6.3.1 Cupones de Protección (C.P's),

Por cuestiones de flexibilidad en la operación y mantenimiento se tiene la necesidad de establecer zonas o secciones a través de los cupones de protección (C.P's), el cual tiene como funciones:

- Garantizar la continuidad mecánica de la barra guía en cualquier situación.
- Garantizar en condiciones normales que las escotillas del tren se encuentren con tensión.

- Garantizar en situaciones anormales en que un tramo esté aislado, no exista puenteo eléctrico entre zonas o secciones a través de los trenes bajo ninguna circunstancia.

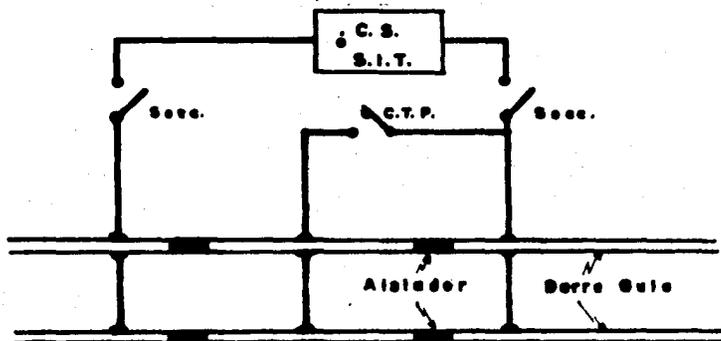


Figura 6.4. Cúpón de Protección.

6.3.2 Cortes en las Barras.

Existen otros tipos de seccionamiento de la barra guía mucho más sencillos y que se emplean en vías secundarias generalmente. Estos cortes se realizan donde el tren viaja a baja velocidad y son:

- Cortes puenteados
- Cortes no puenteados

Como su nombre lo indica permitirán o no el puenteo entre dos tramos de barra guía por medio de las escobillas del tren.

El primero es utilizado en los casos de posiciones de estacionamiento, entradas a peines de talleres y naves de depósito. El no puenteados se emplea en lugares de acceso al personal de mantenimiento del tren, como es el caso de las fosas de visita.

L: Distancia entre escobillas (metros)

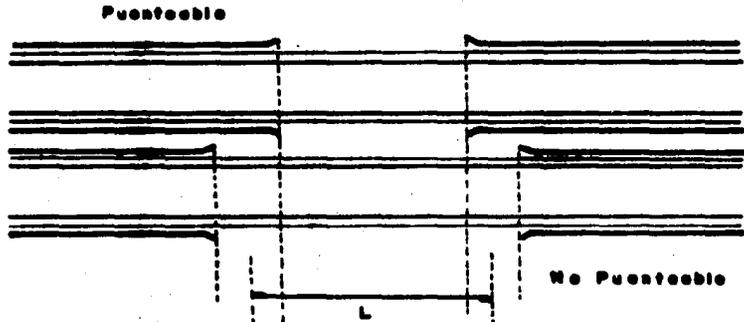


Figura 6.5 Cortes.

6.4 Seccionadores de Aislamiento con Telecomando (SIT's)

De acuerdo con las necesidades de operación, la línea se divide en -- secciones, divididas principalmente por las estaciones terminales y -- las estaciones de correspondencia con otras líneas, de tal forma que sea posible establecer servicios provisionales donde se presenten fa -- llas que ameriten un largo tiempo de restablecimiento (ver Figura -- 6.6.)

Los seccionadores de aislamiento con telecomando (SIT's) apoyados de los cupones de protección (C P's) tienen como finalidad establecer -- la continuidad eléctrica entre las dos secciones adyacentes en condi -- ciones de operación normales o garantizar un aislamiento eléctrico -- que sea requerido de un servicio provisional el cual se comandará -- desde el P.C.C.

En el SIT no necesariamente la apertura debe hacerse con carga pero -- ésta debe operar satisfactoriamente con las vías energizadas, es de -- cir bajo tensión. Son montados en serie al SIT unos seccionadores ma

nuales a razón de un seccionador por vía y por sección, los cuales tienen la finalidad de aislar el SIT a fin de realizar trabajos de mantenimiento sobre el mismo.



Figura 6.6. Servicio Provisional con S.I.T.

6.5 Contactores de Seccionamiento (C.S.'s)

Para limitar la influencia de una falla sobre la totalidad de los P.R.'s y la línea, ésta se divide en zonas que están en función de la corriente de corto circuito, del número de trenes que pueden circular dentro de ella y de las condiciones de peración, ya que en caso de una emergencia el personal que opera la línea o los usuarios pueden accionar cualquiera de los ruptores que indican al regulador de la línea (en el T.C.O de P.C.C.) que desenergize la zona.

Los paratos conocidos como contactores de seccionamiento (C.S.'s) son los encargados de delimitar estas zonas y actúan en coordinación con los interruptores ultra-rápidos de los P.R.'s y de la misma forma que los SIT's deben garantizar la continuidad eléctrica de las vías en operación normal e impedir en caso de falla que exista tensión en la zona. Los C.S.'s son aparatos que operan con carga y comandan sus C.T.P's eléctricamente, dado que por sus dimensiones el C.S. es ubicado dentro del P.R.

La configuración utilizada en el Metro de México, se puede apreciar en la Figura 6.7 y los P.R.'s que tienen C.S. son conocidos como P.R. en "S", los otros como P.R. en "T".

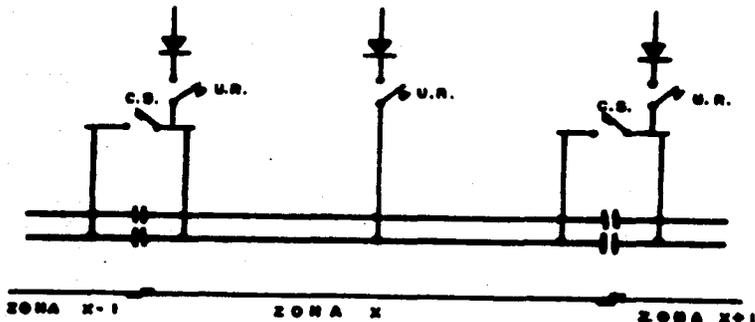


Figura 6.7 Configuración de una Zona.

6.6 Otros Accesorios Importantes

Estos accesorios tienen como finalidad alimentar a través de las -- vías principales todos aquellos servicios ajenos a la circulación -- normal de los trenes (con carga) y son los que a continuación se describen.

