

24/43

RECEIVED  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



*Universidad Nacional Autónoma  
de México*

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**SISTEMA DE TRACCION ELECTRICA  
MONOFASICA 25 Kv, 60 Hz**

**T E S I S**

*Que para obtener el titulo de  
Ingeniero Mecánico Electricista*

*p r e s e n t a n*

*Angel Estrada Barrientos  
Gerardo Rafael González Rivas*

*Director:*

**ING. FRANCISCO LOPEZ RIVAS**



*México, D. F.*

**1988**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis 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.

# INDICE

INTRODUCCION . . . . .	1
------------------------	---

## CAPITULO I

### DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS

DE TRACCION ELECTRICA . . . . .	6
I.1 Generalidades . . . . .	7
I.2 Sistema de Corriente Directa . . . . .	9
I.3 Sistema de Corriente Alterna . . . . .	12
I.4 Generalidades sobre la Catenaria y el Circuito de Retorno . . . . .	18

## CAPITULO II

### DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE ALIMENTACION A CATENARIAS

EN TRACCION ELECTRICA MONOFASICA A 25 Kv, 60 Hz . . . . .	27
II.1 Alimentación Directa . . . . .	28
II.2 Alimentación por Transformador Reforzador (TR) . . . . .	33
II.3 Alimentación por Autotransformador (AT) . . . . .	37
II.4 Cuadro comparativo de las Características de los Diferentes Tipos de Alimentación a Catenaria . . . . .	41

## CAPITULO III

### METODO OPERATIVO PARA EL DISEÑO DE UNA ELECTRIFICACION

EN CORRIENTE ALTERNA MONOFASICA A 25 Kv, 60 Hz . . . . .	42
--	----

III.1	Dimensionamiento de la Red de Suministro de Energía . . . . .	43
III.2	Número, Ubicación y Potencia de las Subestaciones . . . . .	45
III.3	Espaciamiento de las Subestaciones . . . . .	48
III.4	Diagrama Vectorial de una Distribución de Trenes . . . . .	53

#### CAPITULO IV

##### DESEQUILIBRIOS PRODUCIDOS EN LA RED PUBLICA TRIFASICA

DEBIDO A LA CARGA MONOFASICA FERROVIARIA . . . . .		55
IV.1	Descripción del fenómeno . . . . .	56
IV.2	Cálculo de la Corriente desbalanceada por medio de componentes simétricas . . . . .	59
IV.3	Determinación del coeficiente de disimetría introducido en la red trifásica por una conexión monofásica entre dos fases . . . . .	70

#### CAPITULO V

##### ESQUEMAS DE SUBESTACIONES DE TRACCION ELECTRICA

MONOFASICA, 25 Kv, 60 Hz . . . . .		81
V.1	Esquema en Alta Tensión . . . . .	82
V.2	Tipos de Acoplamiento . . . . .	85
V.3	Alimentación a Catenarias . . . . .	91

## APENDICE

### ESQUEMAS DE ALIMENTACION PARA LA ELECTRIFICACION

DE LA LINEA MEXICO - IRAPUATO . . . . .	96
1. Fuentes de Alimentación de Alta Tensión . . . . .	96
2. Cantidad, Potencia y Ubicación de las Subestaciones . . . . .	97
3. Esquemas de Alimentación de las Subestaciones . . . . .	106
4. Esquemas de Equipo . . . . .	110
5. Catenaria . . . . .	114
6. Elección del Sistema a utilizar . . . . .	114
 BIBLIOGRAFIA . . . . .	 117

## INTRODUCCION

## Sistema de Tracción Eléctrica

Para asegurar la tracción de los trenes utilizando como fuente de energía la electricidad, se necesita todo un conjunto de instalaciones tanto fijas como móviles; la concepción y operación de estas instalaciones es diferente de aquellas que habitualmente encontramos en las instalaciones eléctricas industriales.

## El Circuito de Tracción

Llamamos "Circuito de Tracción" al conjunto representado esquemáticamente en la figura 1, el cual está constituido por la subestación, línea de contacto, locomotora y circuito de retorno.

El "Circuito de Tracción" se conforma de la siguiente manera:

Partiendo de la distribución de energía eléctrica en

alta tensión a los puestos fijos llamados subestaciones, y efectuando en éstas una reducción de tensión, para distribuir enseguida la energía a las líneas de contacto (catenarias) y de éstas a las locomotoras.

Las locomotoras transforman esta energía eléctrica en energía mecánica para mover los convoyes, y la corriente regresa a las subestaciones por los conductores de retorno (rieles) constituyendo así el circuito de tracción.

Contrariamente a las aplicaciones ordinarias, este circuito adquiere diferentes dimensiones (mayores o menores) dependiendo de la ubicación de los trenes.

Al conjunto de las instalaciones fijas y móviles que se emplean en el suministro y la utilización de la energía eléctrica para la tracción de los trenes se acostumbra intitular "Sistema de Tracción Eléctrica".

Los sistemas de tracción eléctrica se clasifican de acuerdo a su tensión, frecuencia y fases que utilicen. De esta manera los sistemas adoptados en cada país son el resultado del desarrollo que los sistemas eléctricos ferroviarios han tenido en dichos países.



Una vez elegido el sistema se ha tenido la necesidad de adaptarse al mismo, para no aumentar de modo prohibitivo el costo y complicar las transformaciones requeridas por dicho sistema.

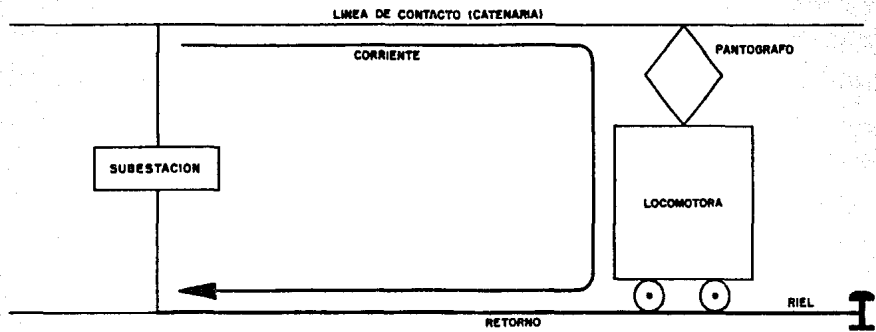


Figura No. 1

## **C A P I T U L O   I**

### **DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE TRACCION ELECTRICA**

## I.1 Generalidades

La energía suministrada a la locomotora eléctrica a partir de la subestación de tracción, puede ser en corriente directa o corriente alterna.

Antes de describir las instalaciones eléctricas individualmente, mencionaremos los diferentes tipos o sistemas de electrificación con los cuales se construyen y marchan los trenes actualmente en el mundo. Se clasifican como se muestra en la Tabla I.

T A B L A I

TIPO DE SISTEMA	TENSION (kv)	FRECUENCIA (Hz)
CORRIENTE DIRECTA	0.60, 0.75, 1.2, 1.5, 3.0	
CORRIENTE ALTERNA MONOFASICA	20, 25, 50	60
	6.6, 20, 25, 50	50
	11, 16	25
	11, 15	16 2/3
CORRIENTE ALTERNA TRIFASICA	0.60	60
	6.0	25
	3.7	16 2/3

La determinación del sistema de corriente más apropiado para la electrificación de los ferrocarriles, fue objeto de múltiples discusiones en los inicios de su utilización hace aproximadamente 50 años.

Hubo acuerdo en la necesidad de la electrificación y sobre las ventajas que ésta presenta en comparación con la tracción por medio de vapor o diesel, tanto desde el punto de vista constructivo como desde el económico, social y ambiental. Por el contrario, las opiniones eran diversas en cuanto a la elección del sistema de corriente a usar.

Era lógico que en los comienzos de esta electrificación se pensase que el método más sencillo fuese el de alimentar la línea de contacto de los ferrocarriles, directamente por la red comercial de corriente alterna mediante subestaciones de transformación.

Se oponían sin embargo a la adopción general de esta solución obstáculos insuperables, ya que todos los esfuerzos encaminados a realizar motores monofásicos adecuados fallaban irremediablemente; debido a ésto las diversas empresas de transporte se vieron obligadas a renunciar a las ventajas de utilizar la misma red de alimentación para la industria y los ferrocarriles.

En los últimos años la tracción eléctrica ha sufrido un gran desarrollo a medida que se intensificó la necesidad de mayor transportación y una profunda evolución, como consecuencia de los progresos alcanzados en las áreas: mecánica, electromecánica y electrónica.

Los avances tecnológicos alcanzados han ayudado a que los sistemas de tracción hagan frente a la mayor demanda de potencia, y a la mayor velocidad requerida por los convoyes.

Hoy en día cuando los recursos energéticos son escasos y caros, la tracción eléctrica ferroviaria se presenta como una solución económica privilegiada, a condición de que el tráfico justifique en un trayecto determinado, las elevadas inversiones requeridas para su electrificación.

## 1.2 Sistema de Corriente Directa

En este sistema la corriente directa es obtenida por medio de la rectificación de la corriente alterna suministrada por la Red de Energía a las subestaciones, las cuales entregan ésta a la línea de contacto que alimenta a los motores de tracción de las locomotoras.

Una desventaja de este sistema es el hecho de que existe corrosión debido a las corrientes vagabundas que circulan por el suelo, las cuales están en función del aislamiento riel suelo provocando efectos de corrosión electrolítica en el riel y en las canalizaciones adyacentes a la línea electrificada.

Para comprender este fenómeno más objetivamente podemos hacer una analogía entre el conjunto riel-suelo y dos electrodos sumergidos en un electrólito:

Electrodos	1. Canalización metálica enterrada 2. Rieles
Electrólito	Suelo conteniendo sales, ácidos, bases, etc.

Existen algunos procedimientos de protección que se emplean para reducir este efecto y que son:

1. Mejorar el aislamiento de vía respecto a tierra.
2. Reducción de la resistencia de riel.
3. Disposiciones a tomar en canalizaciones y rieles tales como: revestimientos, juntas aislantes, etc.

### Protección catódica

Procedimiento basado en la obtención de inmunidad a canalizaciones metálicas enterradas sujetas a corrosión, mediante la disminución de su potencial respecto a tierra. Este método se basa en lo siguiente: un metal colocado en un medio electrolítico no presenta corrosión cuando su tensión es inferior a la del electrolito, quedando siempre por debajo del valor límite llamado umbral de protección. Una protección catódica es eficaz, si en todos los puntos de la canalización el potencial está por debajo del umbral de protección.

Para darnos una idea de los efectos de la corrosión electrolítica una corriente de un ampere disuelve:

9 Kg/año de hierro

29 Kg/año de plomo

Los sistemas de corriente directa comparados con los sistemas de corriente alterna manejan flujos mayores de corriente en la línea de contacto y la caída de tensión es mayor; así como los intervalos de las subestaciones de tracción son cortos y grandes las capacidades de corriente demandadas.

Con el objeto de reducir las caídas de tensión e incrementar la capacidad de conducción de corriente de la línea de contacto, se utilizan alimentadores adicionales (feeders). Los alij



mentadores adicionales o feeders son cables tendidos en paralelo con la catenaria y conectados a ésta en diferentes puntos, lo que permite aumentar la sección de cobre de la línea de alimentación y por consecuencia disminuir las caídas de tensión.

Podemos mencionar la ventaja de que la baja tensión de los sistemas de tracción de corriente directa, hace que el aislamiento de las máquinas eléctricas y equipo sea más sencillo y además origina menor inducción sobre las líneas de telecomunicaciones.

### 1.3 Sistema de Corriente Alterna

Aunque hay varios tipos de sistema de corriente alterna, como se indicó en la Tabla I, el más adoptado es el monofásico de frecuencia comercial, la subestación de este sistema es simple ya que la frecuencia de la potencia recibida de las líneas comerciales de transmisión, no tiene que ser modificada para alimentar a las locomotoras, sin embargo existen algunos inconvenientes que produce un tipo de sistema como éste.

Cuando una corriente fluye por el circuito de alimentación catenaria-riel, ésta genera un campo magnético alterno de fre

cuencia igual a la de la corriente que fluye por la línea. Este campo causa interferencia a los sistemas que operan con corriente de baja intensidad (línea de telecomunicaciones, circuito de vía, etc.), adyacentes a la línea electrificada.

Debido a que el circuito de alimentación utiliza el suelo como parte del circuito de retorno, la magnitud de la interferencia depende de la conductividad del terreno. Sabemos que la corriente toma como conductor de retorno la tierra aumentando así la sección del lazo inductor.

La conductividad del terreno varía en un amplio rango dependiendo de la estructura geológica del terreno y es también influenciada por las lluvias, nivel freático, los estratos poco profundos cercanos a la superficie y los estratos profundos.

Una tendencia que ha sido encontrada en relación con la conductividad y el estrato, es que la conductividad del terreno aumenta a medida que la era geológica del estrato es reciente.

Cuanto menor es la conductividad del terreno la corriente de retorno alcanza capas más profundas, lo cual agrava el fenómeno de inducción. Los estudios han mostrado y los ensayos efectuados confirman que la corriente en el riel y la tensión riel-suelo aumentan con la intensidad de la corriente circulan

te en la catenaria. Esto tiene como consecuencia que las tensiones riel-suelo sean menores cuando la tensión en la catenaria es elevada.

Para reducir estos inconvenientes se utilizan los sistemas de transformador reforzador y/o autotransformador.

Por otro lado, al recibir una gran cantidad de energía de una fase de un sistema de tres fases de poca capacidad, se creará un desbalanceo en la red de alimentación trifásica. Para combatir ésto existen algunos montajes especiales como el delta abierta y el scott, utilizados para reducir el desbalanceo de fases en la fuente suministradora.

Para los sistemas monofásicos especiales, tales como el de - - 16 2/3 Hz ó 25 Hz, la línea de contacto es alimentada a través de un generador o convertidor de frecuencia especialmente diseñado para este propósito, la ventaja de estos sistemas es - que la locomotora va a operar directamente en corriente alterna; ya que ésta utiliza motores de conmutación debido a que la rectificación no es requerida.

En el sistema de electrificación trifásica se emplean los motores de tracción trifásicos o también motores de corriente - directa, el problema con este sistema se debe a la necesidad

de emplear líneas de contacto polifásicas, por lo que los mecanismos de colección de corriente se vuelven complicados.

A estas fechas este tipo de problemas se están resolviendo, y algunos países cuentan ya con este tipo de sistema en operación.

Las Tablas II y III resumen las características de los sistemas de corriente alterna y corriente directa.

