



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

SISTEMA DE TRACCION  
ELECTRICA MONOFASICA  
25 Kv , 60 Hz

T E S I S  
que para obtener el título de  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P r e s e n t a  
JUAN DE DIOS QUINTERO FLORES



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

A mis padres:

con infinito cariño  
y agradecimiento

Arcadio Quintero González  
Marfa de la Luz Flores de Quintero

A mis hermanos:

María Isabel

Luz María

Olivia

Alfredo

Arcadio

... a la memoria de Francisco Javier

A Virginia:

mi amor  
y con gratitud  
por su apoyo

Al Sr. Ing. Francisco López Rivas:

por su valiosa colaboración

A la Facultad, Maestros y Amigos

SISTEMA DE TRACCION ELECTRICA MONOFASICA

25 Kv, 60 Hz

# I N D I C E

	Pág.
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE TRACCION ELECTRICA	5
a) Generalidades	6
b) Sistema de Corriente Directa	10
c) Sistema de Corriente Alternada	13
d) 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
a) Alimentación Directa	28
b) Alimentación por Transformador Reforzador (T.R)	34
c) Alimentación por Autotransformador (A.T)	37
d) Cuadro Comparativo de los Tres Sistemas.	40

CAPITULO III	METODO OPERATIVO PARA EL DISEÑO DE UNA ELECTRIFI CACION EN CORRIENTE ALTERNÁ MONOFASICA A 25 Kv, 60 Hz	41
	a) Dimensionamiento de la Red de Suministro de Energía	42
	b) Número, Ubicación y Poten- cia de las Subestaciones	45
	c) Espaciamiento de las Subes- taciones	47
	d) Diagrama Vectorial de una Distribución de Trenes	51
CAPITULO IV	DESEQUILIBRIOS PRODUCIDOS EN LA RED PUBLICA TRIFASI CA DEBIDO A LA CARGA MONO FASICA FERROVIARIA	53
	a) Descripción del Fenómeno	54
	b) Cálculo de la Corriente Desbalanceada por Compo-- nentes Simétricas	57
	c) Determinación del Coefi- ciente de Disimetría In- troducido en la Red Trifá sica por una Conexión Mo- nofásica entre Dos Fases.	68

CAPITULO V

ESQUEMAS DE SUBESTACIONES  
EN TRACCION ELECTRICA MO-  
NOFASICA 25 Kv, 60 Hz

78

- a) Esquemas en Alta Tensión 79
- b) Tipos de Acoplamiento 83
- c) Alimentación a Catenarias. 89

BIBLIOGRAFIA

92

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

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

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

Para darnos una idea de la configuración del sistema eléctrico ferroviario, tenemos que: partiendo de una distribución de energía eléctrica en alta tensión (red pública trifásica), a los puestos fijos llamados subestaciones y efectuando en éstos una primera transformación (reducción de la tensión), para luego, distribuir la corriente a las líneas de contacto (catenarias) y de éstas a las locomotoras.

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

Llamamos Circuito de Tracción al conjunto representado esquemáticamente en la figura (1), constituido por la subestación, línea de contacto, locomotora y circuito de retorno.

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

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

Ya veremos que los sistemas de tracción eléctrica se clasificarán de acuerdo a su voltaje, frecuencia y fases que utilicen. Los sistemas adoptados en cada país son el resultado del desarrollo histórico que los sistemas eléctricos ferroviarios han tenido en dichos países.

Una vez elegido el sistema, ha habido en general que atenerse al mismo, para no aumentar de modo prohibitivo el costo de las necesarias transformaciones.

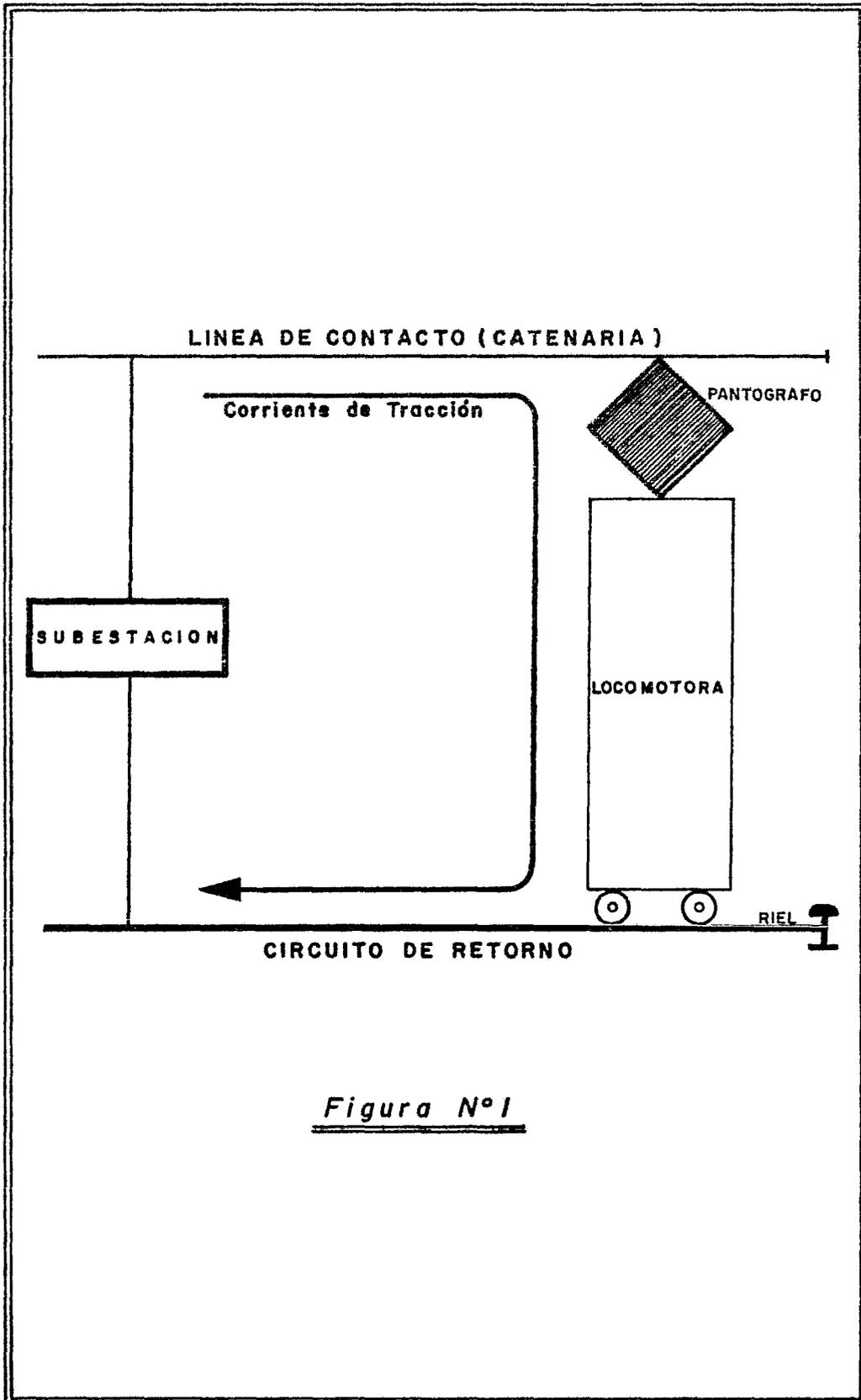


Figura N°1

# C A P I T U L O I

## DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE TRACCION ELECTRICA

## CAPITULO I

### DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE TRACCION ELECTRICA

#### a) Generalidades

La energía suministrada a la locomotora eléctrica a partir de la subestación de tracción, puede ser suministrada 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).

El problema de la determinación del sistema de corriente, apropiado para la electrificación de los ferrocarriles, fue objeto, cuarenta o cincuenta años atrás, de múltiples discusiones.

Desde luego, hubo acuerdo en la necesidad de la electrificación y sobre las ventajas que ésta presenta en comparación con la tracción por vapor o diesel, tanto desde el punto de vista constructivo como en el económico, social e higiénico. Por el contrario, las opiniones eran disconformes en cuanto a la elección del sistema de corriente.

TIPO DE SISTEMA	TENSION	FRECUENCIA
CORRIENTE DIRECTA	600 V, 750 V, 1200 V, 1500 V, 3000 V.	
CORRIENTE ALTERNA MONOFASICA	20 Kv, 25 Kv, 50 Kv. 6.6 Kv, 20 Kv, 25 Kv, 50 Kv. 11 Kv, 16 Kv. 11 Kv, 15 Kv.	60 Hz. 50 Hz. 25 Hz. 16 2/3 Hz.
CORRIENTE ALTERNA TRIFASICA	600 V. 6 Kv. 3.7 Kv.	60 Hz. 25 Hz. 16 2/3 Hz.