- Contactor de Terminal
- Interruptor de vías secundarias
- Interruptor de vía de enlace
- Interruptor de fosa de visita
- Interruptor de talleres

Estos equipos constan de un relevador de sobre corriente que permite al interruptor abrir en caso de existir alguna falla, son de operación remota desde el P.C.C. o bien de mando local y el umbral de operación es de 3000 Amperes. Además son puestos en serie a través de -- un seccionador inversor bipolar "SIB" que en caso de ser necesario el reemplazarlo o darle mantenimiento al interruptor el "SIB" lo puen--

tea.

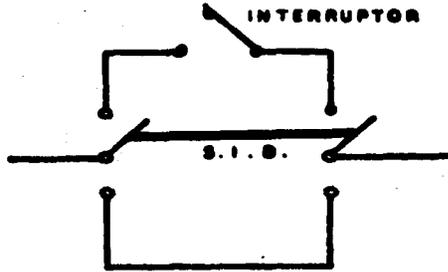


Figura 6.8 Seccionador Inversor Bipolar.

6.7 Consideraciones para el Dimensionamiento de los Equipos.

Así como la distribución de los P.R.'s es determinada a través de un intervalo mínimo teórico entre trenes, una evolución de la línea según su polígono de carga y una capacidad de sobre carga de acuerdo a la duración de los picos de demanda máxima, también es necesario que los equipos de tracción de las vías principales deban soportar las cargas ligadas a la capacidad máxima de la línea y de los P.R.'s.

Por otro lado también es necesario mantener una homogeneidad entre los calibres de los equipos para permitir el intercambio de éstos en las diferentes líneas y las de reserva. Así aunque varíe el polígono de carga de una línea a otra el considerado para el diseño de los -- equipos es el que se muestra en la Figura 6.8

Así los ciclos de carga a los que están sometidos los equipos son -- los mostrados en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Carga en Amperes de las Principales Instalaciones de Tracción en Línea.

INSTALACION	CICLO	HORAS DEL DIA (LABORABLE)							
		5-7	7-10	10-12	12-2	2-5	5-8	1-3	
Arterias de alimentacion y retorno de un P.R. en T.	N	3000	5700	3000	5700	3000	1000	0	
	E	5700	8500	5700	8500	5700	2000	0	
Arteria de alimentacion de una via para un P.R. en T.	N	2300	3400	2300	3400	2300	1100	0	
	E	3400	5100	3400	5100	3400	1700	0	
Arteria de alimentacion de una via para un P.R. en S	N	1100	1700	1100	1700	1100	600	0	
	E	2300	3400	2300	3400	2300	1100	0	
C.S. y S.L.T.	N	2000	3000	2000	3000	2000	1000	0	
	E	4000	6000	4000	6000	4000	2000	0	
Sec. de cables de P.R. en T.	N	2300	3400	2300	3400	2300	1100	0	
	E	3400	5100	3400	5100	3400	1700	0	
Sec. de cables de P.R. en S o en SIT	N	1100	1700	1100	1700	1100	600	0	
	E	2300	3400	2300	3400	2300	1100	0	

N- NORMAL

E-EMERGENTE.

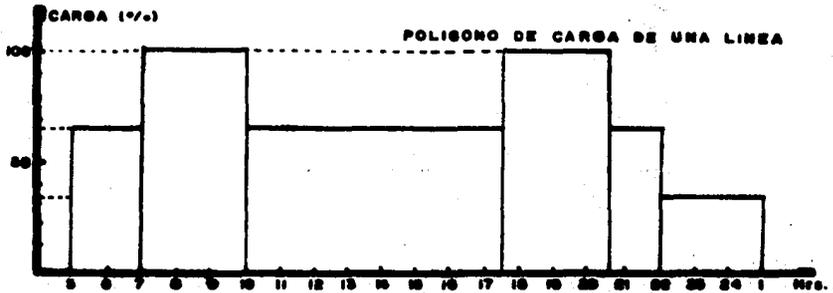


Figura 6.8 Poligono de Carga de una Línea.

7.1 Generalidades Sobre los Métodos de Cálculo.

La implantación de puestos de rectificación (PR's), en un sentido estricto, consiste en el total dimensionamiento de estos, existiendo para ello varias etapas.

7.1.1 Objetivo de los Métodos de Cálculo.

Como todas las partes integrantes de un proyecto global, el proyecto de electrificación sigue las siguientes etapas de desarrollo, tal que:

- Anteproyecto inicial
- Anteproyecto detallado
- Proyecto definitivo

Para cada una de estas etapas se tiene un nivel de definición y de precisión en los cálculos, siendo este mayor a medida que el proyecto avanza.

Tomando en cuenta lo anterior, la información requerida, la metodología de cálculo y los resultados obtenidos varían para cada etapa del proyecto.

Así, para la etapa de anteproyecto inicial, se requiere conocer únicamente, las características generales de operación de la línea. Debido a que esta es la primera etapa del proyecto, se prefieren utilizar métodos de cálculo que permitan verificar una implantación anteriormente definida, estableciendo para ello métodos de cálculo simplificados que respeten las limitantes eléctricas de la línea. Estos métodos se basan en información estadística obtenida de la observación de proyectos similares al que se realiza.

El objetivo de esta etapa del proyecto es obtener una primera aproximación de la distancia interpostal, así como el número mínimo de PR's del proyecto de electrificación.

A nivel de anteproyecto detallado se requiere de información concreta sobre la línea y del material rodante. Dentro de esta información, la de mayor importancia es el trazo y perfil de la línea, el número de cambios de vía y el número de estaciones.

C A P I T U L O 7

I M P L A N T A C I O N D E P R ' s

El trazo y perfil de la línea son de suma importancia tomando en cuenta que a través de ellos se obtiene la marcha tipo de la línea, la cual permite obtener los consumos eléctricos de la misma; estos consumos son la base para el cálculo en esta etapa del proyecto.

En esta etapa se realiza prácticamente el desarrollo del proyecto de electrificación de la línea, debido a lo cual en esta etapa se determinan todas las características específicas de todos los equipos; cabe decir que la complejidad para desarrollar el anteproyecto detallado es mucho mayor que para el anteproyecto inicial.

Al proyecto definitivo corresponde la realización de las modificaciones necesarias, debidas a imprevistos como pueden ser: falta de algún equipo, siendo necesario cambiarlo por otro; cambio de posición de algún o algunos PR's, etc. Dentro de estas modificaciones deben respetarse los rangos de holgura del equipo que conforma la línea.

Por razones de sencillez y de exactitud, en este trabajo se expone la metodología de cálculo a nivel de anteproyecto inicial.

7.1.2 Hipótesis de Cálculo.

Debido a la complejidad del proyecto de electrificación de una línea de transporte eléctrico es necesario considerar algunos aspectos de operación que faciliten y simplifiquen los cálculos del anteproyecto inicial, sin influir considerablemente en la exactitud de los resultados obtenidos. Existen cuatro hipótesis básicas de las cuales se pueden partir para iniciar el proyecto de electrificación.