T A B L A II

INSTALACIONES FIJAS	SISTEMA MONOFASICO A FRECUENCIA COMERCIAL	SISTEMA DE CORRIENTE DIRECTA
1.- Subestaciones	<p>1.- Costo de construcción bajo</p> <p>a) El intervalo entre subestaciones es grande. Sistema de alimentación directa aproximadamente de 30 a 50 Kms. Sistema transformador reforzador aproximadamente de 20 a 30 Kms. Sistema autotransformador aproximadamente de 60 a 100 Kms.</p> <p>b) El esquema de la subestación se simplifica al requerirse solamente transformadores.</p>	<p>1.- Costo de construcción alto</p> <p>a) El intervalo entre subestaciones es corto, de 10 a 20 Kms. por lo tanto se requiere mayor número de subestaciones.</p> <p>b) El esquema de la subestación se hace complejo al requerirse equipos rectificadores de corriente.</p>
2.- Tensión de alimentación	<p>2.- Como los transformadores van montados en las locomotoras, puede utilizarse alta tensión. Esto hace que la selección del motor eléctrico de tracción sea más fácil.</p>	<p>2.- La tensión de alimentación está limitada por el aislamiento y la conmutación del motor.</p>
3.- Línea de contacto	<p>3.- La intensidad de corriente es baja, por lo que la sección de cobre es pequeña y la estructura de la línea simple.</p>	<p>3.- La intensidad de corriente es alta, por lo que la sección de cobre es grande y en consecuencia la línea debe ser sostenida por una pesada estructura.</p>
4.- Espacio de aislamiento	<p>4.- Se utiliza alta tensión y por tanto es necesario gran espacio de aislamiento el cual debe incrementarse en los túneles.</p>	<p>4.- Al utilizar baja tensión el espacio de aislamiento se reduce.</p>
5.- Caída de tensión	<p>5.- La caída de tensión puede ser compensada fácilmente utilizando condensadores en serie o poniendo las catenarias en paralelo.</p>	<p>5.- Para prevenir la excesiva caída de tensión es necesario utilizar subestaciones, puestos de seccionamiento o alimentadores adicionales.</p>
6.- Protección	<p>6.- El equipo de protección es sencillo debido a la baja corriente de tracción y a la facilidad de discriminar la corriente de falla.</p>	<p>6.- El equipo de protección es complejo debido a la alta corriente de tracción y a la dificultad en la interrupción selectiva de la corriente de falla.</p>
7.- Inducción a las líneas de telecomunicaciones	<p>7.- Como la inducción es fuerte es necesario instalar sistemas AT, TR y canalizar las líneas de telecomunicación por cable.</p>	<p>7.- La inducción es débil, por lo tanto no se requiere de equipo adicional en la línea.</p>
8.- Desbalanceo de fases	<p>8.- Debido a la carga monofásica, la fuente trifásica está sujeta a un desbalanceo.</p>	<p>8.- No existe.</p>

T A B L A    I I I

SISTEMA DE ELECTRIFICACION		DIRECTA	ALTERNA
TENSION DE LINEA		3000 VCD	25 KV 60 Hz
CORRIENTE EN CATENARIA A POTENCIA IGUAL		1500 A	250 A
DISTANCIA MEDIA ENTRE SUBESTACIONES		10 a 20 Km	50 a 70 Km
CATENARIA		PESADA	LIGERA
CIRCUITO AEREO	AISLAMIENTO	REDUCIDO	FUERTE
	FENOMENO ELECTROSTATICO	REDUCIDO	IMPORTANTE
CIRCUITO RETORNO	FENOMENO ELECTROMAGNETICO	ACCIDENTAL	IMPORTANTE
	TENSION RIEL - SUELO	VARIABLE	VARIABLE
	CORRIENTE DE FUGA	BAJA	ALTA
	RIESGO DE CORROSION ELECTROLITICA	SI	NO

#### I.4 Generalidades sobre la Catenaria y el Circuito de Retorno

##### Catenaria

Las líneas de contacto aéreas son prácticamente designadas bajo el nombre de catenaria.

La palabra catenaria es la abreviación de "Línea de Contacto o Suspensión de Catenaria". Este tipo de suspensión consta de un portador del cual es suspendido el o los hilos de contacto. Es entonces la palabra línea de contacto el término general, la catenaria no es mas que un modo de realización de la línea de contacto.

Una línea de contacto es una línea eléctrica para transmitir y suministrar energía desde una subestación de tracción a la locomotora eléctrica, a través de un dispositivo colector de corriente llamado pantógrafo. La energía puede ser suministrada como se mencionó anteriormente en corriente directa ó corriente alterna.

La línea de contacto difiere de una línea eléctrica de transmisión, en lo siguiente:

1. El punto de carga es móvil y la carga fluctúa bruscamente durante la operación de los motores eléctricos de la locomotora.
2. La energía es suministrada a los motores de la locomotora por el contacto entre el pantógrafo y la línea de contacto.
3. Generalmente, los rieles de la vía son usados como retorno de corriente de los motores de la locomotora a la subestación. Por lo que, un lado del circuito es aterrizado, lo que causa corrosión electrolítica en el sistema de corriente directa y problemas de inducción a las líneas de telecomunicaciones en los sistemas de corriente alterna.
4. Es necesario que no exista ningún tipo de interferencia entre la línea de contacto y el pantógrafo.
5. Es difícil disponer de reservas.



**CONDICIONES  
ELECTRICAS**

- 1.- Las líneas de contacto deben ser construidas utilizando alambres o cables - que sean buenos conductores a fin de no crear caídas de tensión importantes.
- 2.- La transmisión de energía requiere que no exista calentamiento anormal en los conductores.

En general, la sección de una catenaria es calculada en función del tráfico, del perfil, trazo de la línea, de las caídas de tensión admisibles, ca lentamiento de los conductores y del - espaciamiento de las subestaciones.

**CONDICIONES  
MECANICAS**

Los elementos constitutivos de la catenaria son calculados para que resistan todos los esfuerzos normales a los que puede ser sometida, teniendo en cuenta los coeficientes de seguridad reglamentarios.

Para asegurar un buen contacto con el

pantógrafo se necesita:

- 1.- Que la catenaria sea flexible, de donde la necesidad de suspender el hilo de contacto de un portador.
- 2.- Que ésta conserve sensiblemente, una misma forma, cualquiera que sea la temperatura. Para este efecto el portador y el hilo de contacto son tendidos por medio de aparatos automáticos de tensión. Son éstos los que mantienen constante esta tensión entre los límites habituales de variación de temperatura.

Para darnos una idea del área que tienen las secciones de las catenarias tanto en corriente directa como en corriente alterna, en la Tabla IV se citan algunos valores. La figura 2 muestra algunos tipos de catenarias.

TIPO DE CATENARIA	CONSTRUCCION	CLASIFICACION SEGUN VELOCIDAD
SUSPENSION DIRECTA		BAJA VELOCIDAD HASTA 45 Km / h
INCLINADA		HASTA 60 Km / h
SIMPLE		HASTA 100 Km / h
SIMPLE DOBLE		ALTA VELOCIDAD HASTA 100 Km / h
SIMPLE SOBRETENSADA		ALTA VELOCIDAD HASTA 100 Km / h
SIMPLE CON AMORTIGUAMIENTO		ALTA VELOCIDAD HASTA 100 Km / h
COMPUESTA		ALTA VELOCIDAD DE 160 a 200 Km / h
COMPUESTA CON AMORTIGUAMIENTO		ALTA VELOCIDAD DE 160 a 200 Km / h

Figura No. 2

T A B L A IV

S I S T E M A	TENSION Y FRECUENCIA	SECCION EQUIVALENTE DE COBRE
CORRIENTE DIRECTA	3000 V	APROXIMADAMENTE 300 mm <sup>2</sup>
	1500 V	400 mm <sup>2</sup> Y MAYOR
CORRIENTE ALTERNA MONOFASICA	15 KV a 16 2/3 Hz, 6 25 KV a 60 Hz	de 100 a 150 mm <sup>2</sup>

### Circuito de Retorno

Se admite la existencia de dos circuitos formados por catenaria-suelo y riel-suelo, constituyendo un transformador cuyo primario y secundario tienen un conductor común: el suelo.

En los ferrocarriles eléctricos, el riel es diseñado como circuito de retorno que conduce la corriente proveniente de la locomotora por tanto la tensión riel-suelo surge del producto de la impedancia característica del riel y de la corriente de carga.

La magnitud de la tensión riel-suelo depende de:

- 1.- La configuración del circuito de alimentación.

- 2.- Valor de la corriente de carga.
- 3.- La ubicación de la carga.
- 4.- Impedancia riel-suelo.

El retorno de la corriente de tracción desde la locomotora eléctrica hasta la subestación toma la siguiente configuración.

La corriente en los rieles es la suma vectorial de dos corrientes:

- 1.- La corriente  $I_r$ , proveniente de la alimentación de la locomotora.
- 2.- La corriente inducida  $I_{ir}$ , que induce la corriente que circula en la catenaria.

Ver la configuración que se muestra en la figura 3.

Los intercambios de corriente riel-suelo son particularmente intensos en las cercanías del punto de carga y de las subestaciones. La corriente total en los rieles está representada por una corriente constante en el centro y hasta una cierta distancia en los extremos (suponiendo que las subestaciones estén suficientemente alejadas). A partir de las subestaciones y de los puntos de carga la corriente de alimentación de

saparece rápida y exponencialmente en el suelo.

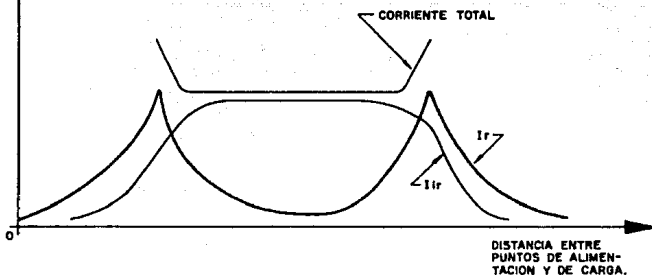
Podemos concluir que mientras la distancia de conducción del riel sea reducida, menor es la tensión riel-suelo.

CORRIENTE EN RIEL

SUBESTACION



CARGA



$I_r$  - CORRIENTE DE RETORNO

$I_{ir}$  - CORRIENTE INDUCIDA EN EL RIEL

Figura No. 3

## C A P I T U L O    I I

DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE ALIMENTACION A  
CATENARIAS EN TRACCION ELECTRICA MONOFASICA A  
25 Kv, 60 Hz



## II.1 Alimentación Directa

El sistema de alimentación directa tiene una configuración básica que consiste en: la línea de contacto y el riel como se muestra en la figura 4.

En este sistema la subestación de tracción está constituida de transformadores reductores, cuyo primario es conectado a la red de alimentación trifásica.

En su secundario las terminales se conectan directamente a la catenaria y el riel, estableciendo así el circuito de tracción.

La corriente en la línea de contacto es captada por la locomotora alimentándose así los motores de tracción, esta corriente retorna por los rieles a la subestación quedando establecido así el circuito.

Desde el punto de vista técnico y económico presenta grandes ventajas sobre los otros sistemas, ya que es extremadamente simple debido a su elemental configuración, por lo que ha sido ampliamente adoptado.

Este sistema tiene ciertos inconvenientes que dan lugar a las

# ALIMENTACION DIRECTA

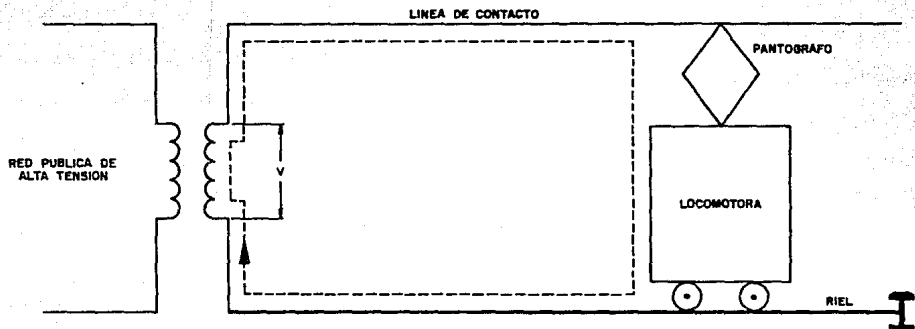


Figura No. 4

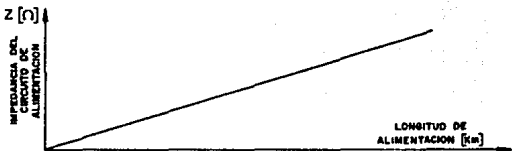
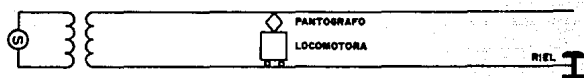
siguientes dificultades: En un sistema ferroviario donde se operan gran cantidad de trenes los cuales, durante su operación, demandan de las subestaciones la energía necesaria para operar considerando que no siempre la distancia de las locomotoras a las subestaciones es corta, ocasiona al sistema una caída de tensión considerable a lo largo del riel debido a que la corriente de tracción de la locomotora retorna por los rieles y de ésta, un volumen considerable fluye a tierra provocando un aumento de tensión de riel a suelo además de interferencia a las líneas de telecomunicaciones.

Podemos considerar el circuito de tracción del sistema de alimentación directa, como un circuito desbalanceado con una línea aterrizada que provoca las dificultades anteriormente mencionadas.

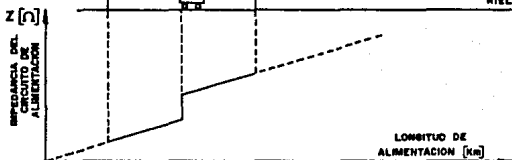
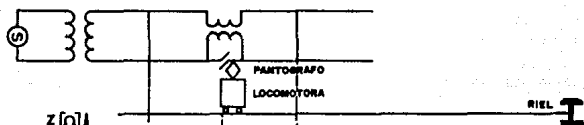
El sistema presenta una impedancia formada por la malla catenaria-riel-suelo que es función de la conductividad del suelo, número de vías y de la geometría de los elementos constitutivos de la malla (tipo de catenaria, tipo de riel, distancia entre vías y distancia entre riel y catenaria).

Estos parámetros para determinar la impedancia del circuito de alimentación son válidos también para los otros sistemas de alimentación a catenarias.