T A B L A I

Era lógico que en los comienzos de esta electrificación se pensase que el método más sencillo, fue se 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 práctica obstáculos insuperables, ya que todos los esfuerzos encaminados a realizar adecuados motores monofásicos fallaron irremediablemente; debido a ésto las diversas empresas de transporte se vieron obligadas a renunciar a las ventajas inegables de utilizar la misma red para la alimentación de la industria y de los ferrocarriles.

En los últimos treinta años, la tracción eléctrica ha sufrido una gran expansión, a medida que se intensificaba el tráfico, y una profunda evolución, como consecuencia de los progresos alcanzados por los tres grandes sectores tecnológicos; mecánico, electromecánico y electrónico.

Como es lógico, las instalaciones de tracción se han aprovechado de los avances conseguidos en los diferentes sectores tecnológicos y así han podido hacer frente a la mayor demanda de potencia y al incremento de velocidad de las locomotoras.

Hoy en día, cuando los recursos energéticos son escasos y caros, la tracción eléctrica ferroviaria

se presenta como una solución económicamente privilegiada a condición de que el tráfico justifique, en un trayecto determinado, las inversiones elevadas provocadas por la electrificación.

Por ello creemos que la expansión de la trac  
ción eléctrica continuará ininterrumpidamente en el fu  
turo, a la vez irá evolucionando al ritmo de la ci  
encia y de la téc  
nica.

## b) Sistema de Corriente Directa

En este sistema la corriente alterna es convertida a corriente directa por los rectificadores de silicio instalados en las subestaciones de tracción, que son los encargados de suministrar la energía de corriente directa a la línea de contacto que alimenta los motores de tracción de las locomotoras.

Una desventaja que presenta este sistema es el hecho de que existe el peligro de corrosión por la corriente directa que circula por el suelo. La parte de corriente de tracción que retorna por el suelo, función del aislamiento riel-suelo, da lugar a las denominadas corrientes vagabundas, que causan efectos de corrusión en el riel y las canalizaciones adyacentes a la línea electrificada.

Haciendo la analogía entre dos electrodos sumergidos en un electrolito, en relación al sistema electrificado; quedaría expresada de la siguiente manera:

Electrodos	1.- Canalización metálica enterrada 2.- Rieles
Electrolito	Suelo conteniendo soluciones de sales , ácidos, bases.

Los procedimientos de protección a la corro-

sión electrolítica son los siguientes:

Reducción de corrientes vagabundas:

- Mejorar el aislamiento de vía respecto a tierra
- Reducción de la resistencia de riel
- Disposiciones a tomar en canalizaciones y rieles: 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.

Filosofía del método: 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 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 más grandes de corrientes en la línea de contacto y la caída de voltaje es mayor. Así como los intervalos de las subestaciones de tracción son reducidos y grandes las capacidades de corriente demandadas.

Con el objeto de reducir las caídas de tensión e incrementar la capacidad de corriente en la línea de contacto, alimentadores adicionales (Feeders), son colocados en paralelo a la línea de contacto. Los 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 de 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 fácil, además causa menos inducción sobre las líneas de telecomunicaciones.

Debido a que maneja un menor voltaje, es más ventajoso desde el punto de vista de previsión de accidentes.

Además de estas características, los sistemas de corriente directa tienen una larga historia de aplicación, lo que los hace de fácil adopción.

### c) Sistema de Corriente Alterna

Aunque hay varios tipos de sistema de corriente alterna como se indico en la tabla (I), el monofásico de frecuencia comercial es el más adoptado, 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 frecuencia 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, circuitos de vía, etc.), instalados 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 aumenta con la intensidad de la corriente circulante en la catenaria. Esto tiene como consecuencia que las tensiones riel-suelo sean menores cuando la tensión en la catenaria es elevada.

Como contra medida para combatir estos inconvenientes sistemas de transformador reforzador y/o autotransformador son utilizados.

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 scott utilizados para reducir el desbalanceo de fases en la fuente suministradora.

Para los sistemas monofásicos especiales tales como el de  $16 \frac{2}{3}$  Hz ó 25 Hz, la línea de contacto es alimentada a través de un generador o un 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 motores de tracción trifásicos son empleados 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 relevantes de los sistemas de corriente alterna y corriente directa.

INSTALACIONES FIJAS	SISTEMA MONOFASICO A FRECUENCIA COMERCIAL	SISTEMA DE CORRIENTE DIRECTA
1.- Subestaciones	1.- Costo de construcción bajo 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. b) Sólo transformadores son necesarios, lo que simplifica el esquema de la subestación.	1.- Costo de construcción alto a) Intervalo entre subestaciones es corto de 10 a 20 Kms., por tanto numerosas subestaciones son necesarias. b) Equipos de conversión de corriente alterna a corriente directa es necesario lo que hace complejo el esquema de la subestación.
2.- Tensión de alimentación	2.- Como los transformadores van montados en las locomotoras, alta tensión puede ser utilizada. Esto hace que la selección del motor eléctrico de tracción sea más fácil.	2.- La tensión de alimentación está limitada por el aislamiento y la conmutación del motor.
3.- Línea de contacto.	3.- La corriente es pequeña, por tanto poca cantidad de cobre es necesaria y la estructura de la línea simple.	3.- La corriente es grande por tanto gran cantidad de cobre es necesaria y la línea debe ser sostenida por una pesada estructura.
4.- Espacio de aislamiento	4.- Alta tensión es utilizada, por tanto, gran espacio de aislamiento es necesario, éste se incrementa en los túneles.	4.- Baja tensión es utilizada por tanto el espacio de aislamiento se reduce.
5.- Caída de tensión.	5.- La caída de tensión puede ser compensada fácilmente utilizando condensadores en serie o poniendo las catenarias en paralelo.	5.- Para prevenir la excesiva caída de tensión, alimentadores adicionales, puestos de seccionamientos y subestaciones son necesarios.
6.- Protección	6.- El equipo de protección es simplificado debido a la pequeña corriente de tracción y a la facilidad de discriminar la corriente de falla.	6.- El equipo de protección es complejo debido a la gran corriente de tracción y a la dificultad en la interrupción selectiva de la corriente de falla.
7.- Inducción a las líneas de telecomunicaciones	7.- La inducción es grande, por tanto medidas como instalar en el sistema AT, TR y canalizar por cable las líneas de telecomunicaciones son necesarias.	7.- La inducción es pequeña, por tanto no se requiere de equipo en la línea de contacto en particular.
8.- Desbalanceo de fases	8.- Debido a la carga monofásica, la fuente trifásica está sujeta a un desbalance.	8.- La fuente de energía no está sujeta a desbalanceo de fases.

TABLA II

TIPO DE ELECTRIFICACION		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.
CIRCUITO AEREO	CATENARIA	PESADA	LIGERA
	AI SLAM IENTO	LIGERO	ELEVADO
	FENOMENO ELECTROSTATICO	REDUCIDO	SI
	FENOMENO ELECTROMAGNETICO	ACCIDENTAL	SI
CIRCUITO DE RETORNO	TENSION RIEL - SUELO	VARIABLE	VARIABLE
	CORRIENTE DE FUGA	REDUCIDAS	IMPORTANTES
	RIESGO DE CORROSION ELECTROLITICA	SI	NO

T A B L A III

d) Generalidades sobre la Catenaria y el Circuito de Retorno

Catenaria

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

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 a los motores de tracción de la locomotora en dos formas ya sea en corriente directa o corriente alterna.

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

- 1.- El punto de carga se mueve y, la misma 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.

Cualquiera que sea su modo de realización, las líneas de contacto deberán presentar un conjunto de condiciones eléctricas y mecánicas.

**ELECTRICAS:** Las líneas de contacto aseguran el transporte de corriente necesario a las locomotoras. Ellas deben por lo tanto ser construidas utilizando alambres o cables buenos conductores, a fin de no crear caídas de tensión importantes.

Si el transporte de la energía se debe hacer sin caída de tensión excesiva, se necesita también que ésta se opere sin

causar un calentamiento anormal de los con ductores.

En general, la sección total de una catenaria es calculada en función del tráfico, del perfil, trazo de la línea, de las caídas de tensión admisibles, calentamiento de los conductores y de la implantación de las subestaciones. Todo esto da cómo resultado una determinada sección de cobre equivalente del conductor.