- Potencia constante .- Se adopta esta hipótesis cuando el material rodante no se encuentra aún completamente definido, debiendo satisfacer un programa de operación dado, con tonelaje y velocidad del material rodante previamente definidos.

- Tensión constante en el punto de captación del tren.- Este criterio se adopta a menudo en tramos de líneas mal equipados donde se requiere que la caída de tensión no sobrepase un valor preestablecido.

- Establecimiento de la característica esfuerzo-velocidad.- Este criterio se basa en fijar la característica esfuerzo-velocidad suponiendo

do que las necesidades de operación no son las mejores, considerando los consumos máximos alcanzados por el material rodante.

- Intensidad constante.- Este criterio es el más comunmente usado debido a que se basa en las necesidades de operación del material rodante, dando como resultado valores no muy lejanos de los óptimos y permitiendo un sencillo método de análisis.

7.2 Definiciones Relativas al Consumo de Tracción.

Estas permiten fijar las bases de evaluación en los consumos de tracción, sirven para fijar y desarrollar métodos, se obtienen de la observación de líneas similares a la que se desea electrificar y a partir de ellas se obtienen los consumos esperados para la nueva línea, los cuales son usados para desarrollar el anteproyecto inicial.

7.2.1 Características de Servicio.

- Longitud de la línea (L).-Es la longitud de la vía 1 entre los ejes de terminal, suponiendo que es la misma en la vía 2, lo cual es generalmente cierto."L" no comprende las distancias que, en terminales, separan a los andenes del territorio de maniobras; es por tanto la -- longitud usada por los viajeros.

- Duración de un viaje ida-vuelta (Dar).-Es la suma de los tiempos empleados por un tren para realizar un viaje de ida y vuelta a lo largo de la línea.

- Velocidad comercial (Vc).-Necesariamente la velocidad comercial está dada por la relación:

$$Vc = \frac{2L}{Dar} \qquad 7.1$$

esta es la velocidad media con viajeros, considerando tiempos de parada.

- Horario, intervalo y capacidad de oferta.-Se denomina (Dp) a la du-

ración del período durante el cual se observa el funcionamiento de la línea para determinar sus características y consumos. Si (D_p) es pequeña (del orden de una hora) el servicio ofrecido se caracteriza por un intervalo de tiempo (I) que separa a dos trenes sucesivos, sensiblemente constante a lo largo de toda la línea y durante el período (D_p), este es el intervalo de tráfico. De esta forma se tienen valores estables (en general tres) según las horas del día; para un día laborable: horas pico, horas cresta y horas cresta de noche.

- Número de viajes efectuados (N_t).- Son los viajes que realiza el conjunto de trenes durante el período (D_p); es entonces:

$$N_t = \frac{D_p}{I} \quad 7.2$$

en efecto, si el intervalo de tráfico es el mismo en todo punto de la línea, durante el período $D_p=I$ cada tren toma el lugar del tren precedente y recorre así la distancia que los separaba, la suma de estas distancias recorridas será igual a la longitud de un viaje y se tiene -- $N_t = 1$, como se muestra en la Figura 7.1.

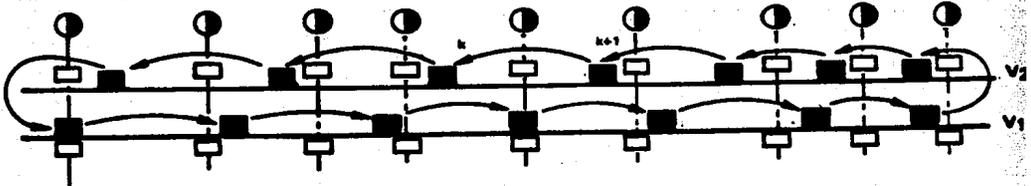


Figura 7.1 Intervalo y Número de Viajes.

En realidad (I) es raramente el mismo en todo punto de la línea, además de que varía en el curso del tiempo. En este caso no es preferible definir inicialmente el número de viajes (N_t), sino el intervalo medio de tráfico.

$$I_{medio} = \frac{D_p}{N_t} \quad 7.3$$

Cuando D_p es una hora, N_t representa la frecuencia definida en viajes/hora: $3600/I$, estando expresado I en segundos.

Cuando D_p es grande (un día, un mes, un año) el intervalo medio no tiene sentido y es preferible hablar del número de kilómetros-tren (Kt) o kilómetros-vehículo (Kv).

$$Kt = 2L Nt \quad 7.4$$

$$Kv = 2L Nv Nt \quad 7.5$$

Nv representa el número de vehículos por tren (número medio si la composición de los trenes es variable).

- Capacidad de transporte (Ct).-Es el número de plazas ofrecidas por hora y por sentido o dirección.

$$Ct = \frac{3\ 600\ Npo}{I} \quad 7.6$$

Npo es el número de plazas ofrecidas por tren

El número medio de trenes en línea (N_1) se define como:

$$N_1 = \frac{D_{ar}}{I} \quad 7.7$$

así la distancia media entre trenes se define como:

$$L_t = \frac{2L}{N_1} = V_c I \quad 7.8$$

7.2.2 Definiciones de Consumo.

El consumo de energía se calcula a nivel de puestos de rectificación o a nivel de trenes. El consumo de la línea es la suma de los consumos de los trenes en línea y en terminales así como las pérdidas por efecto Joule en los circuitos de distribución.

Las mediciones estadísticas del consumo son generalmente efectuadas a nivel de puestos de rectificación y los consumos específicos son determinados a partir de C_1 . En cada caso en que se definen valores específicos es conveniente precisar las condiciones de cálculo o de medida.

- Consumo por viaje (CSt).

$$CSt = \frac{C_1}{Nt}$$

7.9

- Consumo medio por kilómetro de un tren (CSkt)

$$CSkt = \frac{CSt}{2L} = \frac{C_1}{2L Nt}$$

7.10

A partir de CSkt puede definirse igualmente el consumo por kilómetro-vehículo (CSkv), el consumo por tonelada-kilómetro (CStk), precisando las condiciones de carga de los vehículos para el cálculo.

7.2.3 Características Dimensionales.

El dimensionamiento de las instalaciones fijas de tracción se hace en función de la potencia, la cual se define en función del tiempo, por su valor medio, su valor eficaz y su valor máximo. Se prefiere frecuentemente referir a la corriente, en lugar de la potencia. El período D_p sobre el cual se calculan los valores medio y eficaz es variable.