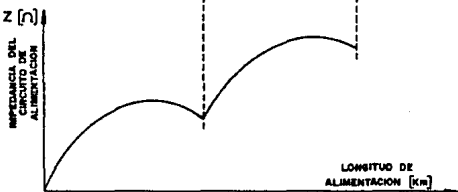
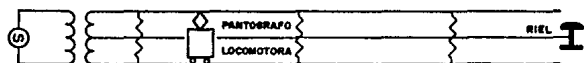
## IMPEDANCIAS CARACTERISTICAS



**SISTEMA DE ALIMENTACION DIRECTA**



**SISTEMA DE ALIMENTACION POR TRANSFORMADOR REFORZADOR**



**SISTEMA DE ALIMENTACION POR AUTOTRANSFORMADOR**

*Figura No. 5*

T A B L A V

TIPO DE SISTEMA	FRECUENCIA (Hz)	IMPEDANCIA (Ohms/Km.)
ALIMENTACION DIRECTA	50	0.241 + j0.493
	60	0.241 + j0.610
ALIMENTACION POR TRANSFORMADOR REFORZADOR	50	0.286 + j0.684
	60	0.286 + j0.822
ALIMENTACION POR AUTOTRANSFORMADOR	50	0.111 + j0.176
	60	0.111 + j0.212

## II.2 Alimentación por Transformador Reforzador (TR)

Su esquema es el siguiente: Se distribuyen Transformadores Reforzadores a todo lo largo de la línea de alimentación (caterina) en intervalos regulares de aproximadamente cuatro kilómetros.

El Transformador Reforzador tiene una relación de transformación de uno a uno (1:1).

El lado primario se conecta en serie a la línea de contacto. El lado secundario se conecta en serie con un alimentador de retorno aislado y el riel, una fuerza electromotriz es creada entre dos puntos de la línea y su valor debe ser igual y de signo contrario a la caída de tensión de la corriente en el conductor aislado.

Los inconvenientes que presenta este sistema son los siguientes:

1. El alimentador de retorno cuya sección debe ser por definición comparable con la del hilo de contacto, es de un costo elevado.
2. Los transformadores son eficaces solamente si su espaciamiento es corto y si en el momento de un corto circuito en la catenaria, momento en el cual la inducción es más fuerte, su circuito magnético no llega hasta la saturación. Es necesario proveer numerosos transformadores y de gran capacidad lo que produce en consecuencia un nuevo aumento del costo.
3. Introducen en el circuito de alimentación impedancias adicionales y por tanto, caídas de tensión que pueden conducir a disminuir el espacio entre subestaciones y

en consecuencia aumentar su número.

4. El principio del montaje del transformador reforzador hace que en la sección en donde se encuentre un tren, la corriente de retorno utiliza los rieles y el suelo en lugar de pasar por el alimentador de la misma sección, en ésta la compensación entonces no es asegurada completamente.
5. Por definición una cierta diferencia de tensión existe entre los dos bornes del transformador, resultando al paso de los trenes unos arcos muy perjudiciales para el pantógrafo y sobre todo para la línea de contacto.

Los transformadores reforzadores tienen gran utilidad en los países donde la poca conductividad del suelo hace que existan fuerzas electromotrices inducidas muy importantes. Los transformadores reforzadores se utilizan para reducir las tensiones inducidas y favorecer el retorno de la corriente de tracción forzando a ésta a no circular por el suelo.

La figura 6 muestra el sistema de alimentación por transformador reforzador.

# ALIMENTACION POR TRANSFORMADOR REFORZADOR

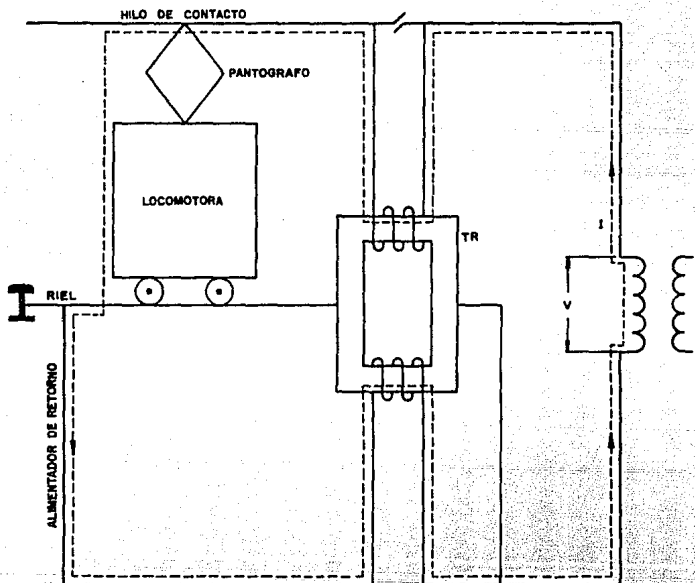


Figura No. 6



### 11.3 Alimentación por Autotransformador (AT)

Este sistema tiene la siguiente configuración:

Los autotransformadores son instalados a intervalos regulares (aproximadamente cada 10 kilómetros) a todo lo largo de la línea electrificada.

El sistema autotransformador suministra la energía a los trenes de la siguiente forma: La subestación alimenta a la línea de contacto a una tensión de 50 Kv entre la catenaria y el alimentador de retorno, por medio de autotransformadores. Se alimenta a las locomotoras reduciendo así la tensión que llega desde las subestaciones. La catenaria en este caso actúa como una línea de transmisión de 2 x 25 Kv.

El autotransformador consiste en una sección de devanado único con una relación de transformación de dos a uno, en las que ambas terminales del devanado son conectadas respectivamente a la línea de contacto y al alimentador de retorno, mientras que el punto neutro del devanado se conecta al riel.

Teniendo en cuenta que la tensión suministrada a la catenaria es dos veces la tensión de alimentación a la locomotora, la corriente que alimenta este sistema es la mitad de la corriente

te en el sistema de alimentación directa, así como también su caída de tensión es menor debido a la baja impedancia del circuito de alimentación y a la baja corriente que circula, permitiéndonos ésto tener un mayor intervalo entre subestaciones.

Podemos citar como inconvenientes de este sistema los siguientes:

1. Tiene como inconveniente el costo elevado del alimentador de retorno y de los autotransformadores, más presenta la ventaja en relación con el transformador reforzador de evitar los efectos relativos a la captación de la corriente.
2. La corriente de tracción es suministrada a una tensión de 50 Kv entre el hilo de contacto y el alimentador de retorno, salvo entre los autotransformadores - que están a cada lado del tren en donde la corriente de retorno toma los rieles y el suelo.

Así, se ve que en ésta parte de la línea también la compensación está mal asegurada.

3. Este sistema no evita las interferencias en cables de las líneas aéreas de telecomunicaciones a lo largo de

la vía electrificada, permite reducir solamente el -  
costo de protección a las mismas.

La figura 7 muestra el sistema de alimentación por autotrans-  
formador.

# ALIMENTACION POR AUTOTRANSFORMADOR



Figura No. 7

II.4 Cuadro comparativo de las características de los diferentes tipos de Alimentación a Catenaria

CARACTERISTICA	SISTEMA DE DIRECTA	SISTEMA TRANSFORMADOR REFORZADOR	SISTEMA DE AUTOTRANSFORMADOR
Sistema de alimentación	La estructura del circuito alimentador es sencilla.	La longitud de la sección de alimentación es relativamente reducida debido a que la tensión de alimentación sufre una caída a la derecha de cada transformador instalado en serie en el circuito de alimentación.	La tensión de alimentación es igual al doble de la tensión de carga y la intensidad de la corriente de alimentación es igual a la mitad de la corriente de carga, dando por resultado que la caída de tensión por kilómetro sea cuatro veces menor que en el sistema T.R. por tanto la sección de alimentación puede ser de 2 a 4 veces más larga que en el sistema T.R.
Continuidad del circuito de alimentación	El hilo de contacto es continuo hasta las secciones neutras que son los puntos donde se unen los circuitos de alimentación de dos subestaciones continuas.	En cada transformador el hilo de contacto presenta una discontinuidad. El intervalo entre transformadores está comprendido entre 1.5 y 4.0 kilómetros.	El hilo de contacto no presenta discontinuidades en los autotransformadores. El intervalo entre autotransformadores está comprendido aproximadamente de 10 a 20 kilómetros.
Interferencias con los sistemas de comunicación	Debido a que la corriente retorna por el riel a la subestación, existe mayor tensión -rielsuelo que en otros sistemas, y por tanto mayor interferencia.	Los transformadores reforzadores distribuidos en la línea de contacto, tienen por objeto absorber la corriente de retorno que pasa por el riel para reducir la interferencia.	La corriente de carga la absorben los autotransformadores eliminando la tensión inducida a los cables de comunicación y limitando la corriente que regresa por el riel, reduciendo así la interferencia.

## C A P I T U L O    I I I

METODO OPERATIVO PARA EL DISEÑO DE UNA  
ELECTRIFICACION EN CORRIENTE ALTERNA  
MONOFASICA A 25 Kv, 60 Hz

### III.1 Dimensionamiento de la Red de Suministro de Energía

Se puede electrificar para un tráfico ya preestablecido ó electrificar desde el punto de vista de un dimensionamiento óptimo, con la idea de ir aprovechando hasta el máximo toda la capacidad de la red.

En ambos casos el método operativo a seguir es el mismo, aunque en el último haya más posibilidades de opción entre las distintas alternativas que se presenten.

#### CRITERIOS

Cumplimiento de los requisitos mínimos exigidos

Compatibilidad con las instalaciones -  
externas ya existentes.

Máxima economía.

Seguridad y confiabilidad.

#### INFORMACION REQUERIDA

La corriente de la línea y sección del conductor.

Número, ubicación y potencia de las subestaciones.

Costo de implantación.

#### LIMITACIONES

Tensión de la red primaria.

Desequilibrio permitido entre fases.

Caídas de tensión.

Para que la instalación sea capaz de suministrar la potencia necesaria a la tensión establecida, hay que conocer:

1. La potencia disponible en la red primaria.
2. Los desequilibrios, distorsiones y armónicas máximas permisibles en la red primaria.
3. La reactancia de la subestación.
4. Las impedancias propias y mutuas de la línea de alimentación y de los conductores de retorno.
5. La tensión mínima admisible en el punto de toma de co



riente.

6. La temperatura de equilibrio máxima permitida al conductor aéreo.
7. El factor de potencia de la locomotora.

Es preciso conocer además las constantes eléctricas de los conductores y aisladores que intervienen en la instalación, tales como: resistencia, capacidad, autoinducción, corrientes de fuga y aislamiento.

Todas las magnitudes indicadas anteriormente deben ser cuantificadas y sus valores deben ser calculados teóricamente y comprobados experimentalmente.

Además, hay que comprobar que la potencia que pueda suministrar la instalación sea realmente entregada y captada adecuadamente por las locomotoras.

### III.2 Número, Ubicación y Potencia de las Subestaciones

El objeto es determinar el número, ubicación y potencia de las

subestaciones, para que tengan la capacidad de atender las ne  
cesidades del tráfico previsto.

El método operativo a seguir es el siguiente:

1. Establecimiento de los pronósticos de tráfico.
2. Obtención del diagrama de circulación de trenes.
3. Establecimiento de los perfiles virtuales de la línea.
4. Determinación de la potencia demandada en cada momento, considerando la potencia de cada tren y su ubicación.
5. Determinación de las situaciones más desfavorables en función de:

La demanda máxima de potencia, y la má  
xima distribución de trenes.

6. Especificación para cada una de las situaciones indicadas en el inciso anterior en cuanto a:

Potencia eléctrica requerida por cada tren, factor de potencia de cada locomotora, ubicación de cada locomotora.

7. Establecimiento de parámetros.

Sección de los conductores.

Número y ubicación de las subestaciones.

8. Cálculo para los parámetros establecidos en el inciso anterior y para cada subestación:

- Corriente demandada por cada tren
- Corrientes en línea
- Potencia de la subestación
- Impedancia de la catenaria
- Calentamiento de los conductores

9. Verificación de acuerdo con los resultados obtenidos en el inciso anterior, si el conjunto de las instalaciones cumple con:

- Las demandas exigidas en el caso más desfavorable
- Las demandas máximas de la instalación
- El desequilibrio de la red y el contenido en armónicas

Podemos concluir después de haber analizado el método operativo que se deberá cumplir, que:

El equipo de la subestación debe tener suficiente capacidad para soportar la carga de las locomotoras.

Las caídas de tensión debidas a la carga de las locomotoras no deben afectar la operación de los trenes.

Las subestaciones deben estar provistas de protecciones que detecten las fallas y corten la energía al ocurrir un corto circuito en el circuito de alimentación debido a una falla en la catenaria o en la locomotora.

### III.3 Espaciamiento de las Subestaciones

La implantación de subestaciones no responde a una regla matemática bien definida pero sí constituye un conjunto de elementos particulares ligados entre ellos. Las combinaciones posibles no son ilimitadas, ya que generalmente ciertos criterios se imponen para fijar el punto de alimentación en cuanto a la determinación del espaciamiento admisible entre subestaciones. Este es esencialmente una cuestión de caída de tensión y de capacidad de las subestaciones.

Cuando la impedancia del circuito de alimentación es pequeña la caída de tensión en él es también pequeña para la misma corriente de carga, consecuentemente es posible incrementar el intervalo entre subestaciones.

Por ejemplo, si la impedancia del circuito de alimentación se reduce  $1/3$ , se puede incrementar la distancia de alimentación tres veces para la misma carga, por lo que el intervalo entre subestaciones puede ser incrementado exactamente en proporción inversa a la impedancia del circuito de alimentación.

Entre la fuente de energía y el pantógrafo de la locomotora - existe una caída de tensión que depende de la carga y de las características eléctricas del circuito.

La probabilidad de que exista una gran caída de tensión, es - generalmente mayor cuando la carga se encuentra al final del circuito de alimentación. El rendimiento de la instalación - será mayor en la medida que la caída de tensión sea reducida. La figura 8 muestra un modelo de caída de tensión.

Para que la caída de tensión sea admisible, es necesario que la tensión captada por el pantógrafo satisfaga las dos condiciones siguientes:

1. Que la tensión a lo largo de la línea de contacto se conserve similar a la nominal para permitir a las locomotoras el utilizar su capacidad de tracción y asegurar el tráfico regular de los trenes.
2. Que en ningún punto a lo largo de la línea de contacto la tensión sea inferior a un cierto valor mínimo - para el cual el equipo de la locomotora ha sido establecido.

La ubicación de los trenes es por definición dato del problema, ya que el número de trenes a operarse en cada tramo se obtiene de los pronósticos de tráfico previstos en el estudio.

En lo que concierne a las corrientes que demanda la carga, si admitimos que una locomotora debe en un cierto punto desarrollar una potencia dada, la corriente demandada depende de la tensión en el pantógrafo, por lo tanto de la caída de tensión.

Podemos considerar en general que las corrientes demandadas por la carga, son datos variables a lo largo de la línea según el perfil, curvatura y velocidades previstas.

Todas estas variables son consideradas y evaluadas para poder

dar una ubicación tentativa de las subestaciones.

Del modelo de caída de tensión podemos ver en el diagrama vectorial de la figura 8, que el triángulo  $a b c$  gira alrededor del punto  $a$ , según el ángulo  $\theta$ , correspondiente al factor de potencia de la locomotora. Y que mientras su lado  $ac$ , se encuentre en lo posible paralelo al vector  $\bar{E}_r$  disminuye la caída de tensión de la línea.