**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.

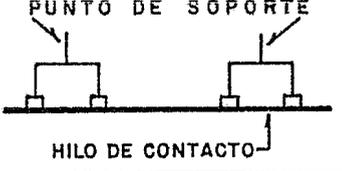
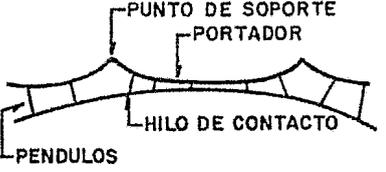
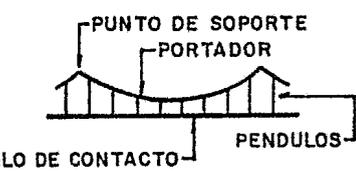
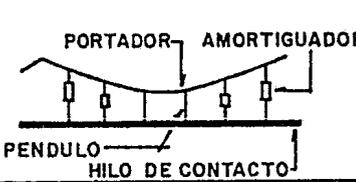
Para asegurar un buen contacto con el pantógrafo se necesita:

- que la catenaria sea flexible, de donde, la necesidad de suspender el hilo de con tacto de un portador.
- que ella conserve sensiblemente, una mis ma forma cualquiera que sea la temperatu ra. Para este efecto el portador y el hilo de contacto son tendidos por medio de aparatos de tensión automática. Son éstos los que mantienen constante esta tensión mecánica entre los límites habituales de variación de temperatura.

Para darnos una idea del orden de valores 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.

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 A MENUDO MAS
CORRIENTE ALTERNA MONOFASICA	15 KV a 16 2/3 Hz, ó 25 KV a 60 Hz.	DE 100 A 150 mm <sup>2</sup> .

T A B L A IV

TIPO DE SISTEMA	CONSTRUCCION	CLASIFICACION SEGUN VELOCIDAD
SUSPENSION DIRECTA	 <p>PUNTO DE SOPORTE HILO DE CONTACTO</p>	BAJA VELOCIDAD HASTA 45 Km/h
CATENARIA INCLINADA	 <p>PUNTO DE SOPORTE PORTADOR HILO DE CONTACTO PENDULOS</p>	HASTA 60 Km/h
CATENARIA SIMPLE	 <p>PUNTO DE SOPORTE PORTADOR HILO DE CONTACTO PENDULOS</p>	HASTA 100 Km/h
CATENARIA SIMPLE DOBLE	 <p>PUNTO DE SOPORTE PORTADOR HILO DE CONTACTO PENDULOS</p>	ALTA VELOCIDAD HASTA 100 Km/h
CATENARIA SIMPLE SOBRETENSADA	 <p>PUNTO DE SOPORTE PORTADOR PENDULOS HILO DE CONTACTO</p>	ALTA VELOCIDAD HASTA 100 Km/h
CATENARIA SIMPLE CON AMORTIGUAMIENTO	 <p>PORTADOR AMORTIGUADOR PENDULO HILO DE CONTACTO</p>	ALTA VELOCIDAD HASTA 100 Km/h
CATENARIA COMPUESTA	 <p>PUNTO DE SOPORTE PORTADOR PENDULOS HILO DE CONTACTO</p>	ALTA VELOCIDAD DE 160 a 200 Km/h
CATENARIA COMPUESTA CON AMORTIGUAMIENTO	 <p>PUNTO DE SOPORTE AMORTIGUADOR PORTADOR HILO DE CONTACTO AUXILIAR PORTADOR PENDULOS</p>	ALTA VELOCIDAD DE 160 a 200 Km/h

**Figura N°2**

## Circuito de Retorno

Se admite la existencia de dos circuitos formados por catenaria y suelo, rieles y 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.- 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 las extremidades (suponiendo que éstas estén suficientemente alejadas). A partir de las subestaciones y de los puntos de carga la corriente de alimentación desaparece 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

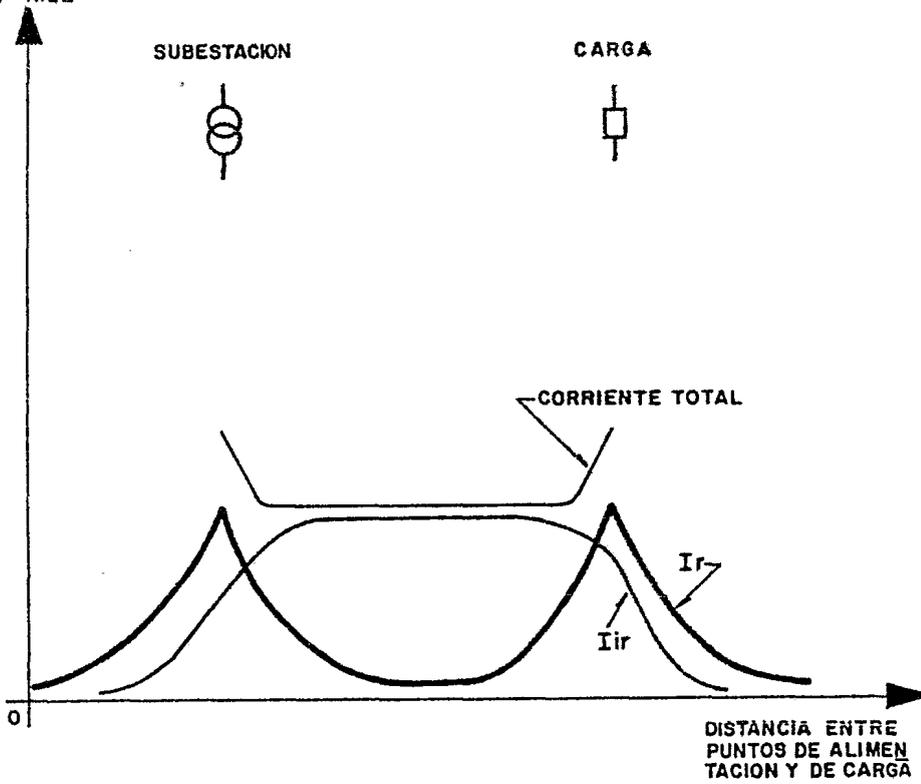


Figura N° 3

## 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.

## CAPITULO II

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

## a) 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 de tracción 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 siguientes dificultades. En un sistema ferroviario donde se operan gran cantidad de trenes eléctricos, los cuales durante su operación demandan de las subestaciones la energía necesaria para operar y, considerando que no siempre la distancia de las locomotoras a las subestaciones es corta, ocasiona al sistema una considerable caída de tensión, 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 de corriente 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, 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. La figura (5) muestra las impedancias características

de la subestación al punto de carga de los tres sistemas de alimentación a catenarias, así como la tabla (V) muestra algunos valores de impedancias, de estos sistemas.