Para un tren se toma en general $D_p = D_{ar}$, sin embargo, se puede tomar un límite en la duración, correspondiente al tiempo de trayectoria de un tren en una parte dada de la línea (entre dos puestos de rectificación, por ejemplo).

Para un equipo fijo (puesto de rectificación, aparato, etc.) se toma $D_p = I$ cuando I se supone constante -en caso de cálculo-, ó D_p igual a 1/2 hora, una hora o dos horas cuando I varía ligeramente -en caso de mediciones estadísticas-.

Cuando I es constante, las corrientes circulantes en los equipos fijos obedecen a una función periódica, donde el período es I . Para calcular los valores medio y eficaz durante un intervalo largo (D_p de dos horas, por ejemplo) es suficiente realizar los cálculos para un período I .

- Características dimensionales en las escobillas del tren.- Las Figuras 7.2a y 7.2b muestran la evolución, en función del tiempo, de la corriente $I_t(t)$ demandada por las escobillas del tren, de su velocidad $v_t(t)$ y de la energía consumida a partir del arranque.

La Figura 7.2a corresponde a un material rodante convencional (reostático). La Figura 7.2b corresponde a un material equipado con un Hacheur (cortador de corriente) que permite la regeneración de parte de la energía de frenado.

Es obvio que la corriente está lejos de ser constante, la fase de --- tracción representa del 25% al 30% del tiempo de recorrido, por lo --- tanto es necesario definir una intensidad media \bar{I}_t , así como la intensidad media cuadrática \tilde{I}_t .

$$\bar{I}_t = \frac{1}{D_p} \int_0^{D_p} I_t(t) dt \quad 7.11$$

$$\tilde{I}_t = \sqrt{\frac{1}{D_p} \int_0^{D_p} I_t^2(t) dt} \quad 7.12$$

De esta forma se puede definir el factor de forma de la señal de corriente como:

$$f = \frac{\tilde{I}_t}{\bar{I}_t} \quad 7.13$$

En general (f) tiene un valor proximo a dos para material rodante convencional o sin frenado regenerativo. En material con regeneración este valor es del orden de cuatro a cinco. El factor de forma tiene --- gran importancia en el dimensionamiento de las instalaciones, sobre --- todo en aparatos de vía en línea (conexiones seccionamientos, etc.).

El factor de forma se determina en forma aproximada a partir de \bar{I}_t , $I_{t \max}$ y de la tasa de regeneración (ξ) mediante la relación θ , la cual burdamente representa la relación del tiempo de la fase de trac-

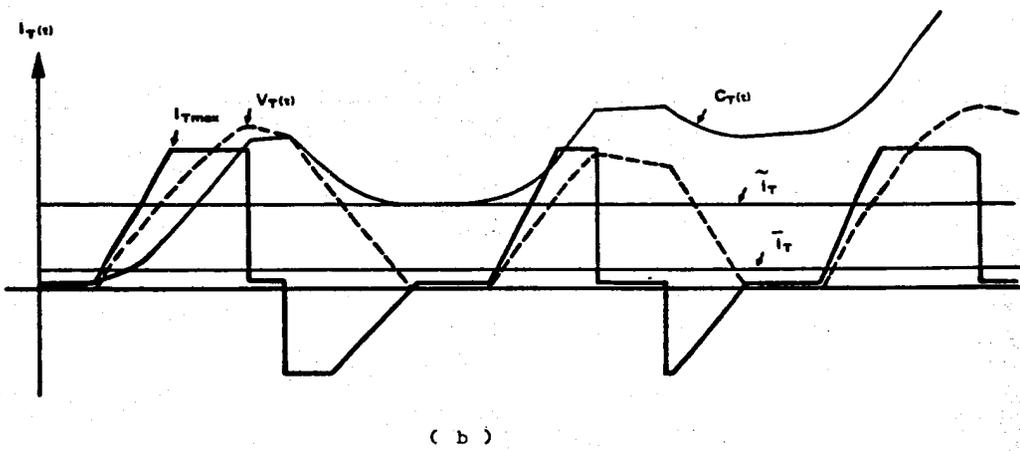
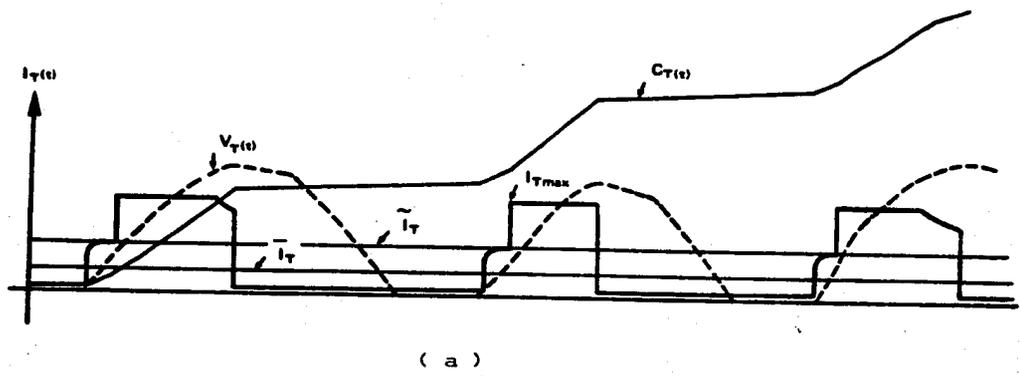


Figura 7.2 Corriente Demandada por las Escobillas del Tren.

ción al tiempo de recorrido total de una interestación.

$$\theta = \frac{I_t \text{ tracción}}{I_t \text{ max}} \quad 7.14$$

$$f = \sqrt{\frac{1+\zeta^2}{(1-\zeta)\theta}} \quad 7.15$$

La introducción de la regeneración mejora del 50% (para $\zeta=0.30$) al 100% (para $\zeta=0.45$) el factor de forma.