De aquí la necesidad de utilizar máquinas que tengan buen factor de potencia.

Otra medida para disminuir la caída de tensión, es la de conectar un condensador en serie en el circuito secundario del transformador de la subestación, en este caso el condensador en serie compensará la impedancia de caída del transformador de la subestación.

## MODELO DE CAIDA DE TENSION

$E_s$  = Tensión de la fuente [V]

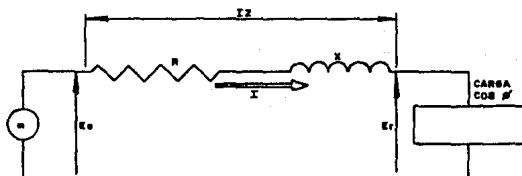
$E_r$  = Tensión de la carga [V]

$E_o$  = Caída de tensión circuito de alimentación [V]

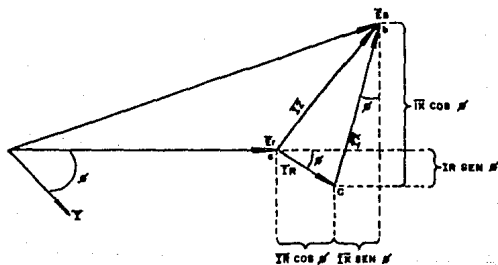
$I$  = Corriente de carga [A]

$\cos \beta$  = Factor de potencia de la locomotora

$R + jX$  = Impedancia del circuito de alimentación [Ω]



## DIAGRAMA VECTORIAL



$$E_s = \sqrt{[E_r + I(R \cos \beta + X \sin \beta)]^2 + [IX \cos \beta - R \sin \beta]^2} \text{ [V]}$$

En esta fórmula, el segundo término es pequeño comparado con el primero, por tanto:

$$E_s \approx E_r + I(R \cos \beta + X \sin \beta) \text{ [V]}$$

$$E_o = E_s - E_r \approx I(R \cos \beta + X \sin \beta) \text{ [V]}$$

Figura No. 8

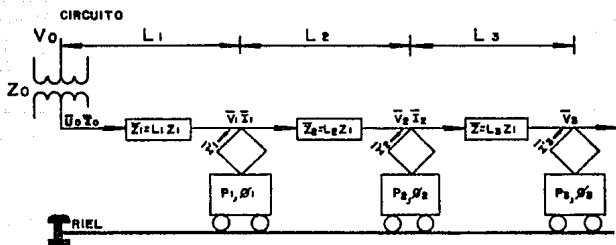


### III.4 DIAGRAMA VECTORIAL DE UNA DISTRIBUCION DE TRENES

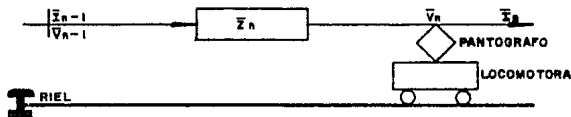
CONSTANTES: Tension en la red Primaria ( $V_0$ ), impedancia de línea y en la subestación ( $Z_n, Z_0$ )

DATOS: Número de trenes ( $n$ ), Potencia ( $P_n$ ), Factor de potencia ( $\cos \mu$ ) y posición de cada tren ( $L_n$ )

INCOGNITAS: Corrientes y tensiones en líneas ( $I_n, \bar{X}_n, V_n$ ) y potencia de la subestación ( $U_0, \bar{X}_0, \cos \mu'$ )



#### ECUACIONES GENERALES DEL CIRCUITO

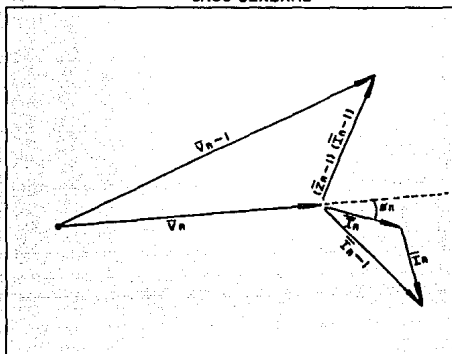


Conociendo la potencia mecánica de la locomotora, su factor de potencia y la tensión en catenaria ( $P_n, \cos \beta_n, V_n$ ); obtenemos

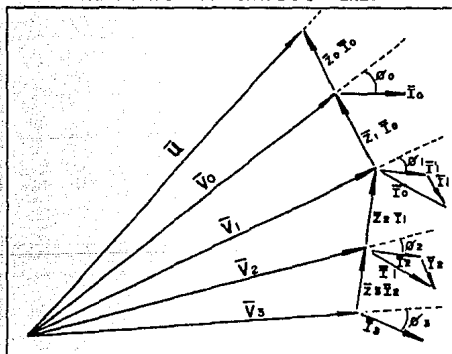
$$\begin{cases} P_n = V_n I_n \cos \beta_n \\ I_n = \frac{P_n}{V_n \cos \beta_n} \\ \bar{I}_n - 1 = \bar{I}_n + \bar{I}_n \\ \bar{V}_n - 1 = \bar{I}_n - 1 \times \bar{Z}_n + \bar{V}_n \end{cases}$$

# DIAGRAMA VECTORIAL

## CASO GENERAL



## PARA UNA DISTRIBUCION DE 3 TRENES



## C A P I T U L O   I V

### DESEQUILIBRIOS PRODUCIDOS EN LA RED PUBLICA TRIFASICA DEBIDO A LA CARGA MONOFASICA FERROVIARIA

#### IV.1 Descripción del Fenómeno

Las características ideales de una carga.

Las principales condiciones que debe cumplir una carga para - provocar un mínimo de perturbaciones a la red de alimentación trifásica, son las siguientes:

1. Debe estar equilibrada entre las tres fases.
2. Debe ser constante o sus variaciones en el tiempo deben ser lentas.
3. Las fallas que pueda presentar deberán ser ocasionales y no aportar a la línea variaciones bruscas.
4. Su factor de potencia deberá estar cercano a la unidad.
5. No deberá producir armónicas con riesgo de que altere la tensión en la línea.

Cuando a una red trifásica equilibrada y simétrica, (ver figura 9) se le conecta una carga monofásica relativamente elevada, sucede lo siguiente:

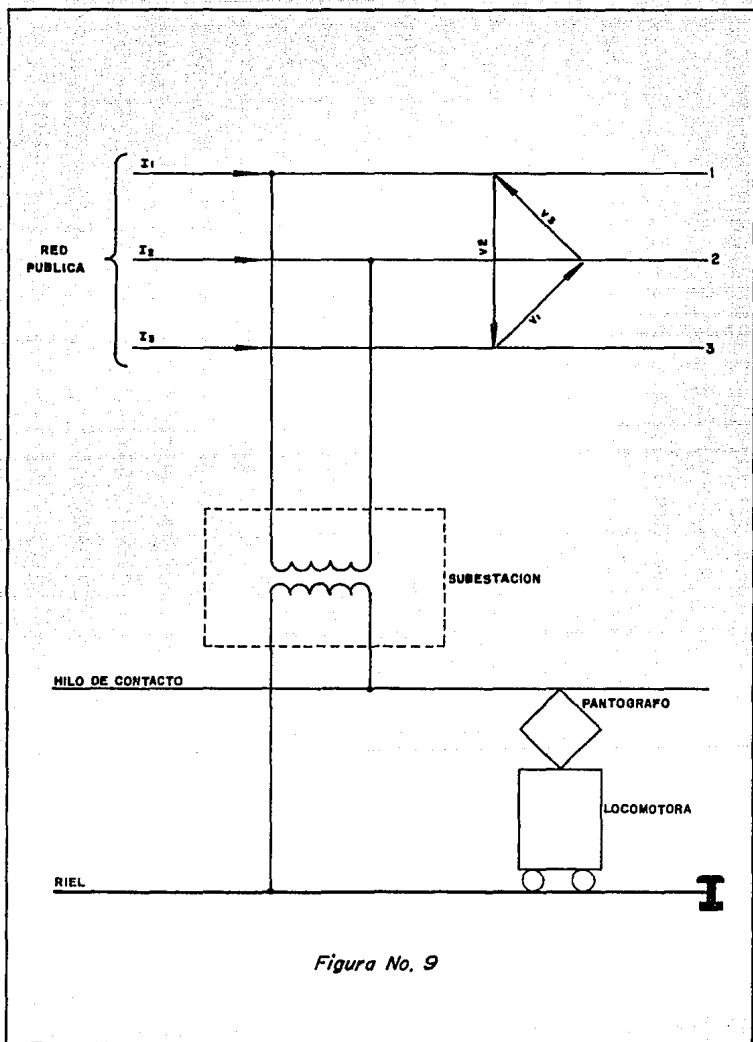


Figura No. 9

- Las corrientes de la línea  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , no son iguales entre sí, ni están igualmente defasadas entre ellas; este desequilibrio de corrientes incide negativamente sobre las condiciones de operación de las máquinas generadoras de energía.
- Las diferentes corrientes que circulan por la red de alta tensión, producen caídas de tensión desiguales entre sí en los tres conductores, desequilibrando las tensiones de alimentación entre fases en el punto de conexión  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$ . Este desequilibrio de tensiones produce un mal funcionamiento en los equipos de los usuarios conectados a la red pública.
- La corriente de carga de la locomotora eléctrica no es senoidal sino prácticamente cuadrada, debido principalmente a las autoinducciones del equipo de rectificación. Esto origina una distorsión de la forma de onda de tensión, lo cual equivale a generar armónicas.

Es indispensable considerar los puntos antes mencionados al dimensionar la red de tracción ferroviaria.

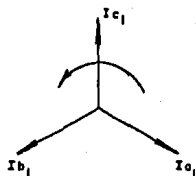
## IV.2 Cálculo de la Corriente Desbalanceada por medio de Componentes Simétricas

Breve resumen de las componentes simétricas.

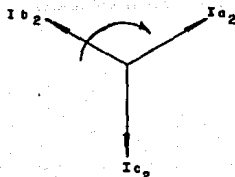
Se puede descomponer un sistema trifásico desequilibrado en tres sistemas trifásicos simétricos.

Las componentes simétricas para tensión o corriente se identifican como:

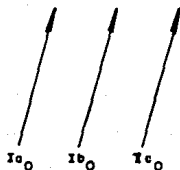
SECUENCIA POSITIVA



SECUENCIA NEGATIVA



SECUENCIA CERO

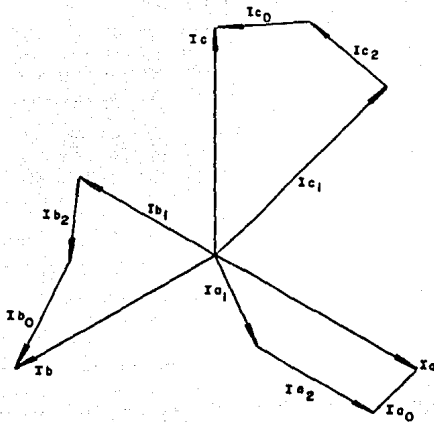


El sistema trifásico desbalanceado es fácil de graficar si aplicamos las siguientes relaciones:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}$$



Descomposición en componentes simétricas.

El operador "a" es un vector de magnitud unitaria y dirección  $120^\circ$ , que puesto en su forma cartesiana será:

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

De la misma manera el operador  $a^2$  será un vector de magnitud unitaria y dirección  $240^\circ$ , que puesto en forma cartesiana será:

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

y finalmente el operador  $a^3$  será un vector de magnitud unitaria



ria y ángulo cero grados.

Aplicando el operador "a" a un vector en particular, este vector no cambiará su magnitud, solamente su dirección que será adelantada de acuerdo al ángulo asociado con el operador "a".

La propiedad de uso más general en el desarrollo de relaciones entre componentes simétricas es la anotada enseguida:

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

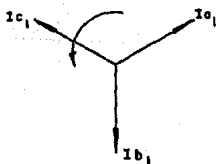
$$a^2 = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

---


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

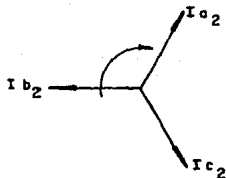
de donde  $a^2 + a + 1 = 0$

El operador "a" aplicado a las componentes simétricas del sistema trifásico desbalanceado da las siguientes relaciones:



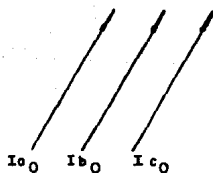
$$I_{b1} = a^2 I_{a1}$$

$$I_{c1} = a I_{a1}$$



$$I_{b2} = a I_{a2}$$

$$I_{c2} = a^2 I_{a2}$$



$$I_{b0} = I_{a0}$$

$$I_{c0} = I_{a0}$$

Por lo que las relaciones:

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

$$I_b = I_{b_1} + I_{b_2} + I_{b_0}$$

$$I_c = I_{c_1} + I_{c_2} + I_{c_0}$$

se transforman en:

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

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

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

que expresado en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a_0} \\ I_{a_1} \\ I_{a_2} \end{bmatrix}$$

si denominamos:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

la inversa de "A" será:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

puesto que se cumple:

$$AA^{-1} = I$$

donde I es igual a:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

entonces

$$I\phi = AIs$$

$$A^{-1}I\phi = Is$$

que equivale a:

$$\begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix}$$

o bien

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

$$3I_{a_1} = I_a + aI_b + a^2I_c$$

$$3I_{a_2} = I_a + a^2I_b + aI_c$$

en nuestro caso como  $I_a + I_b + I_c = 0$  implica que  $I_{a_0} = I_{b_0} = I_{c_0} = 0$  es decir que no existen componentes de se cuencia cero.

Debido a lo anterior estamos en posibilidad de calcular:

- a) Las cantidades de fase conocidas las componentes simétricas.
- b) Las componentes simétricas en función de las cantidades de fase.

Siempre y cuando se respeten estrictamente las reglas que li mitan el uso de las componentes simétricas.

1. Tensiones de secuencia positiva, negativa o cero inducen únicamente corrientes de secuencia positiva, negativa o cero respectivamente

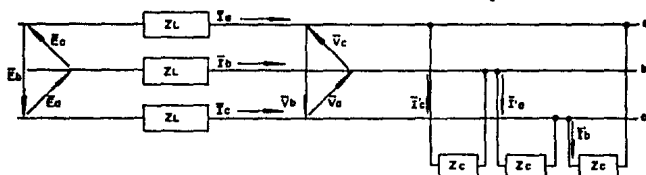
2. Corrientes de determinada secuencia, sólo podrán producir tensiones de esa misma secuencia.
3. Los puntos anteriores se resumen diciendo que: no existe interacción entre secuencias distintas.
4. Los elementos activos de la red sólo generan tensiones de secuencia positiva. Lo anterior es obvio, para que una máquina genere tensiones de secuencia negativa tendría que girar en sentido contrario; sería así mismo imposible que  $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$ , fueran iguales en magnitud y estuvieran en fase, característica de las cantidades de secuencia cero.
5. Las tensiones de secuencia negativa y cero se consideran generadas en el punto de falla, disminuyen en magnitud tan pronto nos alejamos de ese punto.
6. La tensión de secuencia positiva es cero en el punto de falla y máximo en los puntos de generación.
7. Como las corrientes de secuencia cero están en fase y tienen la misma magnitud, necesitan del neutro con conexión a tierra para poder circular.