## ALIMENTACION DIRECTA

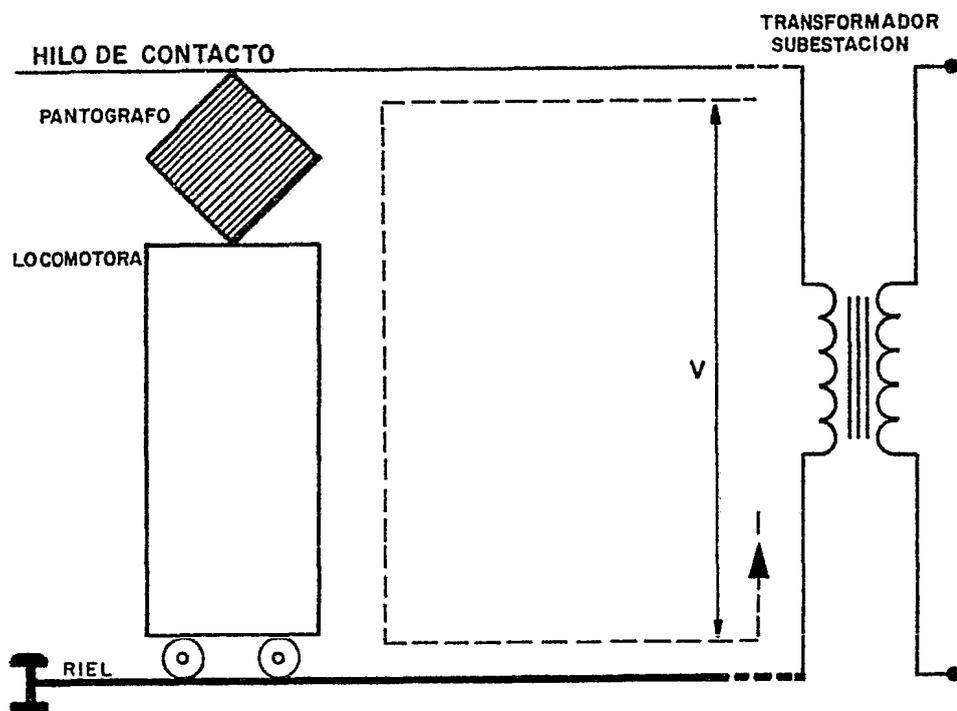
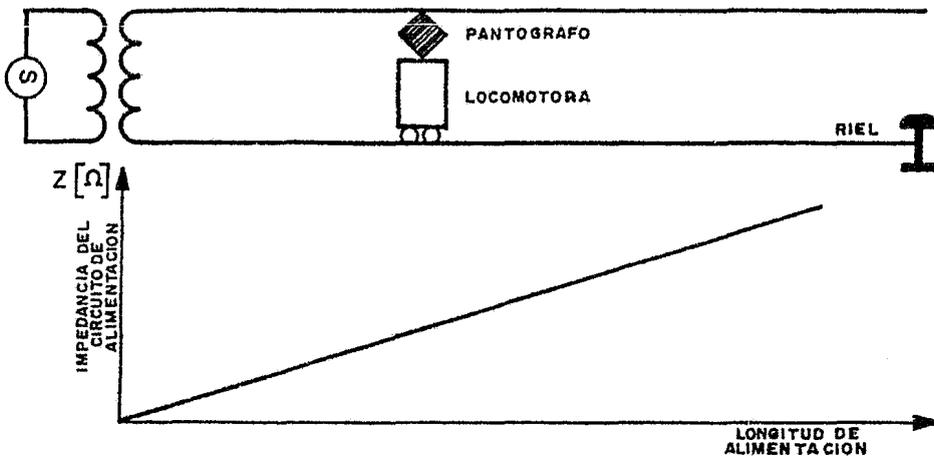
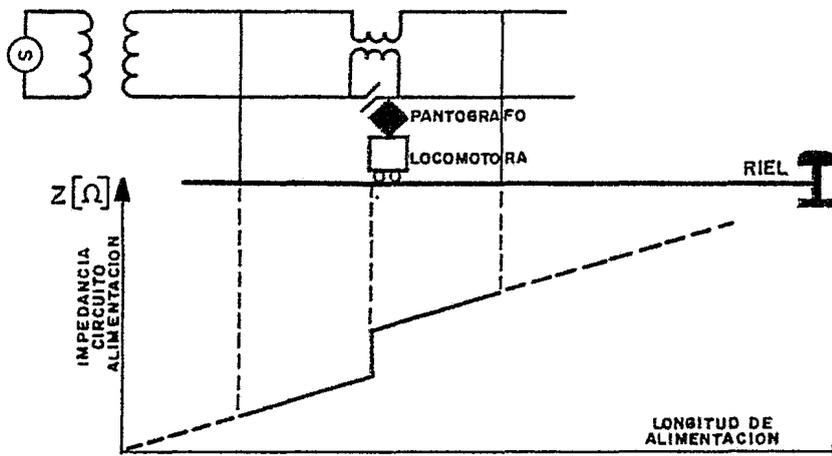


Figura N°4

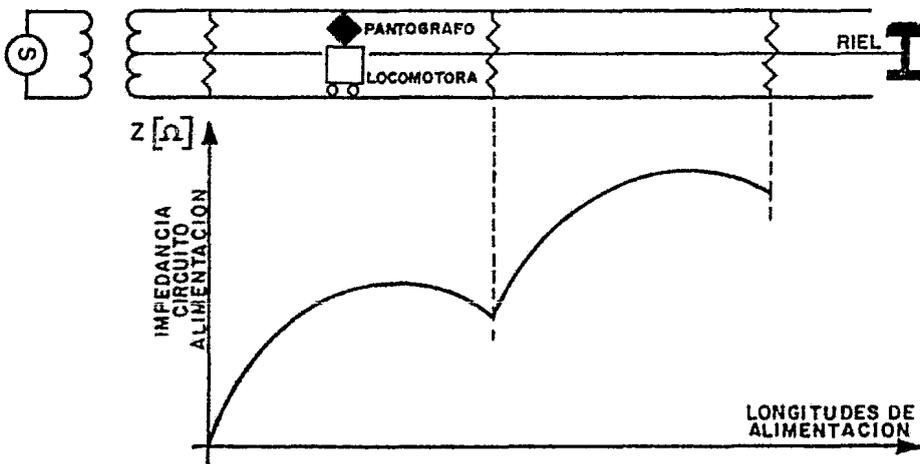
**Figura N°5**



**IMPEDANCIA CARACTERISTICA DEL SISTEMA DE ALIMENTACION DIRECTA**



**IMPEDANCIA CARACTERISTICA DEL SISTEMA DE ALIMENTACION POR TRANSFORMADOR REFORZADOR**



**IMPEDANCIA CARACTERISTICA DEL SISTEMA DE ALIMENTACION POR AUTOTRANSFORMADOR**

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

T A B L A V

## b) Alimentación por Transformador Reforzador (TR)

Su esquema es el siguiente: se distribuyen a intervalos regulares a lo largo de la línea de alimentación ( catenaria ) secciones de (TR) aproximadamente cada cuatro kilómetros.

El (TR) tiene dos embobinados con una relación de transformación de uno a uno.

El lado primario se conecta en serie a la línea de contacto. El lado secundario se conecta en serie con un feeder 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 feeder 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 prever transformadores numerosos y de gran capacidad

lo que produce en consecuencia un nuevo aumento del costo.

- 3.- Introducen en el circuito de alimentación unas 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 (TR) hace que, en la celda en donde se encuentre un tren, la corriente de retorno utiliza los rieles y el suelo en lugar de pasar por el feeder sobre una parte de la sección. En esta sección la compensación entonces no es perfectamente asegurada.
- 5.- Una cierta diferencia de tensión existe por definición entre los dos bornes del transformador. Resultando al paso de los pantógrafos unos arcos muy perjudiciales para el pantógrafo y sobre todo para la línea de contacto.

Los (TR) tienen utilidad en los países donde la poca conductividad del suelo es responsable de fuerzas electromotrices inducidas muy importantes. Los (TR) 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 (TR).

# ALIMENTACION POR TRANSFORMADOR REFORZADOR

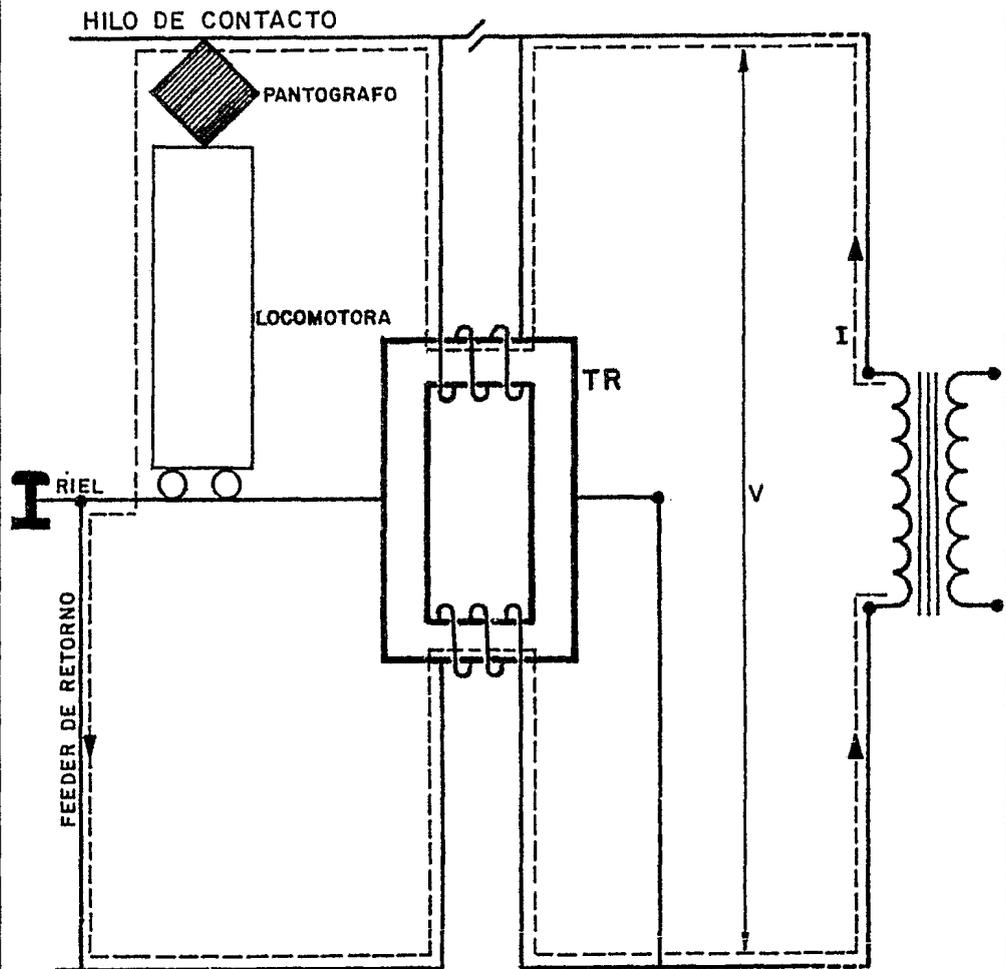


Figura N° 6

c) Alimentación por Autotransformador (AT)

Este sistema tiene la siguiente configuración, los autotransformadores son instalados a intervalos regulares (aproximadamente cada 10 kilómetros) a lo largo de la línea electrificada.