Por otro lado existe una forma simple de calcular la intensidad media I_t a partir de resultados estadísticos tales como el consumo de un tren por kilómetro y su velocidad comercial.

$$I_t = \frac{CS_{kt} \cdot v_c}{U_t}$$

U_t representa la tensión en las escobillas; en principio $U_t = U_n$

-Características dimensionales a nivel de instalaciones fijas.- La potencia total - media de la línea se define como:

$$P_1 = \frac{C_1}{D_p} \quad 7.16$$

Substituyendo C_1 de la expresión 7.9

$$P_1 = CST \frac{Nt}{D_p} \quad 7.17$$

Ahora bien

$$Nt = \frac{D_p}{I}$$

De la expresión 7.2, por lo que:

$$P_1 = \frac{CSt}{I} \quad 7.18$$

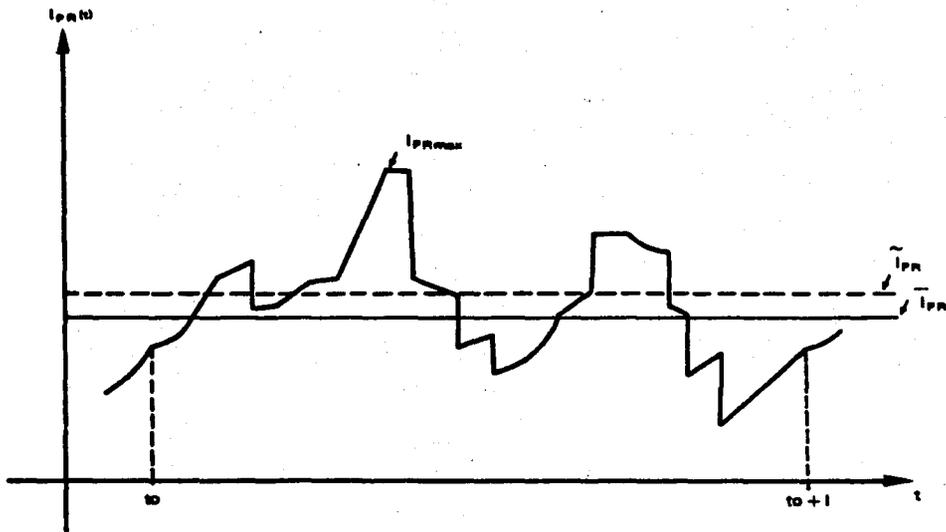


Figura 7.3 Corriente Entregada por los PR's

Aplicando la expresión 7.7 se obtiene:

$$P_1 = N_1 P_t \quad 7.19$$

con

$$P_t = \frac{CSt}{D_{ar}} \quad 7.20$$

P_t representa la potencia media de un tren en un viaje, como $CSt = CS_{kt} \cdot 2L$ se obtiene la expresión

$$P_t = CS_{kt} V_c \quad 7.21$$

Es importante subrayar que estas relaciones, en particular la potencia media de la línea, no crece necesariamente cuando el número de trenes en línea (N_1) aumenta.

A velocidad comercial constante, el consumo específico CS_{kt} no varía y P_1 es directamente proporcional a N_1 (P_t constante).

A intervalo de tráfico constante (capacidad de transporte constante) un paro en la marcha de los trenes provoca la caída de CS_{kt} a CS_t , pero como se observa en la expresión 7.7, un aumento de N_1 da como resultado una disminución en P_1 .

La potencia P_1 es entregada por los PR's bajo la forma de corriente $I_{pr}(t)$, cuya función del tiempo se observa en la Figura 7.3.

Como en el caso de los trenes, se define también para los PR's una intensidad media, una intensidad eficaz y un factor de forma

$$\bar{I}_{pr}(t) = \frac{1}{I} \int_{t_0}^{t_0+I} I_{pr}(t) dt \quad 7.22$$

$$\tilde{I}_{pr}(t) = \sqrt{\frac{1}{I} \int_{t_0}^{t_0+I} I_{pr}^2(t) dt} \quad 7.23$$

$$F = \frac{\tilde{I}_{pr}}{\bar{I}_{pr}} \quad 7.24$$

La intensidad eficaz es la base de la cual se parte para dimensionar un PR a carga continua.

Si se tiene un rectificador de potencia nominal $P_n = U_n I_n$ de tal suerte que $I_n = \tilde{I}_{pr}$, la potencia realmente entregada P_{util} es:

$$P_{util} = \tilde{I}_{pr} (U_n - k (\tilde{I}_{pr} - \bar{I}_{pr})) \quad 7.25$$

k representa la resistencia interna equivalente (pendiente) del rectificador. Si se desprecia el término $k (\bar{I}_{pr} - \bar{I}_{pr})$ de la expresión 7.25 y se substituye la expresión 7.24 en ésta, se tiene:

$$P_{util} = Un \frac{\bar{I}_{pr}}{F} = \frac{P_n}{F} \quad 7.26$$

La potencia útil es también la potencia media \bar{P}_{pr} despachada por el PR y la potencia $P_{ap} = F \bar{P}_{pr}$ se denomina potencia aparente o potencia de dimensionamiento. Al término $1/F$ se le conoce como factor de potencia.

Es importante no confundir la potencia aparente antes definida con la potencia aparente del transformador que alimenta el rectificador. Esta última potencia es calculada a partir de P_n teniendo en cuenta las corrientes armónicas en los devanados y el factor de potencia, $(\cos \phi)$

- Levantamientos estadísticos y puntuales de consumo de energía. Los levantamientos periódicos del consumo de energía se efectúan, en general, a nivel de los PR's con periodicidad grande (del orden de meses-facturación). Asociados a las estadísticas de operación se obtienen los consumos específicos (CSkv, por ejemplo) de cada línea. Esto permite observar si las previsiones hechas han sido respetadas, más no da una idea precisa de las cargas en las horas pico, para las cuales son hechos los cálculos de dimensionamiento.

Por lo que toca a los levantamientos puntuales, estos se realizan en las horas pico de los días laborables y en las porciones de la línea más cargadas. Son realizados en cada PR, manual o automáticamente, de forma precisa y con una periodicidad no mayor a media hora (diez minutos en cierto casos).

Simultáneamente se mide la calidad del servicio de operación, a partir de la hora de salida y llegada a las terminales.

7.3 Cálculos Eléctricos.

Una vez definidos algunos conceptos básicos relativos al consumo de -

tracción, así como los objetivos de los métodos de cálculo en sus diferentes niveles, se procede a describir los cálculos para determinar la primera aproximación de implantación de los PR's a nivel de ante-proyecto inicial.

7.3.1 Potencia Media Demandada a los PR's Instalados en Plena Línea, en Función de la Distancia Interpostal (D).

Bajo situación normal de operación se puede determinar la potencia media demandada al PR en función de D como $\bar{P}_{pr} = f(D)$ a través de:

$$\bar{P}_{pr} = D \bar{I}_k \bar{U}_t \quad 7.27$$

Donde \bar{I}_k representa a la corriente media lineal por kilómetro de vía doble; esta se define por las ecuaciones:

$$\bar{I}_k = \frac{P_1}{\bar{U}_t} \frac{1}{L} \quad 7.28$$

$$\bar{I}_k = \frac{2 \text{ MT CSkt } 3 \text{ 600}}{\bar{U}_t} \frac{1}{I} \quad 7.29$$

De éste modo P_{pr} representa la carga tipo media de los PR's, ya que ha sido calculada a partir de la longitud media interpostal. De la ecuación 7.27 se observa que \bar{P}_{pr} es proporcional a D y la representación de ésta se observa en la Figura 7.4

7.3.2 Caída de Tensión Máxima en Situación de Falla en un PR Instalado a Media Línea.

Se definen inicialmente dos conceptos básicos para la determinación de la caída de tensión máxima.