Efectuando un análisis vectorial de la red trifásica al conectarse la carga monofásica; se consideran tres casos:

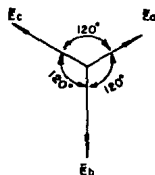
- 1.- Red trifásica equilibrada
- 2.- Red trifásica no equilibrada
- 3.- Caso general de desequilibrio de una red trifásica

## I. RED TRIFASICA EQUILIBRADA

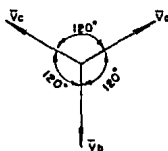
En una red trifásica equilibrada tendremos la siguiente distribución de tensiones y corrientes:



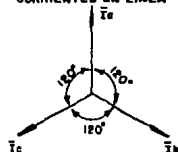
TENSIONES ENTRE FASES EN LOS BORNES DEL GENERADOR



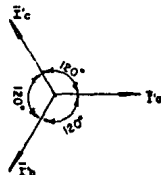
TENSIONES EN LINEA ENTRE FASES



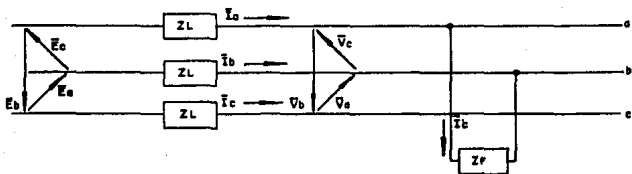
CORRIENTES EN LINEA



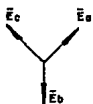
CORRIENTES EN LAS CARGAS



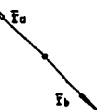
## 2. RED TRIFASICA NO EQUILIBRADA



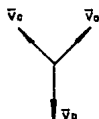
TENSIONES ENTRE FASES EN LOS BORNES DEL GENERADOR



CORRIENTE EN LINEA



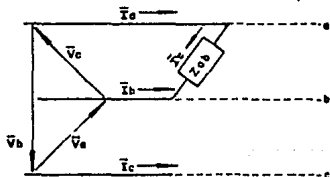
TENSIONES EN LINEA ENTRE FASES



CORRIENTE EN LA CARGA



En una red trifasica con carga monofasica única la distribución de corrientes en la línea es tal que:

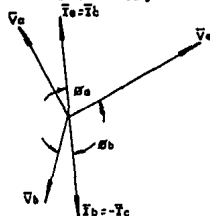


$$\vec{I}_a = \vec{I}_c$$

$$\vec{I}_b = -\vec{I}_c$$

$$\vec{I}_c = 0$$

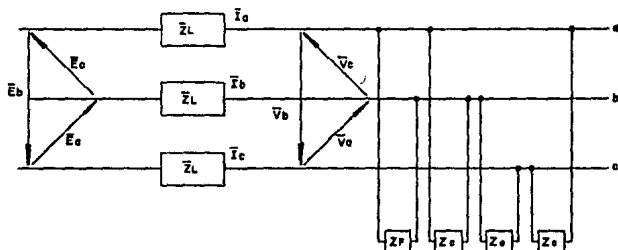
Diagrama vectorial de tensiones y corrientes



La corriente que circula por la línea  $\vec{I}_a = -\vec{I}_b = \vec{I}_c$ , es la que se origina en la carga  $Z_{ab}$  al aplicar en ella la tensión  $V_c$   
Es decir:

$$\vec{I}_c = \frac{V_c}{Z_{ab}} \text{ e } \varphi = \arctan \frac{R_{ab}}{X_{ab}}$$

### 3. CASO GENERAL DE DESEQUILIBRIO DE UNA RED TRIFASICA



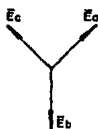
Las tensiones entre fases no son iguales entre si, ni simétricas, pero se cumple que:

$$\bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{V}_c = 0$$

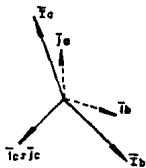
Las corrientes en línea no son iguales entre si, ni simétricas, pero se cumple que:

$$\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = 0$$

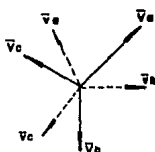
TENSIONES ENTRE FASES A LA SALIDA DEL GENERADOR



CORRIENTES EN LINEAS



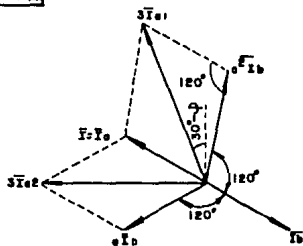
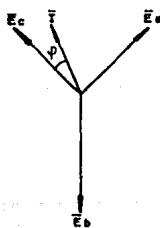
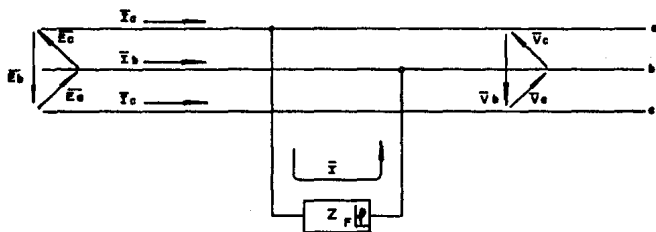
TENSIONES ENTRE FASES



Las líneas punteadas corresponden a las tensiones y corrientes existentes antes de introducir la carga monofásica.



Calculo de los componentes de secuencia positiva y negativa de la corriente para una carga monofasica entre las fases a y b



$$\bar{I}_{a1} = \frac{\bar{I}_a + a^2 \bar{I}_b + a \bar{I}_c}{3} = \frac{\bar{I}}{\sqrt{3}} \quad | \quad 30^\circ - \varphi$$

$$\bar{I}_{a2} = \frac{\bar{I}_a + a \bar{I}_b + a^2 \bar{I}_c}{3} = \frac{\bar{I}}{\sqrt{3}} \quad | \quad 90^\circ - \varphi$$

$$\bar{I}_{a0} = 0$$

#### IV.3 Determinación del Coeficiente de Disimetría Introducido en la Red Trifásica por una Conexión Monofásica entre dos Fases

Consideremos una red reducida a la forma elemental representada por la figura 10, compuesta de un generador "G", un receptor trifásico equilibrado "R" y una carga monofásica conectada entre las fases 2 y 3 en el punto "P".

El objeto es calcular el coeficiente de disimetría, es decir la relación

$$K = \frac{V_i}{V_d}$$

Entre el valor de la componente de secuencia negativa "Vi" de la tensión en los bornes del circuito monofásico conectado en el punto "P" y la componente de secuencia positiva "Vd" en el mismo punto.

Datos del Problema:

E fuerza electromotriz del generador "G".

Z'd impedancia de secuencia positiva de la parte de la red situada a la izquierda de "P".

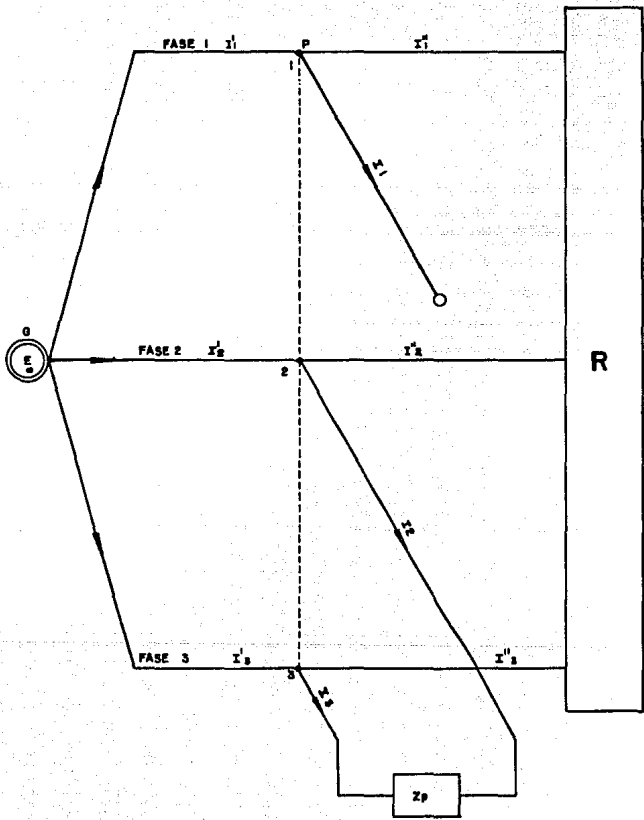


Figura No. 10

- $Z'i$  impedancia de secuencia negativa de la parte de la red situada a la izquierda de "P".
- $Z'd$  impedancia de secuencia positiva de la parte de la red situada a la derecha de "P"; comprende la impedancia equivalente a la potencia trifásica equilibrada de los receptores.
- $Z''i$  impedancia de secuencia negativa de la parte de la red situada a la derecha de "P".
- $Z_p$  impedancia, representada por la carga monofásica conectada en el punto "P" entre las fases 2 y 3.

Escribiremos las relaciones que caracterizan la disimetría - creada en el punto "P", por la conexión monofásica entre las fases 2 y 3, expresando los diferentes valores de corrientes y de tensiones contenidas en estas relaciones en función de sus componentes simétricas.

Escribiremos enseguida que las leyes de ohm y de Kirchhoff, - son satisfechas por estas componentes simétricas en el sistema de secuencia positiva y negativa equivalentes en la red. La conexión monofásica fue efectuada entre fases, el sistema de secuencia cero no interviene en el cálculo.

Relaciones que caracterizan la disimetría en el punto "P".

Tenemos:

$$(1) \quad I_1 = 0$$

$$(2) \quad I_2 = -I_3$$

$$(3) \quad V_2 - V_3 = Z_p I_2$$

Expresando  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $V_2$  y  $V_3$  en función de sus componentes simétricas y substituyendo estos valores en las ecuaciones (1), (2) y (3).

$$I_1 = I_0 + I_1 + I_d$$

$$I_2 = I_0 + aI_1 + a^2I_d$$

$$I_3 = I_0 + a^2I_1 + aI_d$$

$$V_2 = V_0 + aV_1 + a^2V_d$$

$$V_3 = V_0 + a^2V_1 + aV_d$$

Obtenemos:

$$(1') \quad I_0 + I_1 + I_d = 0$$

$$(2') \quad I_0 + aI_1 + a^2I_d = -I_0 - a^2I_1 - aI_d$$

$$(3') \quad V_0 + aV_1 + a^2V_d - V_0 - a^2V_1 - aV_d =$$

$$(I_0 + aI_1 + a^2I_d) Z_p$$

La ecuación (2') puede escribirse, pasando todos los términos al primer miembro y reemplazando  $a+a^2$  por su valor  $-1$

$$(2'') \quad 2I_0 - I_1 - I_d = 0$$

La relación (3') se puede escribir, pasando todos los términos al primer miembro.

$$(3'') \quad Z_p I_0 + a Z_p I_1 + a^2 Z_p I_d + (a^2 - a) V_i + (a - a^2) V_d = 0$$

Relaciones que expresan que las leyes de ohm y de Kirchhoff - son satisfechas en los sistemas de secuencia positiva y negativa equivalentes en la red.

Tomando como sentido de referencia para los dos sistemas aquél indicado por las flechas de la red, escribiremos:

$$(4) \quad Z'_d I'_d = E - V_d$$

$$(5) \quad Z''_d I''_d = V_d$$

$$(6) \quad I'_d = I_d + I''_d$$

$$(7) \quad Z'_i I'_i = - V_i$$

$$(8) \quad Z''_i I''_i = V_i$$

$$(9) \quad I'_i = I_i + I''_i$$

Estas seis relaciones constituyen con las ecuaciones (1'), (2') y (3') un sistema de nueve ecuaciones con nueve incógnitas, que podemos ordenar como sigue:

$$\begin{array}{rcl}
 Z'dI'd & + V_d & = E \\
 Z''dI''d & - V_d & = 0 \\
 Z'iI'i & + V_i & = 0 \\
 Z''iI''i & - V_i & = 0 \\
 Z_p I_0 + a Z_p I_1 + a^2 Z_p I_d + (a^2 - a) V_i + (a - a^2) V_d & = & 0 \\
 2I_0 - I_1 - I_d & & = 0 \\
 I_0 + I_1 + I_d & & = 0 \\
 -I'd + I''d & + I_d & = 0 \\
 -I'i + I''i + I_1 & & = 0
 \end{array}$$

El coeficiente de disimetría "K" es igual a la relación entre la tensión de secuencia negativa "Vi" y la tensión de secuencia positiva "Vd", es necesario calcular estas tensiones cuyos valores son respectivamente:

$$V_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta} \qquad V_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta}$$

$\Delta$  ,  $\Delta V_i$  ,  $\Delta V_d$  , representan respectivamente los valores del determinante principal, del determinante de la tensión de secuencia negativa "Vi", y del determinante de la tensión

de secuencia positiva "Vd".

El coeficiente de disimetría será entonces:

$$K = \frac{\Delta V_i}{\Delta V_d}$$

Es necesario calcular  $\Delta V_i$  y  $\Delta V_d$ .