El sistema ( AT ) suministra la energía a los trenes de la siguiente forma: la subestación alimenta la línea de tracción en 50 Kv entre la catenaria y el feeder 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  $2 \times 25$  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 feeder 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 el voltaje de alimentación a la locomotora; por lo que la corriente es la mitad de la corriente en el sistema de alimentación directa, así como también su caída de tensión es menor debido a su baja impedancia del circuito de alimentación y a la baja corriente que circula, permitiéndonos esto tener

un mayor intervalo entre subestaciones.

Podemos citar como inconveniente de este sistema lo siguiente:

- 1.- Si este sistema presenta la ventaja en relación con los (TR) de evitar los defectos relativos a la captación de la corriente. Tiene como inconveniente el costo muy elevado del feeder de retorno y de los autotransformadores.
- 2.- La corriente de tracción es suministrada en la tensión de 50 Kv., entre el hilo de contacto y el feeder 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 esta parte de la línea también la compensación está mal asegurada.
- 3.- Este sistema no evita la puesta en cable de las líneas aéreas de telecomunicaciones a lo largo de la vía electrificada. Permite reducir solamente el costo de protección a las líneas de telecomunicaciones.

La figura (7) muestra el sistema de alimentación (AT).

# ALIMENTACION POR AUTOTRANSFORMADOR

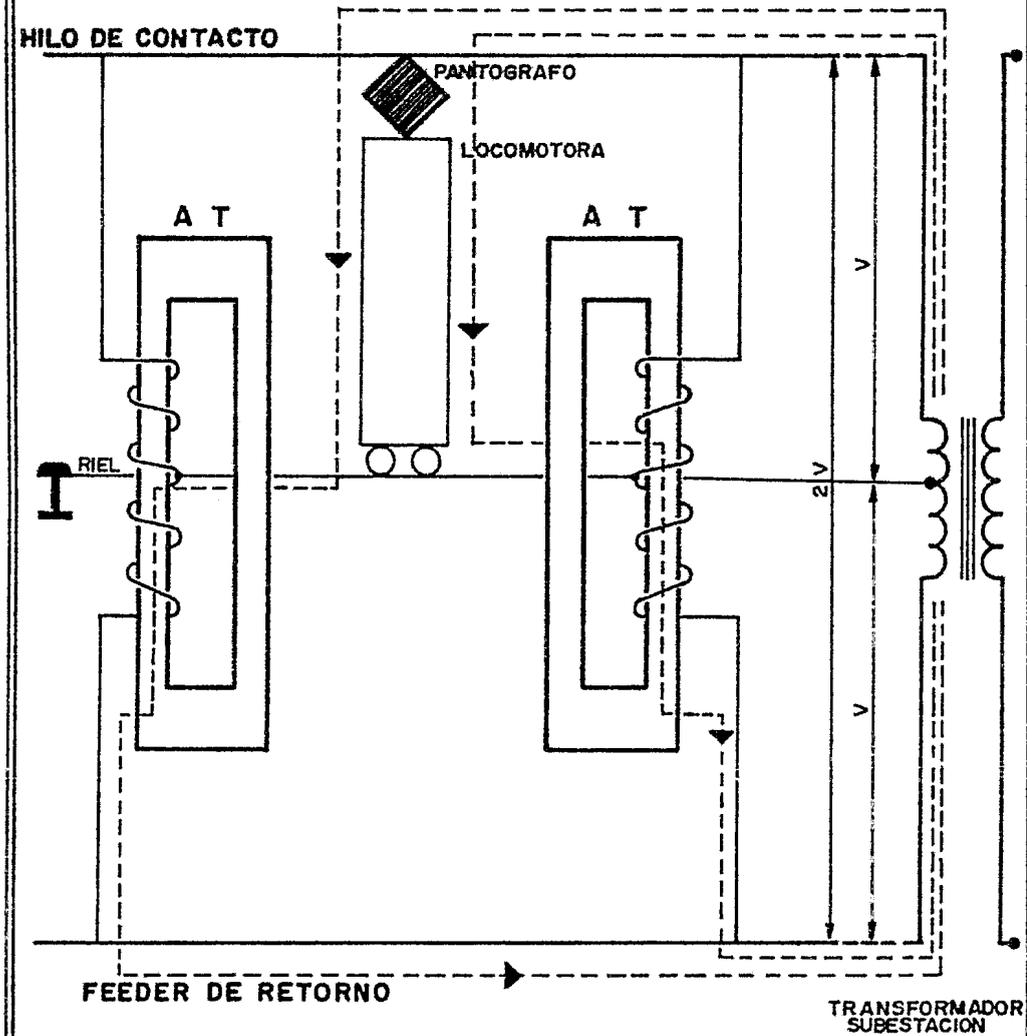


Figura N° 7

## d) Cuadro Comparativo de las Características de los Diferentes Tipos de Alimentación a Catenaria

CARACTERISTICA	SISTEMA DE DIRECTA	SISTEMA DE AUTOTRANSFORMADOR	SISTEMA TRANSFORMADOR REFORZADOR
Sistema de alimentación	1.- La estructura del circuito alimentador es más simple.	1.- 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, da 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.	1.- La longitud de la sección de alimentación es relativamente reducida debido a que la tensión de alimentación sufre una caída de tensión a la derecha de cada transformador instalado en serie en el circuito de alimentación.
Mantenibilidad del circuito de alimentación	1.- El hilo de contacto es continuo hasta las secciones neutras que son los puntos donde se unen los circuitos de alimentación de dos subestaciones contiguas.	1.- El hilo de contacto no presenta discontinuidades en los autotransformadores. 2.- El intervalo entre autotransformadores está comprendido aproximadamente de 10 a 20 kilómetros.	1.- En cada transformador el hilo de contacto presenta una discontinuidad. 2.- El intervalo entre transformadores está comprendido entre 1.5 y 4.0 kilómetros. 3.- La discontinuidad que presenta este sistema constituye un gran inconveniente eléctricamente y mecánicamente para el hilo de contacto y el pantógrafo.
Interferencias con los sistemas de comunicación.	1.- Debido a que la corriente de la locomotora, retorna por el riel a la subestación: existe mayor tensión riel-suelo que en otros sistemas.	1.- La corriente de carga la absorben los autotransformadores eliminando la tensión inducida a los cables de comunicación y limitando la corriente que pasa por la vía.	1.- Los T.R. distribuidos en la línea de contacto, tienen por objeto absorber la corriente de retorno que pasa por el riel.

## 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

## CAPITULO III

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

## a) Dimensionamiento de la Red de Suministro de Energía

Se puede electrificar para un tráfico ya pre-establecido o 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 caso haya más posibilidades de opción entre las distintas alternativas que se presenten.

Criterios: Cumplimiento de las prestaciones míni  
mas exigidas.

Compatibilidad con las facilidades exte  
riores.

Máxima economía.

Seguridad y confiabilidad.

Se desea conocer: La corriente en la línea y sección del conductor.

Número, ubicación y potencia de las sub  
estaciones.

Costo de implantación.

Limitaciones: Tensión de la red primaria.  
Desequilibrio entre fases permitido.  
Caídas de tensión.  
Calentamiento de los conductores.

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

- 1.- La potencia disponible en la red primaria.
- 2.- Los desequilibrios, distorciones y armónicas máximos 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 mínima tensión admisible en el punto de toma de corriente.
- 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

ohmica, 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 suministrada y adecuadamente captada por las locomotoras.

## b) Número, Ubicación y Potencia de las Subestaciones

El objeto es determinar el número, ubicación y potencia de las subestaciones capaces de atender las necesidades del tráfico previsto.

El método operativo a seguir es el siguiente:

- 1.- Establecimiento de las previsiones de tráfico.
- 2.- Obtención del diagrama de circulación de trenes.
- 3.- Establecimiento de los perfiles virtuales.
- 4.- Determinación de la potencia mecánica exigida en cada momento, con especificación de:
  - Potencia de cada tren y
  - ubicación de cada tren.
- 5.- Determinación de las situaciones más desfavorables en función de:
  - Máxima demanda de potencia,
  - máxima concentración espacial de trenes.
- 6.- Especificación, para cada una de las situaciones indicadas en el inciso anterior de:
  - Potencia eléctrica requerida por cada tren,
  - factor de potencia de cada locomotora,
  - ubicación de cada locomotora.
- 7.- Establecimiento de hipótesis:
  - Sección de conductores.
  - Número y ubicación de subestaciones.