- $\Delta \bar{U}_{R_{max}}$: Caída de tensión máxima en el punto de inyección de corriente del PR en falla.

- $\Delta U_{D_{max}}$: Caída de tensión debida a la máxima corriente de arranque en el mismo punto.

La caída de tensión total (fuente-vías) ΔU_t se define empíricamente -

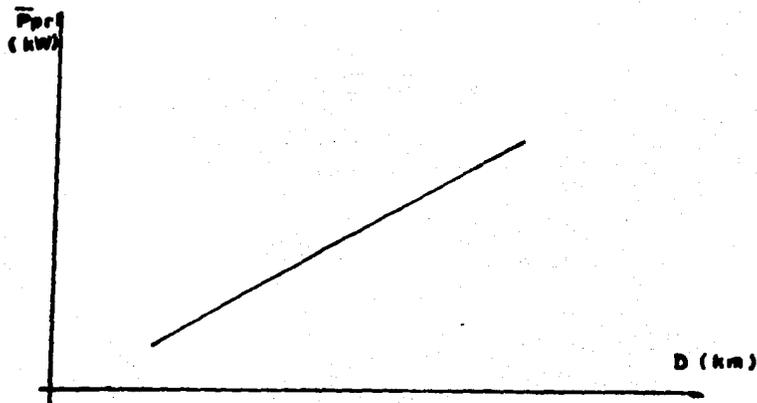


Figura 7.4 Potencia Media Demandada al PR en Función de D.

como:

$$\Delta U_t = \Delta \bar{U}_{Rmax} + \Delta U_{Dmax} \quad 7.30$$

si, $\Delta \bar{U}_{Rmax} > \Delta U_{Dmax}$; o bien

$$\Delta U_t = 2\Delta U_{Dmax} \quad 7.31$$

si, $\Delta \bar{U}_{Rmax} < \Delta U_{Dmax}$

Las expresiones anteriores son válidas únicamente si se conectan en paralelo las vías por lo menos una vez cada interpuesto, lo que generalmente ocurre en los puntos de inyección de los PR's.

Para PR's uniformemente repartidos (ver Figura 7.5) la carga de cada interpuesto está dada por:

$$\bar{I}_{pr} = \bar{I}_k D \quad 7.32$$

Donde, como ya se indicó, \bar{I}_k es la corriente demandada por los trenes por kilómetro de vía doble.

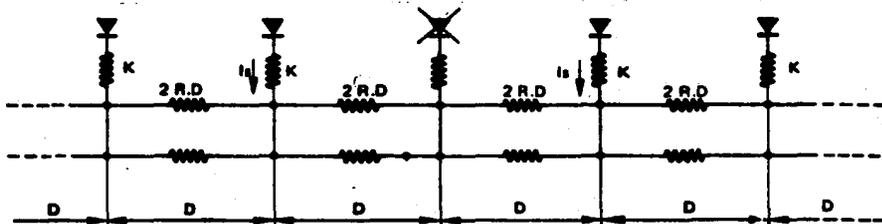


Figura 7.5 Falla de un PR en la parte Media de la Línea.

Si se observa la Figura 7.5 es fácil ver que la carga \bar{I}_{pr} se reparte igualmente entre las dos vías, por lo cual la caída $\Delta\bar{U}_{Rmax}$ corresponde a:

$$\Delta\bar{U}_{Rmax} = k \bar{I}_s + \frac{R \bar{I}_k D^2}{2} \quad 7.33$$

Donde

$$\bar{I}_s = \left(1 + \frac{P}{2k} \right) \bar{I}_k D \quad 7.34$$

$$P = k // (k + R D)$$

$$= \frac{k(k + R D)}{2k + R D} \quad 7.35$$

Por lo que finalmente se obtiene:

$$\Delta\bar{U}_{Rmax} = \bar{I}_k D \left(k + \frac{P + R D}{2} \right) \quad 7.36$$

Por otra parte si I_D es la máxima corriente de arranque y el tren se encuentra situado en el punto de inyección de corriente del PR bajo - falla, la caída de tensión ΔU_{Dmax} es:

$$\Delta U_{Dmax} = \frac{P + R D}{2} I_D \quad 7.37$$

7.3.3 Caída de Tensión Máxima en Situación de Falla en un PR en el Extremo de Línea.

Para el cálculo de caída de tensión máxima bajo esta situación se parte del hecho de que la repartición de carga es ideal, lo cual significa que es despreciable el consumo de maniobras en terminal.

Generalmente las caídas de tensión son mayores en el extremo de la línea debido a lo cual no es posible adoptar siempre la distancia D entre los PR's 1 y 2 (ver Figura 7.6).

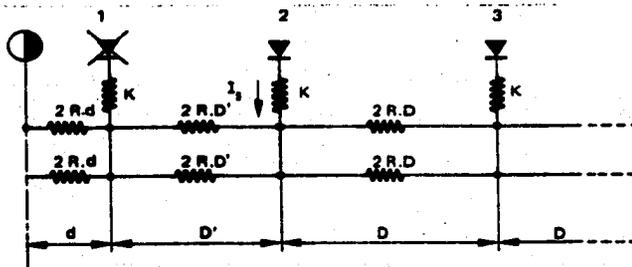


Figura 7.6 Falla de un PR en el Extremo de la Línea.

Bajo régimen normal de operación, la carga demandada a un PR en el extremo de las líneas es menor a la carga demandada a un PR instalado en la mitad de la línea.

En caso de falla del PR 1, la carga del PR 2 es mayor que a media línea debido a que teóricamente:

$$\bar{I}_s = \bar{I}_k \left[\left(1 + \frac{k}{2k + R D} \right) \frac{D}{2} + \left(1 - \frac{k}{2k + R D} \right) (D' + d) \right] \quad 7.38$$

Como los PR's son idénticos a lo largo de línea se calibran en función de la expresión 7.32 además de ser permitida una sobrecarga para el equipo de un 50 %, por lo que es necesario cumplir con la desigualdad.

$$\bar{I}_s < 1.5 I_k D \quad 7.38$$

por lo que

$$D' < D \left(1 + \frac{k}{2(k + R D)} \right) - d \quad 7.39$$

Desprendiéndose de lo anterior que le valor de (d) no debe ser muy grande

$$d < \frac{k}{k + R D} \frac{D}{2} \quad 7.40$$

Se podría tomar un valor de D' igual a D que permite no crear una irregularidad en el suministro de potencia en caso de prolongar la longitud de la línea. Desgraciadamente esta disposición involucra caídas de tensión importantes en el extremo de la línea.