El determinante de la tensión de secuencia negativa es:

$$\Delta V_i = \begin{vmatrix} Z'd & . & . & . & . & . & E & +1 \\ . & Z''d & . & . & . & . & . & -1 \\ . & . & Z'i & . & . & . & . & . \\ . & . & . & Z''i & . & . & . & . \\ . & . & . & . & Z_p & aZ_p & a^2Z_p & (a-a^2) \\ . & . & . & . & +2 & -1 & -1 & . \\ . & . & . & . & +1 & +1 & +1 & . \\ -1 & +1 & . & . & . & . & +1 & . \\ . & . & -1 & +1 & . & +1 & . & . \end{vmatrix} = 3(a^2-a)Z''dZ'iZ''iE$$



El determinante de la tensión de secuencia positiva es:

$$\Delta V_d = \begin{vmatrix} Z'd & . & . & . & . & . & . & E \\ . & Z''d & . & . & . & . & . & . \\ . & . & Z'i & . & . & . & +1 & . \\ . & . & . & Z''i & . & . & . & -1 \\ . & . & . & . & Z_p & aZ_p & a^2Z_p & (a^2-a) \\ . & . & . & . & +2 & -1 & -1 & . \\ . & . & . & . & +1 & +1 & +1 & . \\ -1 & +1 & . & . & . & . & +1 & . \\ . & . & -1 & +1 & . & +1 & . & . \end{vmatrix} = 3(a^2-a)E \left[ Z''dZ'iZ''i + Z''dZ_p(Z'i+Z''i) \right]$$

De donde el valor de "K"

$$K = \frac{V_i}{V_d} = \frac{3(a^2-a) E Z''d Z'i Z''i}{3(a^2-a) E \left[ Z''dZ'iZ''i + Z''dZ_p(Z'i + Z''i) \right]}$$

dividiendo los dos términos de la fracción por

$$3(a^2-a)EZ''d(Z'i + Z''i)$$

$$K = \frac{\frac{Z'iZ''i}{Z'i + Z''i}}{\frac{Z'iZ''i}{Z'i + Z''i} + Z_p}$$

La expresión  $\frac{Z'_{1}Z''_{1}}{Z'_{1} + Z''_{1}}$  representa la impedancia de secuencia negativa equivalente de las impedancias de secuencia negativa  $Z'_{1}$  y  $Z''_{1}$ , conectadas en paralelo, es decir la impedancia de secuencia negativa de la red vista del punto "P", impedancia que designaremos por  $Z_{e1}$  (impedancia equivalente de secuencia negativa).

$$\frac{1}{Z_{e1}} = \frac{1}{Z'_{1}} + \frac{1}{Z''_{1}} = \frac{Z'_{1} + Z''_{1}}{Z'_{1} Z''_{1}}$$

de donde  $Z_{e1} = \frac{Z'_{1}Z''_{1}}{Z'_{1} + Z''_{1}}$

El coeficiente de disimetría, puede escribirse:

$$K = \frac{Z_{e1}}{Z_{e1} + Z_p}$$

expresión que muestra que el coeficiente de disimetría en los bornes del circuito monofásico conectado, depende en definitiva de las impedancias de secuencia negativa de la red y de la impedancia equivalente de la carga monofásica.

Supongamos ahora que " $Z_{e1}$ " sea equivalente a " $Z_{e2}$ ", impedancia de secuencia positiva de la red, vista desde el punto de conexión. La puesta en corto circuito de las 3 fases de la red trifásica en este punto correspondería a una potencia.

$$S = P_{cc} = E I \sqrt{3}$$

con: 
$$I = \frac{E}{Z_{ed} \sqrt{3}}$$

de donde: 
$$Z_{ed} = Z_{ei} = \frac{E^2}{P_{cc}}$$

con E = fuerza electromotriz entre fases actuando sobre la red.

Suponemos igualmente que la tensión "V" en los bornes de la conexión monofásica sea un poco diferente de "E"; la corriente monofásica de la conexión tiene por valor E/Z<sub>p</sub>, la potencia aparente "P<sub>m</sub>" en el punto de conexión será dada por:

$$P_m = \frac{E^2}{Z_p}$$

podemos entonces escribir:

$$K = \frac{V_i}{V_d} = \frac{Z_{ei}}{Z_{ei} + Z_p} = \frac{\frac{E^2}{P_{cc}}}{\frac{E^2}{P_{cc}} + \frac{E^2}{P_m}} = \frac{P_m}{P_m + P_{cc}}$$

donde, en primera aproximación, considerando que "P<sub>m</sub>", es pequeña ante "P<sub>cc</sub>".

$$K = \frac{P_m}{P_{cc}}$$

## C A P I T U L O   V

### ESQUEMAS DE SUBESTACIONES DE TRACCION ELECTRICA MONOFASICA 25 Kv, 60 Hz

## V.1 Esquema en Alta Tensión

Es en este punto en el que la subestación de tracción eléctrica se enlaza a la red de energía pública (alta tensión). Sabemos que debido a las grandes potencias demandadas por los equipos de tracción, la red de energía es susceptible de desequilibrarse provocando a los usuarios molestias ocasionadas por el mal funcionamiento de sus equipos conectados a la red. Es indispensable que el sistema de tracción eléctrica perturbe en lo mínimo la red de energía pública.

Por consiguiente, son la potencia y la seguridad las dos condiciones principales a las que debe responder una buena alimentación de las subestaciones de tracción.

Las subestaciones de tracción deben ser por lo tanto enlazadas a líneas de gran capacidad, ya que son éstas las que responden a las necesidades de la gran demanda de energía, siendo así podemos decir que el conjunto de la red puede asegurar la primera condición.

Queda claro entonces el interés de enlazar las cargas monofásicas a las líneas cuya potencia de corto circuito es elevada.

Para satisfacer la segunda condición, la conexión de la subes

tación de tracción a la red pública se realiza generalmente - por una doble alimentación.

- sea por desviación de líneas existentes
- sea por construcción de nuevas líneas
- sea por acometidas provenientes de las centrales de energía próximas.

A fin de garantizar una transmisión óptima de energía a la lo comotora a través de la catenaria, la energía suministrada de berá cumplir las exigencias fundamentales siguientes:

1. La corriente que fluye por la línea de contacto debe presentarse en forma senoidal. Es decir, no debe estar afectada por armónicas susceptibles de producir una carga suplementaria en los transformadores y gene radores de la red de alimentación. En los sistemas que funcionan a  $16 \frac{2}{3}$  Hz, la amplitud de la tercera armónica de la tensión es muy grande. Esta armónica se debe entre otros, a la corriente de magnetización de los transformadores. En el momento de paso por ce ro esta corriente alcanza su valor de pico, de esta forma se reducen la oscilación de la tensión y la po tencia que puede suministrarse.

2. La corriente que fluye por la línea de contacto debe estar en fase con la tensión. La potencia se obtiene multiplicando la corriente por la tensión. Si están en fase, el producto es siempre positivo y la potencia reactiva es nula. En este caso la tensión instalada y la corriente máxima admisible pueden utilizarse como potencia activa. Sin embargo, durante la transmisión del generador a la locomotora a través de las líneas de alimentación, la energía sufre caídas de tensión y no es posible obtener una alimentación sin potencia reactiva alguna.
  
3. La alimentación de energía debe estar estabilizada. Cada interrupción de la alimentación origina un corte de corriente entre el pantógrafo y la línea de contacto provocando un arco eléctrico. Este fenómeno además de causar un mayor desgaste del hilo de contacto y el pantógrafo, provoca la emisión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia capaces de perturbar las telecomunicaciones.
  
4. La corriente no debe estar afectada por armónicas importantes. Cada diferencia entre la curva de corriente y la senoide produce un gran número de armónicas.



Según su intensidad, las armónicas de cierta frecuencia pueden perturbar los dispositivos de señalización o de comunicaciones.

## V.2 Tipos de Acoplamiento

Existen determinados esquemas eléctricos de conexión a las líneas de alta tensión llamados acoplamientos, que permiten por una parte enlazar el sistema monofásico de tracción a la red pública trifásica y por otra, bajo ciertas circunstancias ayudan a reducir el desequilibrio debido a la carga monofásica.

Los acoplamientos que se utilizan y operan en los ferrocarriles electrificados son:

- Acoplamiento monofásico
- Acoplamiento en V
- Acoplamiento Scott

Los factores que determinan el utilizar un acoplamiento en específico, son objeto de un estudio técnico-económico que toma en cuenta los siguientes parámetros: longitud de la línea, número de subestaciones y si éstas dependen de la misma red de alta tensión, potencia de la red de alta tensión.

La elección será entonces determinada por las características específicas de la línea a electrificar.

Los acoplamientos tienen las siguientes configuraciones:

#### Acoplamiento Monofásico.

La subestación posee un sólo transformador monofásico cuyo primario se conecta a la red trifásica, y su secundario a la red férrea.

Para disminuir el desequilibrio la alimentación de las subestaciones es repartida en fases diferentes, es este acoplamiento el más simple como lo muestra la figura 11.

Esta disposición necesita a lo largo de la línea, la instalación de zonas neutras para evitar los corto circuitos entre fases del secundario de los transformadores, cuyas tensiones se hallan defasadas  $120^\circ$ .

#### Acoplamiento en "V"

En este caso la subestación consta de dos transformadores monofásicos alimentados por fases diferentes, como lo muestra la figura 12.

Se alternan las conexiones en las tres fases. El desequili-

## ACOPLAMIENTO DIRECTO

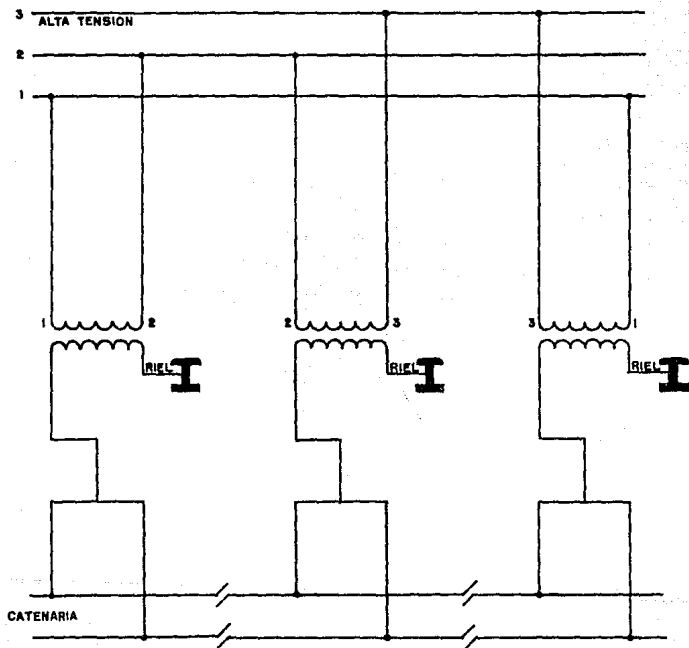
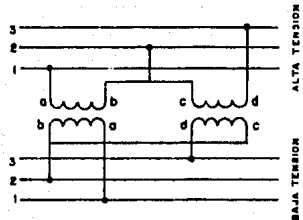
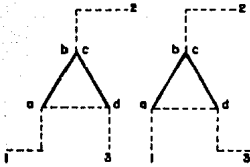


Figura No. 11

# ACOPLAMIENTO EN V

DIAGRAMA VECTORIAL  
DELTA ABIERTA-DELTA ABIERTA



ALTA TENSION  
BAJA TENSION

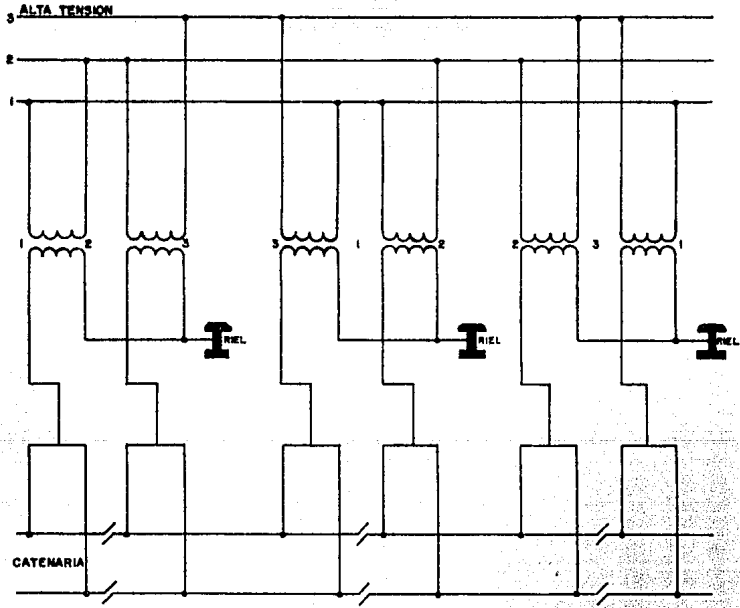


Figura No. 12

brio se atenúa pero no se suprime. Este acoplamiento necesita el doble de zonas neutras que las requeridas para el acoplamiento monofásico.

### Acoplamiento "Scott"

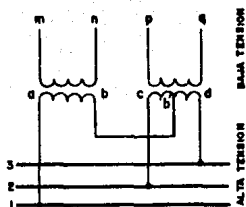
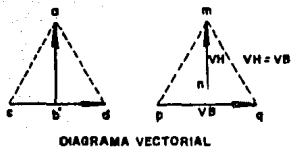
Este acoplamiento utiliza dos transformadores monofásicos cuyos devanados primarios son diferentes y los devanados secundarios son iguales, como lo muestra la figura 13.

Las tensiones secundarias están defasadas  $90^\circ$  y las corrientes en el primario son iguales si los dos devanados secundarios se encuentran igualmente cargados.

Concluyendo, de una manera general los esquemas de conexión trifásica son más costosos y presentan inconvenientes en comparación con la conexión monofásica, a saber:

- número de secciones de separación duplicado.
- necesidad de disponer permanentemente de dos transformadores en servicio lo que resulta en un aumento de las pérdidas en vacío.

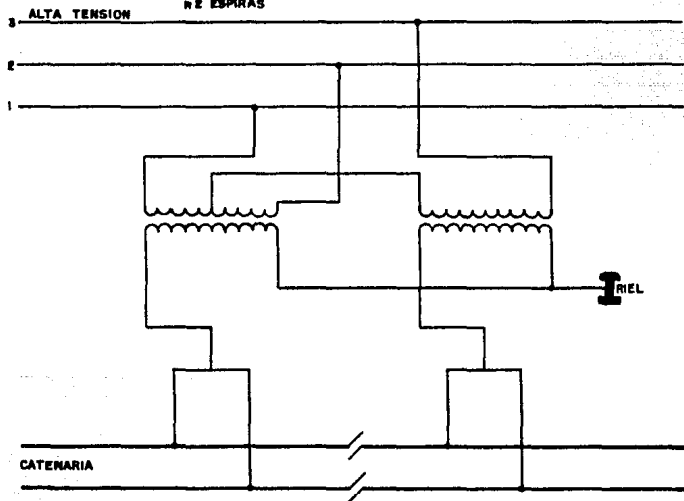
## MONTAJE SCOTT



EL DEVANADO PRIMARIO  $a b'$  TIENE  $n_1 \sqrt{\frac{3}{2}}$  ESPIRAS

EL DEVANADO PRIMARIO  $c d$  TIENE  $n_1$  ESPIRAS Y UNA SALIDA  $b-b'$

LOS DEVANADOS SECUNDARIOS TIENEN CADA UNO  $n_2$  ESPIRAS



*Figura No. 13*

- mala utilización de la potencia instalada.

La atenuación de los desequilibrios debida a los acoplamientos en "V" y "Scott", en relación con el acoplamiento monofásico se revela muchas veces ilusoria ya que la eficacia de estos montajes aparece solamente cuando el tráfico está bastante equilibrado en las dos antenas, lo que raramente se presenta.