- 8.- Cálculo, para las hipótesis establecidas en el inciso anterior y para cada subestación, de:
- 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:
- 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; se deberá cumplir que:

- 1.- El equipo de la subestación debe poseer suficiente capacidad para soportar la carga de las locomotoras.
- 2.- Las caídas de tensión debido a la carga de la locomotora no debe afectar la operación de los trenes.
- 3.- 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 catenaria o en la locomotora.

### c) 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 puntos se imponen para constituir un punto de alimentación, en cuanto a la de terminación del espaciamiento admisible entre subestaciones, éste 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 voltaje en el circuito es también pequeña para la misma corriente de carga. Con secuentemente, 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 car ga, por lo que el intervalo entre subestaciones puede ser incrementado exactamente en inversa proporción 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 operar se en cada tramo, se obtiene de los pronósticos de tráfico impuestos 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 tentativa ubicación de las subestaciones.

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

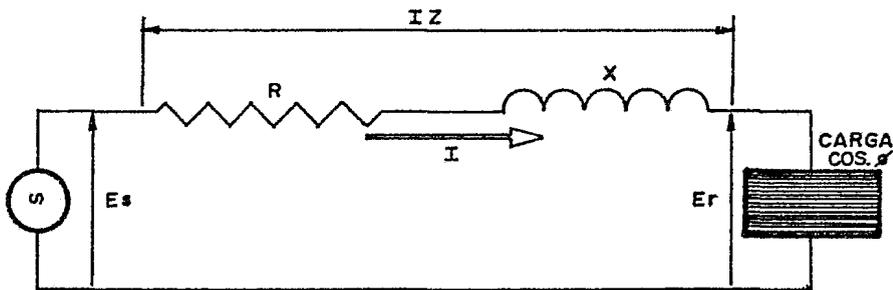
$E_r$  = Tensión de la carga [V]

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

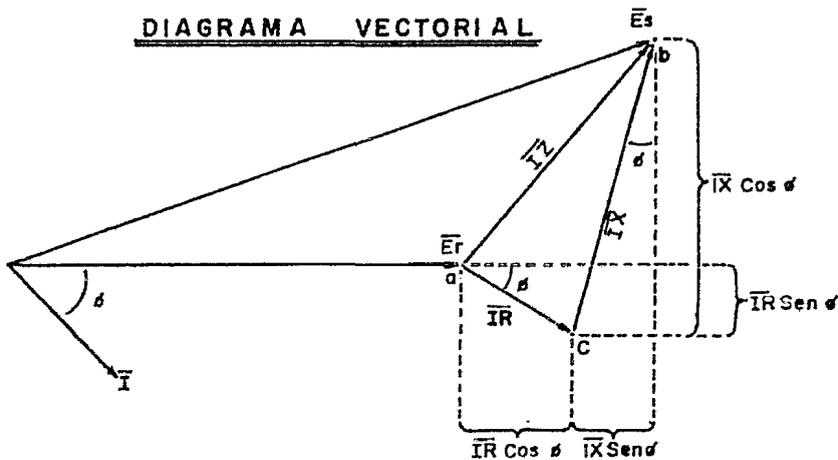
$I$  = Corriente de carga [A]

$\cos. \phi$  = Factor de potencia de la Locomotora

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



### DIAGRAMA VECTORIAL



$$E_s = \sqrt{[E_r + I(R \cos \phi + X \operatorname{seno} \phi)]^2 + [I(X \cos \phi - R \operatorname{seno} \phi)]^2} \text{ [V]}$$

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

$$E_s \cong E_r + I (R \cos \phi + X \operatorname{seno} \phi) \text{ [V]}$$

$$E_o = E_s - E_r \cong I (R \cos \phi + X \operatorname{seno} \phi) \text{ [V]}$$

**FIGURA N°8**

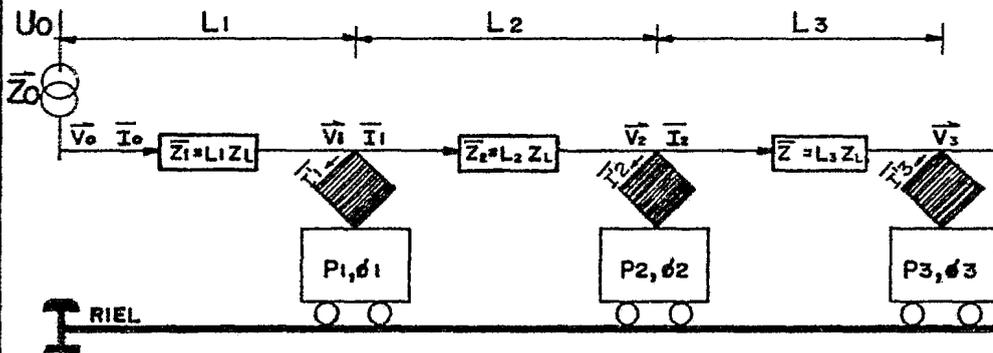
### d) DIAGRAMA VECTORIAL DE UNA DISTRIBUCION DE TRENES.

CONSTANTES: Tensión en la red Primaria ( $U_0$ ), Impedancia de línea y en la subestación ( $Z_n, Z_0$ )

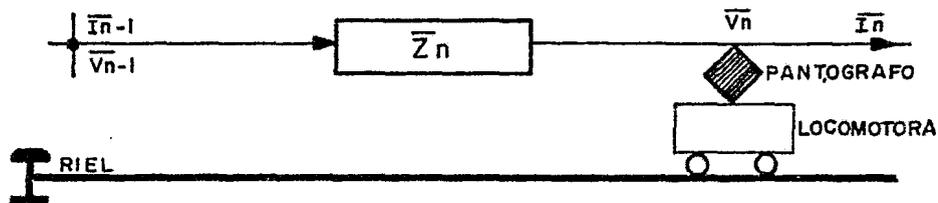
DATOS: Número de trenes ( $m$ ), Potencia ( $P_n$ ), Factor de potencia ( $\cos \phi$ ) y posición de cada tren ( $L_n$ )

INCOGNITAS: Corrientes y tensiones en línea ( $I_n, I'_n, V_n$ ) y potencia de la subestación ( $V_0, I_0, \cos \phi_0$ )

#### CIRCUITO



#### ECUACIONES GENERALES DEL CIRCUITO

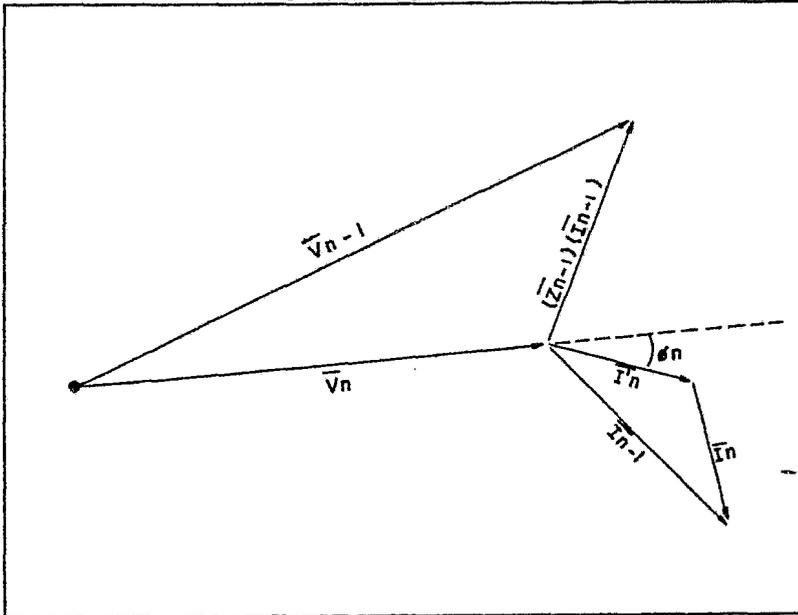


Conociendo la potencia mecánica de la Locomotora, su factor de potencia y la tensión en catenaria ( $P_n, \cos \phi_n, V_n$ ); obtenemos