Se definen a continuación tres conceptos para determinar la caída de tensión máxima en el extremo de línea.

- $\Delta \bar{U}_{Rmax}$: Caída de tensión máxima en el eje terminal.
- ΔU_{Dt} : Caída de tensión debida al arranque de un tren en la terminal
- ΔU_{Dat} : Caída de tensión debida a la fase de tracción de un tren en dirección de la terminal, después de la estación anterior (de esta forma se designa a d_1 como la distancia entre la zona de tracción y la terminal).

La caída de tensión total ΔU_{te} se determina en forma empírica a través de:

$$\Delta U_{te} = \Delta \bar{U}_{Rmax} + \Delta U_{Dt} \quad 7.41$$

sí:

$$\Delta \bar{U}_{Rmax} > \Delta U_{Dat}$$

o bien

$$\Delta U_{te} = \Delta U_{Dt} + \Delta U_{Dat} \quad 7.42$$

sí:

$$\Delta \bar{U}_{Rmax} < \Delta U_{Dat}$$

El cálculo de las caídas de tensión anteriormente definidas se hace a partir de la Figura 7.6 y se expresa por medio de las ecuaciones siguientes:

$$\Delta \bar{U}_{Rmax} = \bar{I}k \left[\left(k - \frac{P}{2} \right) D + (D' + d) \left(P + \frac{R(D' + d)}{2} \right) \right] \quad 7.43$$

$$\Delta U_{Dt} = (P + R(D' + 2d)) I_D \quad 7.44$$

$$\Delta U_{Dat} = (P + R(D' + d - d_1)) I_D \quad 7.45$$

sí:

$$d_1 \leq D' + d \quad \text{o bien}$$

$$U_{Dat} = P I_D \quad 7.46$$

sí:

$$d_1 > D' + d$$

El valor de P se expresa en la ecuación 7.35

Las tres últimas expresiones son independientes de las uniones de las vías (puesta en paralelo).

7.3.4 Distancia Máxima Entre PR's (Dmax).

La distancia D al centro de la línea debe satisfacer los criterios de potencia y de caída de tensión.

La potencia nominal Pn de los PR's debe ser ligeramente superior a la potencia media \bar{P}_{pr} correspondiente a la distancia D buscada. Lo anterior se debe a la consideración de los efectos producidos por el factor de forma de la corriente de los PR's así como por la tasa de co-vertura (Tc) que caracteriza el margen necesario para hacer frente a las fluctuaciones en mediana tensión. Como consecuencia se tiene:

$$P_n = F T_c \bar{P}_{pr} = F T_c I_k D \quad 7.47$$

Tomando en cuenta el estado actual de la tecnología de los equipos de rectificación, esta potencia no debe rebasar un cierto umbral $P_{n_{max}}$, de donde se desprende:

$$\bar{P}_{pr} \leq \frac{P_{n_{max}}}{F T_c} \quad 7.48$$

Si se toma como ejemplo a los PR's de México, este umbral máximo de potencia es de 4 000 kW.

Por otra parte, la caída de tensión máxima está fijada por la norma - Union Internationale Chaminfer (U I C).

$$U \geq 2/3 U_{nr}$$

Y por la tensión en vacío U_0 de los PR's. Unr representa la tensión nominal convencional de la red (750 ó 1 500 Volts).

$$\Delta U_{max} = U_0 - 2/3 U_{nr} \quad 7.49$$

Intrínseco al equipo rectificador se tiene:

$$U_0 = U_n - k I_n = U_n + k \frac{P_n}{U_n} = U_n + \frac{k \cdot F}{U_n} T_c \bar{P}_{pr} \quad 7.50$$

Por lo que la caída de tensión máxima admisible es finalmente:

$$\Delta I_{\max} (D) = U_n - 2/3 U_{nr} + k F T_c I_k D \quad 7.51$$

Esto, traducido al criterio de caída de tensión, da como resultado la siguiente desigualdad

$$U_t (D) < U_{\max} (D) \quad 7.52$$

7.3.5 Número Mínimo de PR's.

Considerando la Figura 7.8 se puede observar que el número mínimo de PR's debe satisfacer la siguiente desigualdad

$$2d + 2D'_{\max} + (NPR - 3) D_{\max} > L \quad 7.53$$

donde:

$$NPR \geq NPR_{\text{mínimo}}$$

dado que

$$NPR_{\text{mínimo}} = \text{Parte Entera de } \frac{L - 2(d + D'_{\max})}{D_{\max}} + 4 \quad 7.54$$

La implantación teórica inicial es entonces

$$D = D_{\max} \left(1 - \frac{\Delta L}{L - 2d} \right) \quad 7.55$$

$$D' = D'_{\max} \left(1 - \frac{\Delta L}{L - 2d} \right) \quad 7.56$$

con

$$\Delta L = 2(d + D'_{\max}) + (NPR - 3) D_{\max} - L$$

En la Figura 7.7 se puede apreciar la distribución actual de las subestaciones de rectificación en la red del Metro de la Ciudad de México, desde la línea 1 hasta la línea 9 (actualmente en construcción