### V.3 Alimentación a Catenarias

En tracción monofásica el esquema de alimentación en antena, consiste en alimentar las catenarias a partir de las subestaciones hasta las secciones de separación situadas a la mitad del intervalo entre subestaciones.

Generalmente las subestaciones contiguas no pueden conectarse en paralelo por la siguiente razón:

Las tensiones que proceden del acoplamiento monofásico en "V" o "Scott", se encuentran defasadas; debido a ésto a media distancia entre dos subestaciones existe una sección de separación llamada Puesto de Secciona-

miento (PS). Lo que da como resultado que cada subestación alimenta dos sectores en antena.

Llamamos sector al conjunto de catenarias alimentadas normalmente por un disyuntor, éste alimenta dependiendo del caso una o dos vías situadas de un mismo lado de la subestación.

El sector comprende por tanto todas las catenarias situadas entre la subestación y el puesto de seccionamiento que lo separa de la próxima subestación.

Las secciones de separación tienen una longitud tal que los pantógrafos de dos locomotoras acopladas no pueden provocar la puesta en paralelo intempestiva de dos antenas alimentadas por fases diferentes.

Existen asimismo entre las secciones de separación y la subestación Puestos de Subseccionamiento (PSS), como lo muestra la figura 14.

En vía doble, cada sector conectado en paralelo atenúa los valores de impedancia de las catenarias y reduce las caídas de tensión en la línea.

Los puestos de seccionamiento aseguran por una parte la sepa-



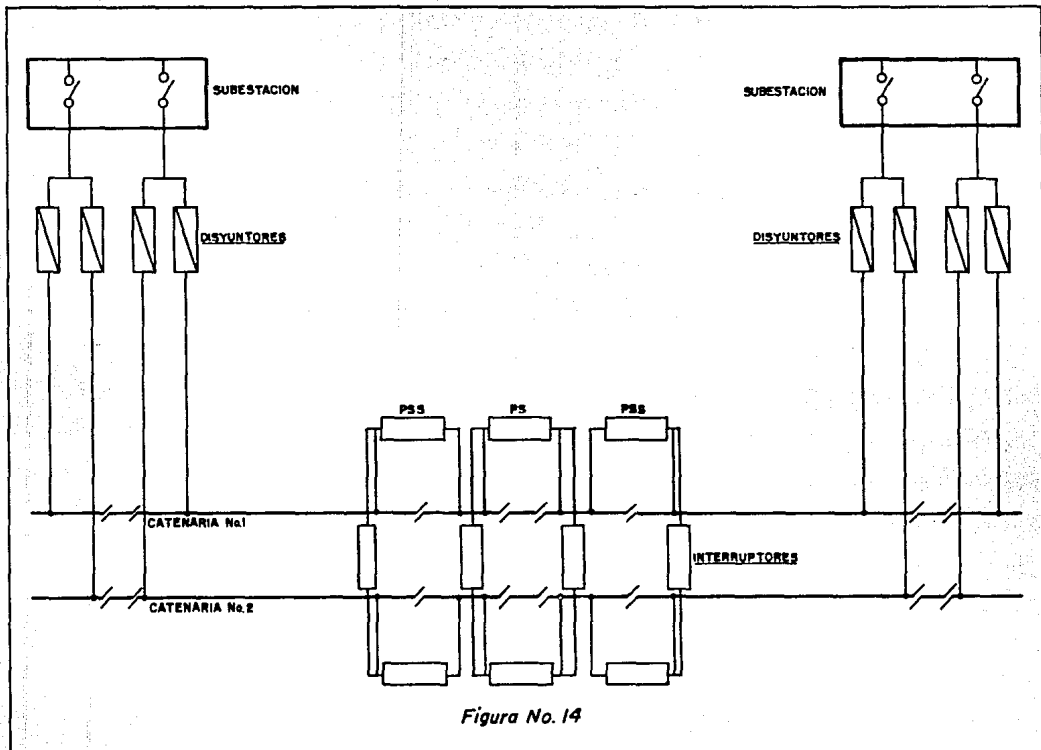


Figura No. 14

ración de los sectores alimentados por fases diferentes y por otra la puesta en paralelo de las catenarias de cada sector.

Es por razones de explotación y mantenimiento, que las catenarias son seccionadas en un cierto número de tramos que pueden ser aislados eléctricamente unos de otros.

Se puede entonces suprimir la tensión en un tramo de la línea en caso de incidente o mantenimiento, manteniendo los movimientos de los trenes en las zonas que no estén en revisión o reparación.

## A P E N D I C E

## ESQUEMAS DE ALIMENTACION PARA LA ELECTRIFICACION DE LA LINEA MEXICO - IRAPUATO

### 1. Fuentes de Alimentación de Alta Tensión

El estudio preliminar de electrificación de la vía ferroviaria México-Irapuato indicó que las potencias medias susceptibles de ser captadas por las subestaciones, permitían una alimentación monofásica directa de las redes de alta tensión presentando potencias de Corto Circuito superiores a 750 MVA en 1983 y a 1250 MVA en 2003.

En base a lo anterior y considerando las redes de alimentación en el centro del país, se tiene lo siguiente:

El Valle de México posee varias centrales que alimentan una red de 85 KV la cual es perfectamente apta para el suministro de energía en Alta Tensión; especialmente la central térmica situada en Lechería en las cercanías de la vía.

Existen otras centrales térmicas cercanas al trazo de la vía ferroviaria en Tula, Celaya y Salamanca. Estas centrales es-

tán conectadas entre ellas y con unos puestos de transformación en Querétaro e Irapuato por líneas de 230 KV.

Finalmente, se puede alimentar en 115 KV en los puestos de Querétaro Oriente, Celaya e Irapuato.

Las potencias de Corto Circuito en las barras de alta tensión (230 ó 115 KV) de estos puestos, son suficientes para que los desequilibrios provocados por las tomas monofásicas de las subestaciones de tracción queden dentro de los límites admisibles (en este caso son menores al 2%).

## 2. Cantidad, Potencia y Ubicación de las Subestaciones

### a) Número de Subestaciones.

Considerando lo analizado en el Capítulo III para la determinación del número, ubicación y potencia de las subestaciones, se tiene lo siguiente:

Tomando las bases de tráfico previstas para el año 2003, las determinaciones mostraron que las tensiones míni-

mas en el pantógrafo y las corrientes máximas en la catenaria caían dentro de los límites aceptables para unas longitudes de antena de 20 a 25 Km según las características del perfil, de lo que resulta una distancia entre subestaciones de 40 a 50 Km para el sistema de Alimentación Directa, y un poco más del doble para el sistema de Alimentación por Autotransformador.

De lo anterior se desprende que para el sistema de Alimentación Directa se requieren 6 subestaciones entre México y Querétaro y 2 más entre Querétaro e Irapuato, o sea un total de 8 subestaciones entre México e Irapuato.

Para el sistema de Autotransformador se requiere un total de 4 subestaciones.

Para un sistema mixto, se requiere un total de 6 subestaciones.

b) Potencia.

Las potencias instantáneas más altas captadas en la salida de las subestaciones son del orden de 25 MVA para el tráfico en 1983 y de 45 MVA para el tráfico del año 2003.

En alta tensión las potencias correspondientes alcanzan 30 y 50 MVA respectivamente.

c) Ubicación de las Subestaciones para cada Sistema.

i) Sistema de alimentación Directa

Requiere de 8 subestaciones:

Subestación N° 1. - Se implantaría en el Punto Kilométrico (PK) 20 en Lechería en las cercanías de la Central térmica. Su alimentación quedaría asegurada a partir de esta Central en 85 KV por dos líneas muy cortas (1 Km aproximadamente).

Subestación N° 2. - Implantación en el PK 67, cerca de la línea Tula-Atenco en 230 KV. La alimenta

ción de esta subestación requiere la construcción de una línea simple en 230 KV a partir de Tula (13 Km aproximadamente).

Subestación N° 3.- En el PK 108.

Subestación N° 4.- En el PK 152.

Subestación N° 5.- En el PK 194.

Estas tres subestaciones serían alimentadas por la misma línea Tula-Querétaro 230 KV que se desviaría para pasar por cada una de ellas.

Las dimensiones de las líneas dobles por construir serían de 2.5 Km para la SE 3, de 6 Km para la SE 4, y de 3 Km para la SE 5.

NOTA: La SE 5 se encuentra en las cercanías de la línea Querétaro Oriente-San Juan del Río - 115 KV, y pudiera conectarse a esta línea, pero como ya está sobrecargada el desequilibrio que provocará ocasionaría problemas adicionales.



Subestación N° 6.- En el PK 243. Esta subestación tendrá que implantarse en las inmediaciones del Puesto Querétaro Oriente que puede alimentarla en 115 KV.

Subestación N° 7.- Su implantación se haría cerca de Celaya y su alimentación en 115 KV.

Subestación N° 8.- Implantada en Irapuato y alimentada en 115 KV.

Ver Figura A-1.

ii) Sistema de Alimentación por Autotransformador

Requiere de 4 Subestaciones:

Subestación N° 1.- Implantada al igual que en el sistema anterior en Lecharía; y su alimentación sería en 85 KV.

Subestación N° 2.- En el PK 115. Se alimentaría por una desviación de 3 Km aproximadamente, desde la línea Tula-Querétaro en 230 KV.

RED DE ALTA TENSION PARA  
SISTEMA DE ALIMENTACION DIRECTA

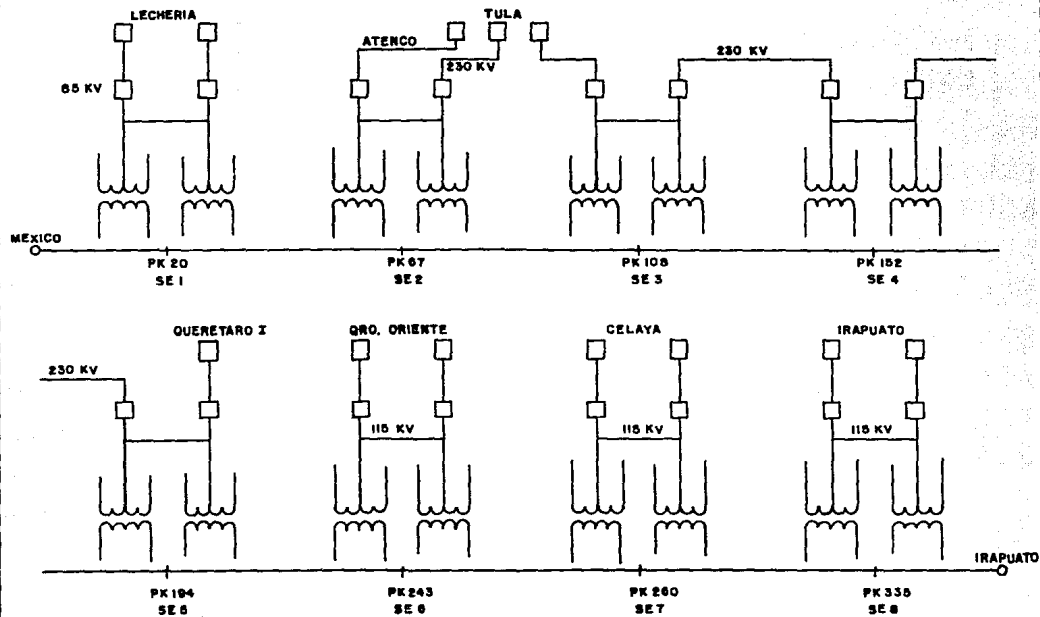


Figura A-1

Subestación N° 3.- En el PK 240. Se alimentaría igualmente por una desviación de 1.5 Km aproximadamente de la línea Tula-Querétaro.

Subestación N° 4.- En el PK 305. Su alimentación puede ser por una desviación de 7 Km aproximadamente de la línea Querétaro- Salamanca.

Ver Figura A-2.

iii) Sistema de Alimentación Mixto

Consiste en conservar las subestaciones 1, 6, 7 y 8 del sistema de Alimentación Directa. Las subestaciones 2, 3, 4 y 5 serían reemplazadas por dos subestaciones de 2 x 25 KV, una en el PK 85 alimentada por una desviación muy corta (100 m aproximadamente) de la línea Tula-Querétaro, y la otra en el PK 175.

Ver Figura A-3.

# RED DE ALTA TENSION PARA SISTEMA DE ALIMENTACION POR AUTOTRANSFORMADOR

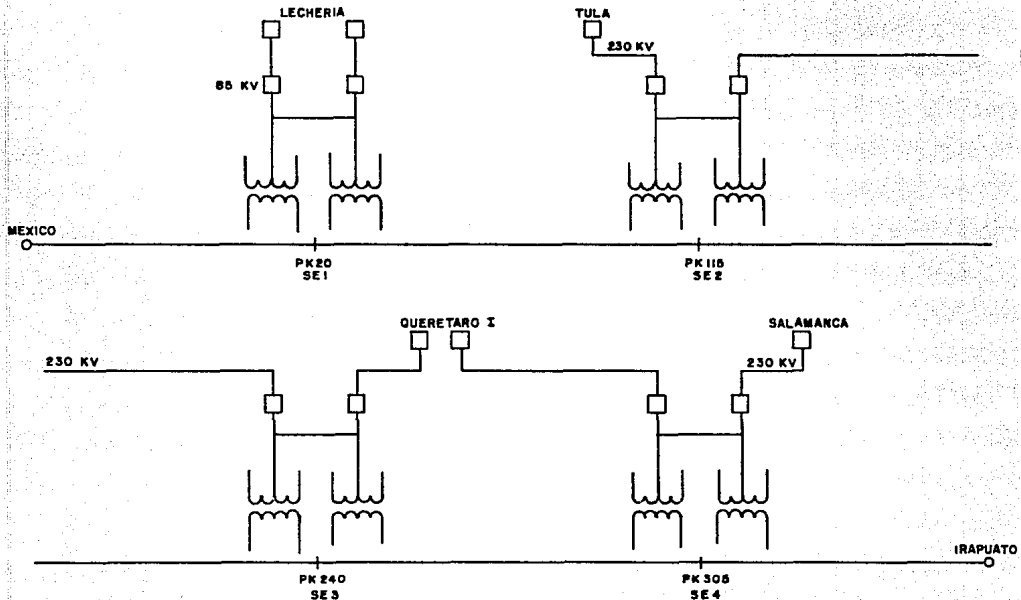


Figura A-2

# RED DE ALTA TENSION PARA SISTEMA DE ALIMENTACION MIXTO

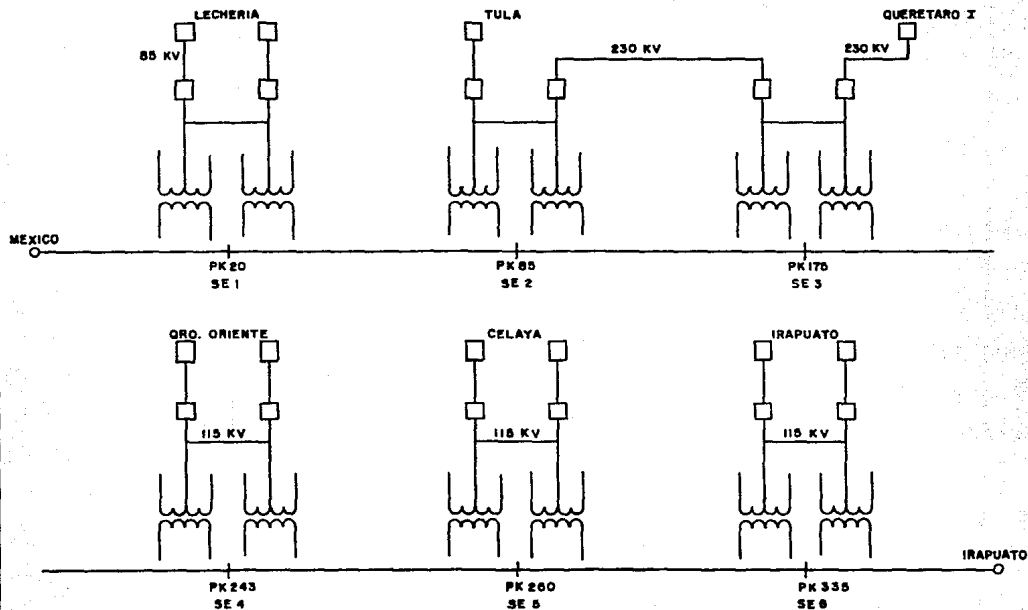


Figura A-3

### 3. Esquemas de Alimentación de las Subestaciones

#### a) Sistema de Alimentación Directa.

Considerando el desequilibrio provocado por la alimentación de las subestaciones, se pudiera conectarlas - directamente entre dos fases de la red de alta tensión, pero la C.F.E. sólo permite alimentaciones trifásicas.