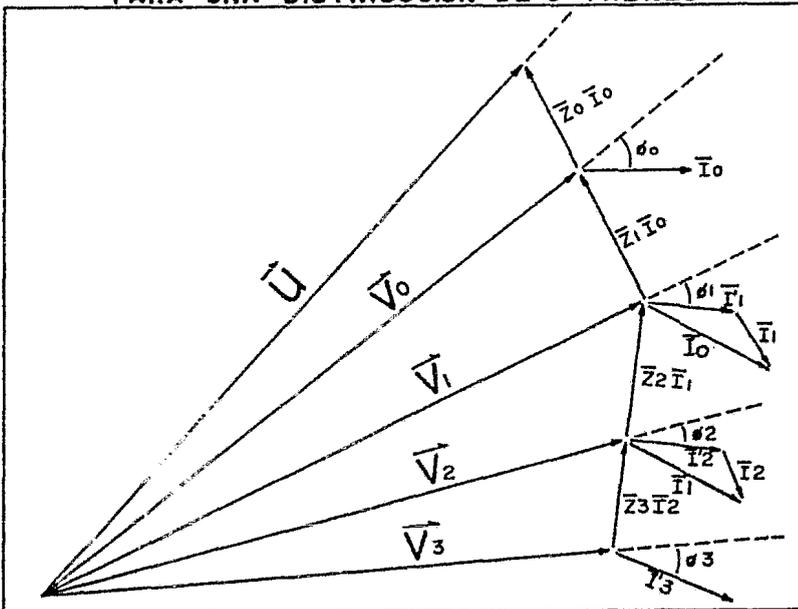
$$\begin{cases} P_n = V_n I_h \cos \phi_n \\ I'_h = \frac{P_n}{V_n \cos \phi_n} \\ I'_{n-1} = I'_n + I_n \\ V'_{n-1} = I'_{n-1} \times Z_n + V_n \end{cases}$$

# 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

## CAPITULO IV

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

## a) 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 de formen 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 que:

- Las corrientes de la línea ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ) no son iguales entre sí, ni están igualmente defasadas entre sí. 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 ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ). Este desequilibrio de tensiones produce 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.

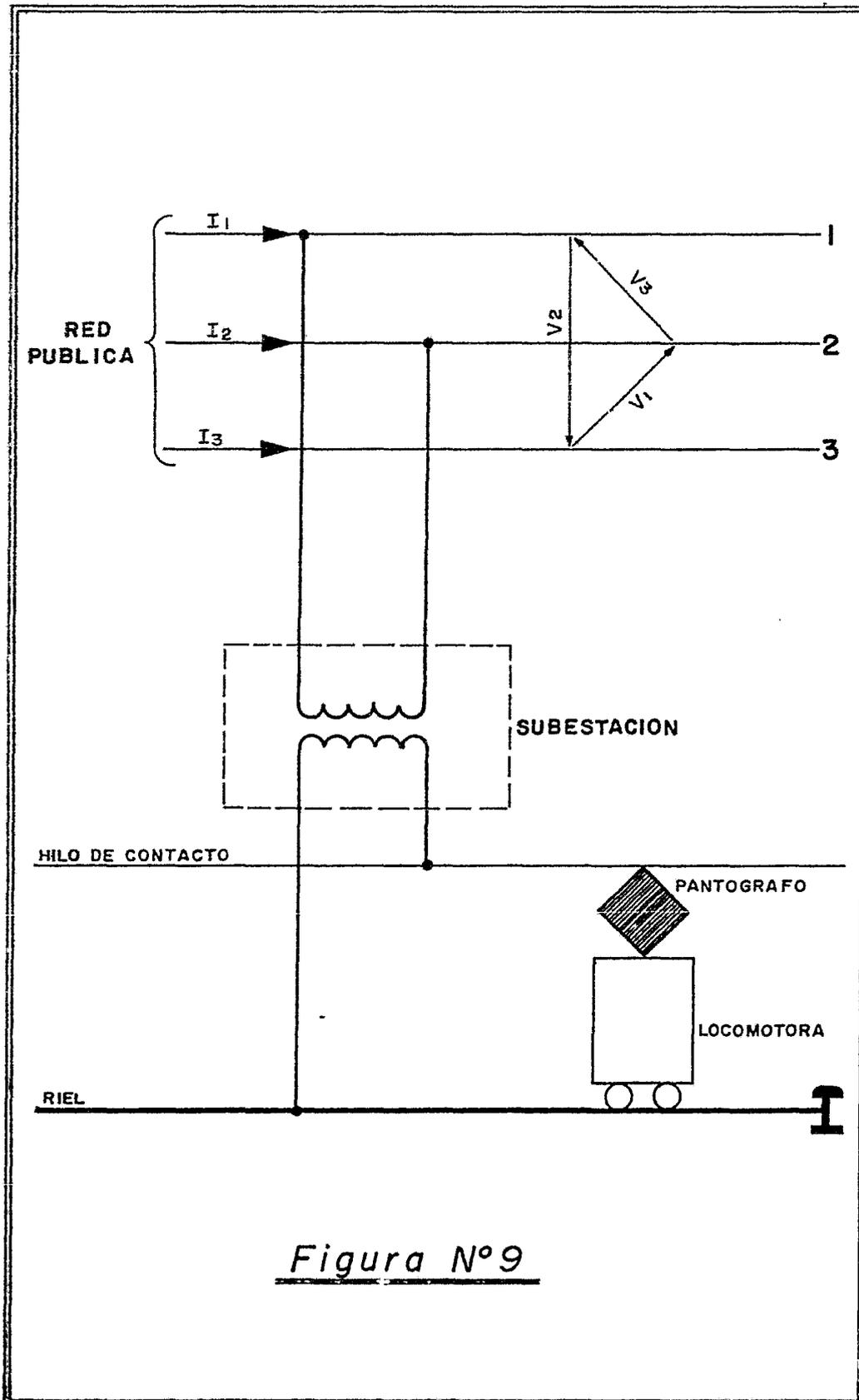


Figura N°9

b) Cálculo de la Corriente Desbalanceada por Componentes Simétricas

Breve resumen de las componentes simétricas:

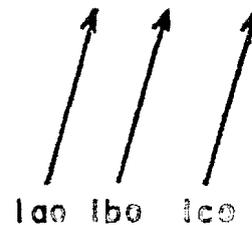
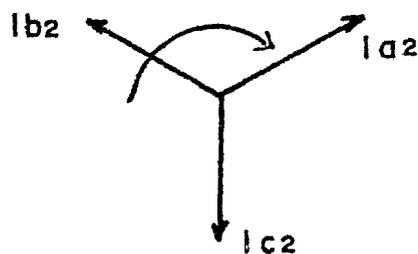
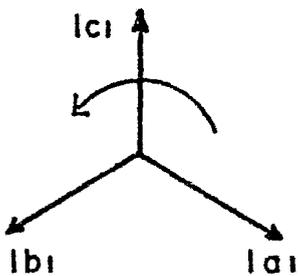
Se puede descomponer un sistema trifásico desequilibrado en tres sistemas trifásicos simétricos.

Las coordenadas simétricas para voltajes o corrientes son de: (en el caso de corrientes).

SECUENCIA POSITIVA

SECUENCIA NEGATIVA

SECUENCIA CERO

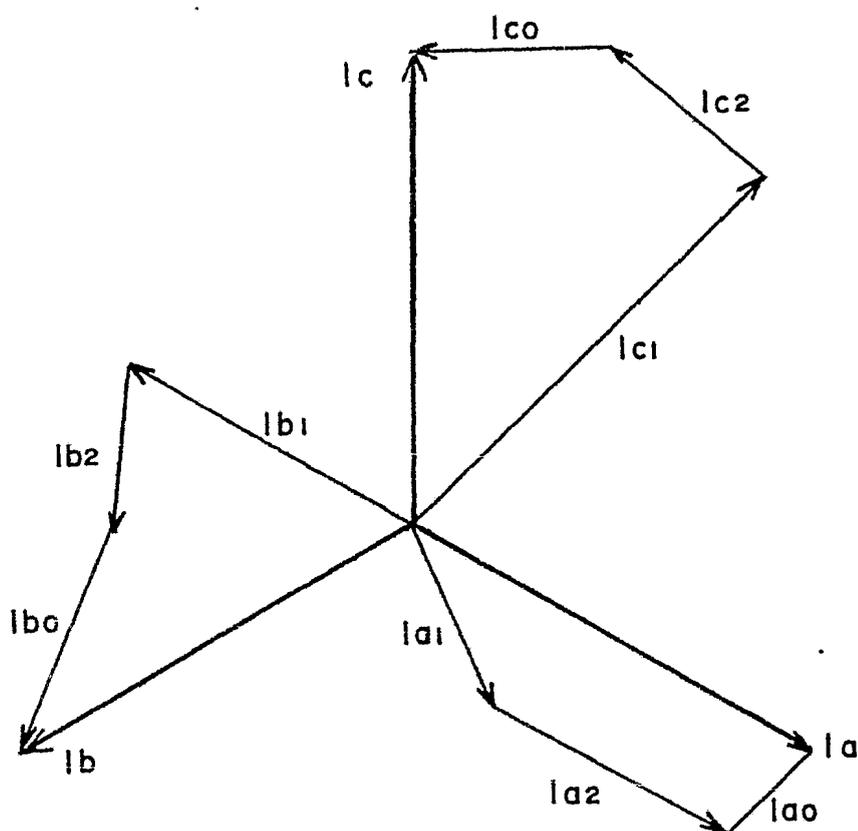


El sistema trifásico desbalanceado es fácil de graficar si aplicamos las relaciones

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

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

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



### Descomposición en componentes simétricas

El operador "a" es un vector de magnitud unitaria y dirección  $120^\circ$ , puesto en 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 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 con el ángulo asociado con el operador "a".