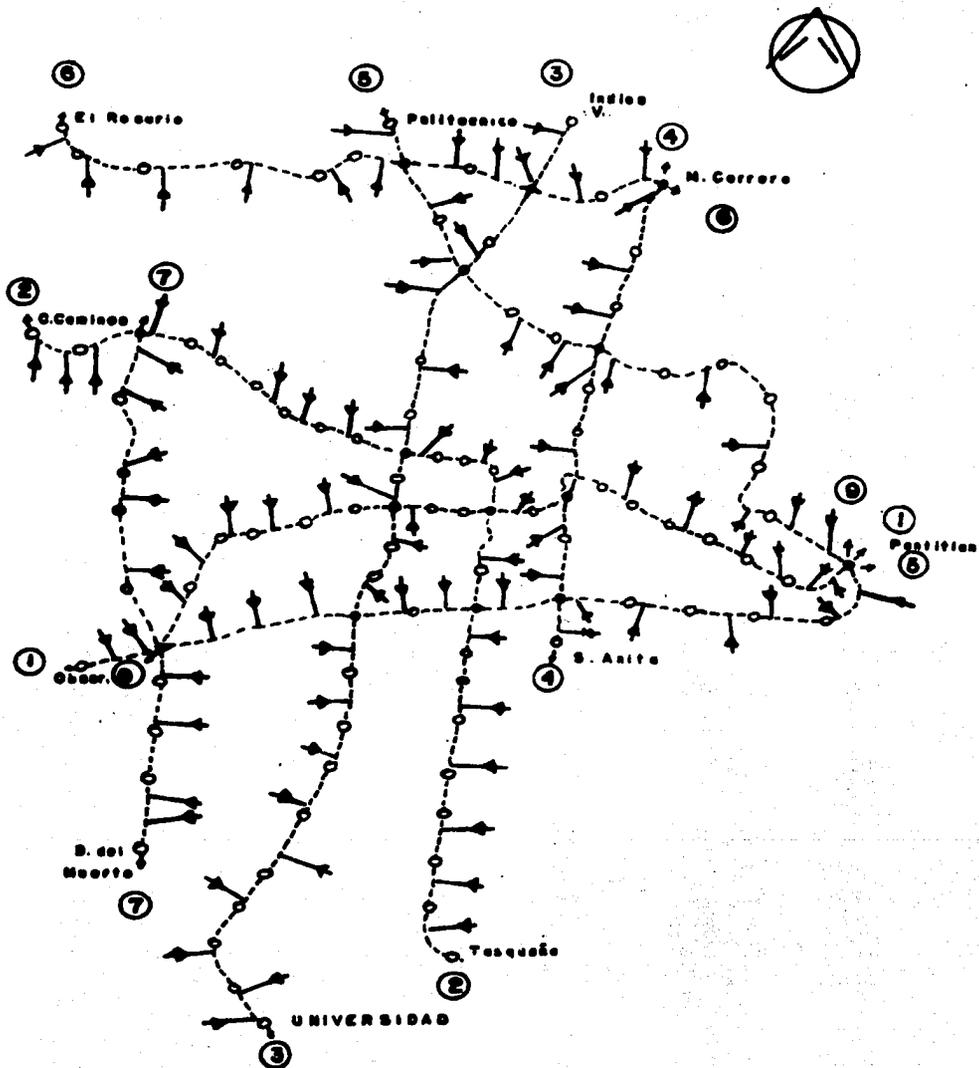


Figura 7.7 Distribución de PR's en las Líneas de Metro Ciudad de México.

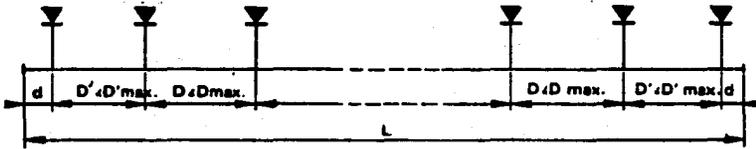


Figura 7.8 Número Mínimo de PR's

C O N C L U C I O N E S

Dada la problemática de transportación actual en la Ciudad de México, es necesario contar con una red de transporte eficiente, rápida, confortable y económica, que permita disminuir u optimizar el uso de -- vehículos particulares.

El Sistema de Transporte Colectivo (Metro) es una alternativa viable en coordinación con los otros sistemas de transportación, además de reducir la contaminación y el gasto de energéticos, al tener mayor eficiencia que los sistemas tradicionales.

Para lograr esta eficiencia, es necesario, una interacción constante entre las diferentes especialidades que trabajan para ello, sin embargo se requiere de un análisis muy detallado (dada la complejidad del proyecto) para reducir al máximo los consumos, así como un estricto control en la operación de las líneas y que generalmente resulta contraproducente por requerirse seguridad y controles adicionales.

Para lograr un buen servicio es necesario disponer de un suministro de energía confiable. Por lo anterior deben diseñarse esquemas de alimentación que permitan mantener el máximo de continuidad con un mínimo tiempo de interrupciones.

Por la importancia de la carga y el panorama ya mencionado con anterioridad, se hace necesario proporcionar al Metro una alimentación -- del tipo exclusivo y subterráneo; que permita garantizar las características de continuidad y calidad del servicio.

Los motores de tracción deben superar las fuerzas inherentes a la masa del material rodante y a su marcha, por ello deben especificarse -- con un elevado par de arranque y una regulación sencilla de velocidad. De esta forma el motor idonio es el tipo serie, el cual requiere de -- una alimentación en corriente directa.

La línea de distribución para corriente de tracción da alternativas de suministro que reducen al mínimo los paros de servicio, aprovecha las vías como medio de transmisión, que poseen una resistencia eléc--

trica baja que facilita la búsqueda de implantación de PR's y la reducción de las pérdidas por efecto Joule.

La tasa de ondulación proporcionada por los PR's hexafásicos (Puente de Graetz trifásico) satisface adecuadamente los requerimientos de -- los motores, observandose que los actuales avances tecnológicos radican principalmente en incrementar la potencia del diodo, facilitar -- los métodos de mantenimiento y la automatización de las subestaciones.

La implantación de PR's debe realizarse siguiendo una metodología que respete las normas y limitaciones eléctricas de los equipos.

La metodología descrita se basa en información estadística y proporciona una primera implantación sujeta a verificación y corrección. El dimensionamiento y ubicación de los PR's se hizo de tal forma versátil que la posible falla de un PR permita a los adyacentes llevar la carga del PR fallado; sin que esta contingencia afecte al servicio.

La electrificación definitiva de una línea de transporte colectivo -- (Metro) involucra factores económicos que toman en cuenta la potencia de las subestaciones de rectificación, la cantidad y tipo de equipos, el número de PR's y la flexibilidad de operación de la línea en general, en función de la calidad del servicio requerido y la carga - manejada.

El alcance de este trabajo es proporcionar un panorama general de los principales aspectos involucrados en la electrificación de una línea de transporte eléctrico; por lo tanto se recomienda emplearlo como una base para futuros estudios formales de cada una de las disciplinas que en él intervienen.

BIBLIOGRAFÍA

Electrónica Teoría de Circuitos

Robert boylestad y L. Nashelsky

Prentice-Hall Hispanoamericana 1982

Redes Eléctricas Tomo 1 y 2

Jacinto Viqueira Landa

Rep. y Servicios de Ing. 1973

Manual Técnico de Cables de Energía.

V. Sierra, A. Sansores y J.H. Pérez

Mc. Graw Hill. 1983

Les Techniques de l' Electricité Ferroviaire

F. Nouvion

Université de Paris 1966

Spécialisation Energie Tomo 1,2y3

Sofretu

1981

Remarques Relatives a l' Alimentación des Reseaux de Chemin de Fer Métropolitains.

F. de Falco

Symposium Trans. Rapide 1963

Alimentation de Lignes en Current T.

S.T. Guillen

Revue Ingenieria 1970

La Traccion Electricque

M. Garreau

Editions Scientifique Riber 1965

Proyecto de Alimentación Eléctrica a las Nuevas Líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

Cia. de Luz y Fuerza del Centro

1983

G. Maldonado y J. Botello