Bajo estas circunstancias, se propone la alimentación a las subestaciones bajo el esquema en "V".

El esquema es el siguiente:

Las líneas de alimentación trifásica en alta tensión llegan a los seccionadores S1 y S2.

Cuando se trata de una alimentación en antena las dos líneas tienen tensión permanente, pero solo una alimenta la subestación en servicio normal (S1 ó S2). En caso de falla, el seccionador que estaba cerrado se abre y la alimentación se reanuda por el cierre del seccionador que se encontraba abierto.

Los transformadores de tracción T1 y T2 se conectan a la alta tensión por medio de disyuntores bipolares D3 y D4. El transformador T1 está alimentado entre A y B y el T2 entre A y C.

Del lado de 25 KV de los transformadores, se conecta por un lado directamente al riel, y por el otro se enlaza con la barra de 25 KV por medio de un seccionador S7 y S8.

En cada barra se conecta un transformador monofásico SA 1 y SA 2 para los servicios auxiliares de la subestación quedando el otro de reserva.

Las catenarias situadas a cada lado de la subestación son alimentadas a partir de las barras de 25 KV, por medio de un disyuntor por dirección el cual protege al conjunto de vías que constituyen el sector (D5 dirección México y D6 Dirección Irapuato).

Después de éstos puntos, la corriente se distribuye a las catenarias por medio de los interruptores I1, I2, I3 e I4.

Como las tensiones suministradas por cada uno de los

transformadores no están en fase, es necesario inte  
rumpir las catenarias en el lugar de la subestación  
por una sección de separación la cual debe ser fran  
queada por las locomotoras. Esta sección corta la co  
rriente y sirve para aislar a los sectores alimenta  
dos por cada uno de los transformadores.

Esta sección es una zona neutra normalmente sin ten  
sión, no obstante un seccionador SN1 y SN2 permite ali  
mentar esta sección para el caso de que una locomoto  
ra estuviera inmovilizada en ella.

Los seccionadores SN1, SN2, SB2 y SM1 están abiertos  
normalmente.

Ver Figura A-4

b) Sistema de Alimentación por  
Autotransformador.

En este sistema, el esquema de alimentación es el mis  
mo que el del punto anterior, excepto por los secunda  
rios de los transformadores ya que en este caso la ten  
sión es de 50 KV.

Una de las salidas alimenta la catenaria y la otra a  
un alimentador. El punto medio del embobinado secun



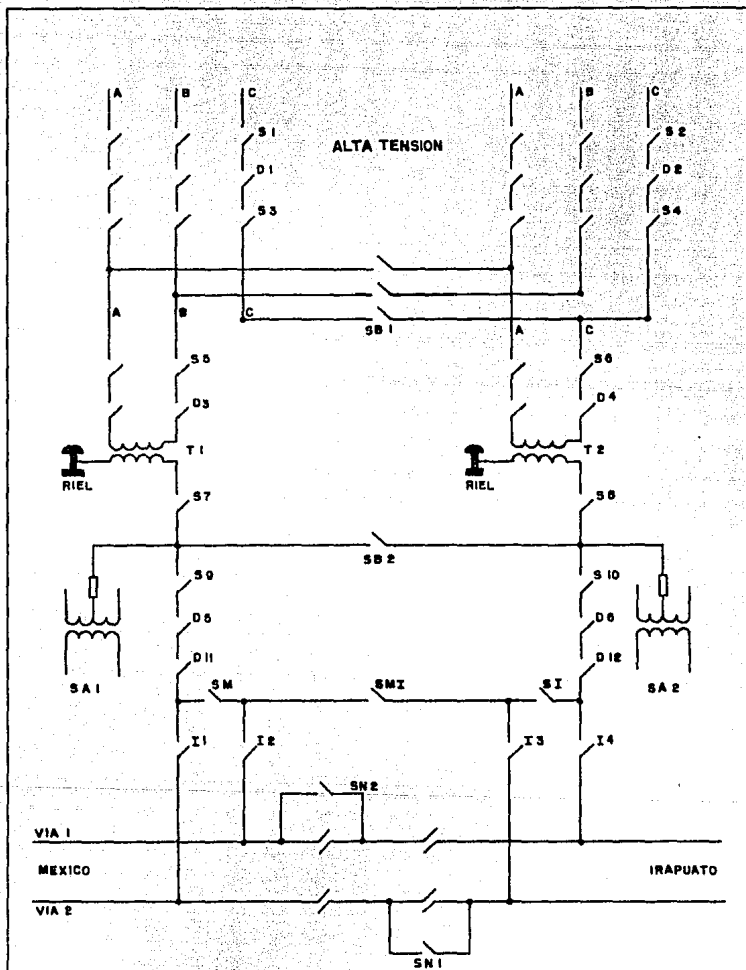


Figura A-4

dario está conectado a los rieles.

Comparando este esquema con el de Alimentación Directa se observa que se duplican los circuitos, por lo que los elementos (seccionadores, interruptores, etc.) son bipolares.

Ver Figura A-5

#### 4. Esquemas de Equipo

El esquema para la ubicación y número de los puestos de vía para cada sistema es como sigue:

a) Alimentación Directa.

Una caseta de seccionamiento principal y de puesta en paralelo entre cada subestación. Un puesto de subseccionamiento y de puesta en paralelo (en cada medio - intervalo) entre subestación y puesto de seccionamiento principal. Un puesto de subseccionamiento y de puesta en paralelo en México y otro entre México y la primera subestación (Lechería), o sea en total:

7 puestos de seccionamiento principal  
16 puestos de subseccionamiento y  
puesta en paralelo

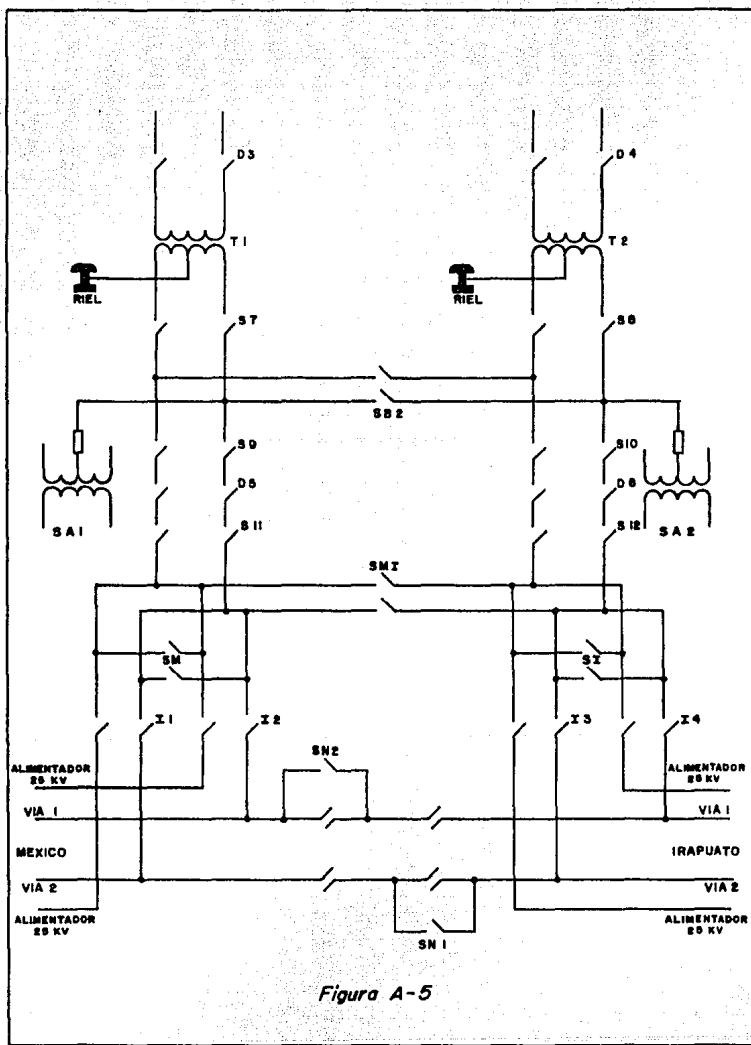


Figura A-5

b) Alimentación por  
Autotransformador.

Un puesto de seccionamiento principal y de puesta en paralelo con autotransformadores en cada vía entre cada subestación. Dos puestos de subseccionamiento y de puesta en paralelo con autotransformadores en la mitad de cada intervalo en cada vía entre subestación y puesto de seccionamiento principal. Un puesto de subseccionamiento y de puesta en paralelo en México y otro entre México y la primera subestación (Lechería). Tres puestos de subseccionamiento y de puesta en paralelo entre la subestación N° 4 - Celaya e Irapuato - (con autotransformadores en cada vía), en total 3 puestos de seccionamiento principales con cuatro autotransformadores en cada uno.

14 puestos de subseccionamiento y puesta en paralelo con dos autotransformadores.

1 puesto de seccionamiento terminal con dos autotransformadores.

c) Alimentación Mixta.

Tres puestos de seccionamiento principal y de puesta en paralelo con autotransformadores, uno entre las subestaciones 2 y 3 (2 x 25 KV) y los otros dos en cada extremo de este tipo de instalación (cerca de Nochistong y Ahorcado). Dos puestos de subseccionamiento y de puesta en paralelo con autotransformador en cada medio intervalo entre la subestación y el puesto de seccionamiento principal.

Una caseta de seccionamiento principal y de puesta en paralelo entre cada subestación 4, 5 y 6 (25 KV). Un puesto de subseccionamiento y de puesta en paralelo en cada medio intervalo entre la subestación (25 KV) y el puesto de seccionamiento principal. Un puesto de subseccionamiento y de puesta en paralelo en México y otro entre México y la primer subestación, en total:

- 2 puestos de seccionamiento principal con cuatro autotransformadores.
- 2 puestos de seccionamiento principal (25 KV).
- 8 puestos de subseccionamiento y puesta en paralelo con autotransformadores.
- 8 puestos de subseccionamiento y puesta en paralelo (25 KV).

2 puestos de seccionamiento principal con dos autotransformadores.

#### 5. Catenaria

Para la determinación de la catenaria se consideró el sistema más sencillo que es el de Alimentación Directa en 25 KV, y con la posibilidad de alcanzar en el futuro velocidades máximas superiores a los 120 Km/hr (140-160 Km/hr) por lo que se prevee la utilización de una catenaria normal constituida de un portador de bronce de 65 mm<sup>2</sup> de sección y de un hilo de contacto en cobre con una sección de 107 mm<sup>2</sup>

Se consideran las alimentaciones en antena de cada lado de las subestaciones con secciones de separación entre subestaciones.

#### 6. Elección del Sistema a utilizar

Para definir el sistema más conveniente a utilizar se hi-

zo una estimación del costo relativo para cada uno de ellos.

Tomando el valor 100 como precio de la solución 1, se puede establecer el siguiente cuadro, el cual permite comparar los diversos elementos constitutivos en cada uno de ellos.

	Solución 1 Alimentación Directa	Solución 2 Alimentación por Autotransfor mador	Solución 3 Alimentación Mixta
Alimentación Alta Tensión.	27	13,7	11,4
Subestaciones.	61,5	40,7	45,9
Puestos de Tracción.	11,5	30,4	23
Alimentadores 25 KV	--	53,7	28,5
TOTAL:	100	137,5	108.8

De lo anterior se puede observar que el sistema de Alimentación Directa en 25 KV es la solución más económica.

Esta solución es también la más satisfactoria desde el punto de vista técnico ya que:

- a) Las fuentes de alimentación de las líneas de contacto tienen una repartición más adecuada a lo largo de la línea lo que asegura una mayor seguridad en la alimentación y da mayor flexibilidad al sistema para su operación.
- b) Se tiene un mejor rendimiento de las instalaciones.
- c) Es el sistema más sencillo, lo cual favorece el mantenimiento de las instalaciones.

NOTA: Conviene hacer notar que los gastos relativos al mantenimiento son básicamente los mismos para los tres sistemas, pero si bien las soluciones 2 y 3 tienen menos subestaciones, los equipos para cada una de ellas son más complicados.



## BIBLIOGRAFIA

- ASOCIACION DE INVESTIGACION DEL TRANSPORTE. Jornadas Técnicas sobre Electrificación 25 Kv, 50 HZ. -- Madrid : 1981
- ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. Elementos de diseño de subestaciones eléctricas. -- México : Limusa, 1978.
- ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. Introducción al análisis de los sistemas eléctricos de potencia. -- México : Limusa, 1978.
- GUERRERO C., Rafael. Cálculo de fallas en sistemas de potencia. -- México : Federación Editorial Mexicana, 1978..
- JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. Seminar on electrification. -- Tokio, 1982.
- MARCEL, Tessier. Traction électrique et Thermo-Electrique. -- París : Scientifiques Riber, 1978.
- VIQUEIRA LANDA, Jacinto. Redes Eléctricas. -- México : Representaciones y Servicios de Ingeniería, 1975.