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

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

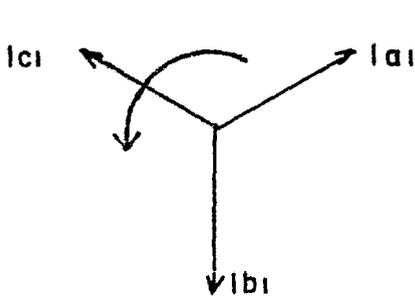
$$a^2 = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

---


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

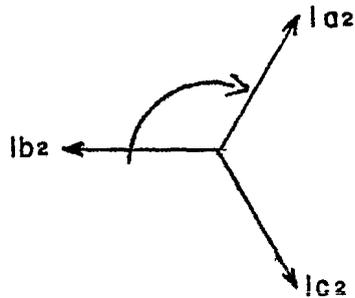
de donde  $a^2 + a + 1 = 0$

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



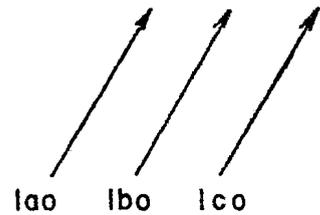
$$I_{b1} = a^2 I_{a1}$$

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



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

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



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

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

Por lo que las relaciones

$$\begin{array}{ll}
 I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} & \text{se transforman} \\
 I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} & \text{en:} \\
 I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} &
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\
 I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \\
 I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}
 \end{array}$$

que expresado en forma matricial

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{si denominamos} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

la inversa de "A" será

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{puesto que} \\ \text{se cumple} \\ AA^{-1} = I \end{array}$$

donde I es igual a

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

entonces  $I_{\phi} = A I_s$

$$A^{-1} I_{\phi} = I_s \quad \text{que equivale a:} \quad \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

o bien:

$$3Ia_0 = I_a + I_b + I_c$$

$$3Ia_1 = I_a + aI_b + a^2I_c$$

$$3Ia_2 = I_a + a^2I_b + aI_c$$

en nuestro caso como  $I_a + I_b + I_c = 0$   $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = 0$   
es decir que no existen componentes de secuencia cero.

Estamos en posibilidad de:

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

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

- 1.- Voltajes de secuencia positiva, negativa o cero inducen únicamente corrientes de secuencia positiva, negativa o cero respectivamente.
- 2.- Corrientes de determinada secuencia, sólo podrán producir voltajes de esa misma secuencia.
- 3.- Los puntos 1 y 2 se resumen diciendo que: no existe interacción entre secuencias distintas.

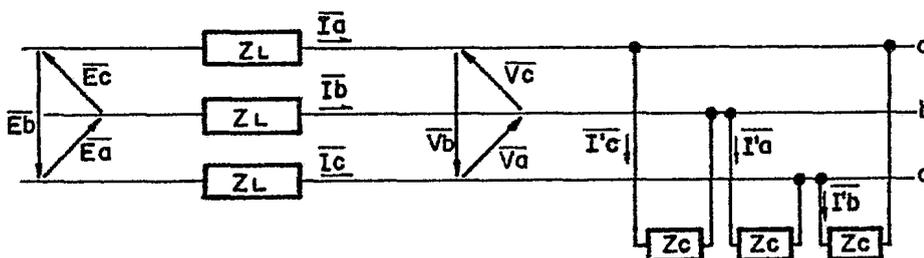
- 4.- Los elementos activos de la red sólo generan voltajes de secuencia positiva. Lo anterior es obvio; para que una máquina genere tensiones de secuencia negativa, tendría que girar en sentido contrario. Sería así mismo imposible que  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ , fueran iguales en magnitud y estuvieran en fase, característica de las cantidades de secuencia cero.
- 5.- Los voltajes de secuencia negativa y cero se consideran generados en el punto de falla; disminuyen en magnitud tan pronto nos alejamos de ese punto.
- 6.- El voltaje 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 el neutro, 4º conductor, conexión a tierra para poder circular.

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

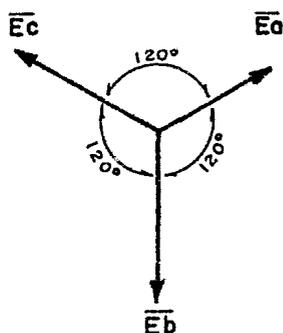
- 1..Red trifásica equilibrada
- 2..Red trifásica no equilibrada
- 3..Caso general de desequilibrio

### L RED TRIFASICA EQUILIBRADA

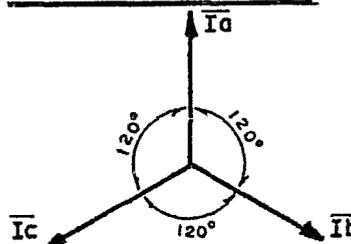
En una red trifásica equilibrada tendremos una distribución de tensiones y corrientes del tipo:



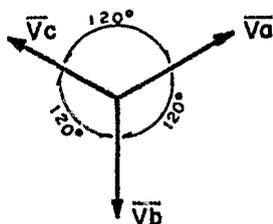
TENSIONES ENTRE FASES EN LOS BORNES DE GENERADOR.



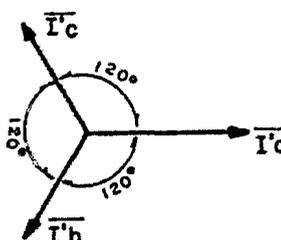
CORRIENTES EN LINEA



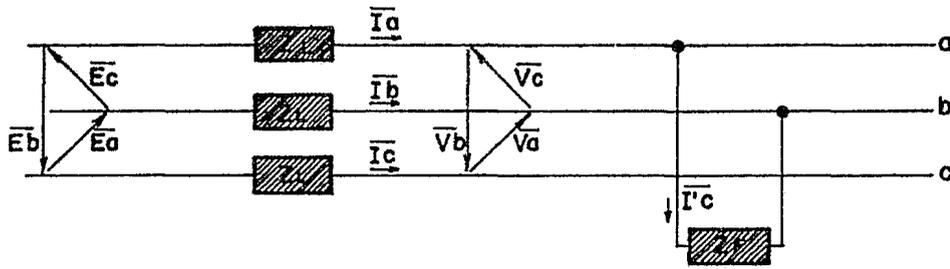
TENSIONES EN LINEA ENTRE FASES



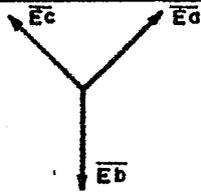
CORRIENTES EN LAS CARGAS



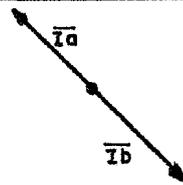
## 2.- RED TRIFASICA NO EQUILIBRADA



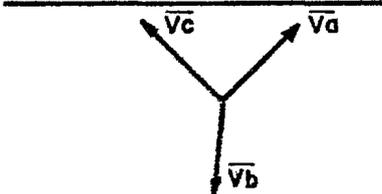
**TENSIONES ENTRE FASES EN LOS BORNES DEL GENERADOR.**



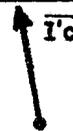
**CORRIENTE EN LINEA A.**



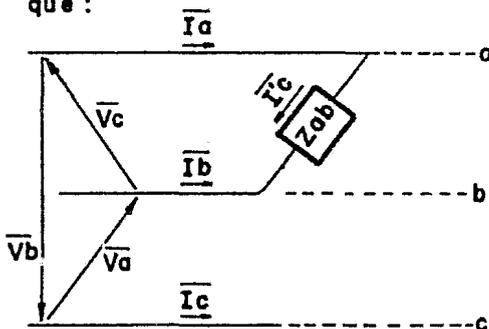
**TENSIONES EN LINEA ENTRE FASES**



**CORRIENTE EN LA CARGA**

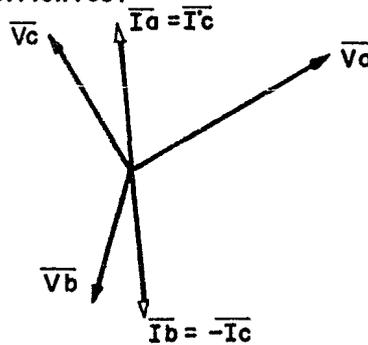


En una red trifásica con carga-monofásica única la distribución de corrientes en la línea es tal que :



$$\begin{aligned} \bar{I}_a &= +\bar{I}'_c \\ \bar{I}_b &= -\bar{I}'_c \\ \bar{I}_c &= 0 \end{aligned}$$

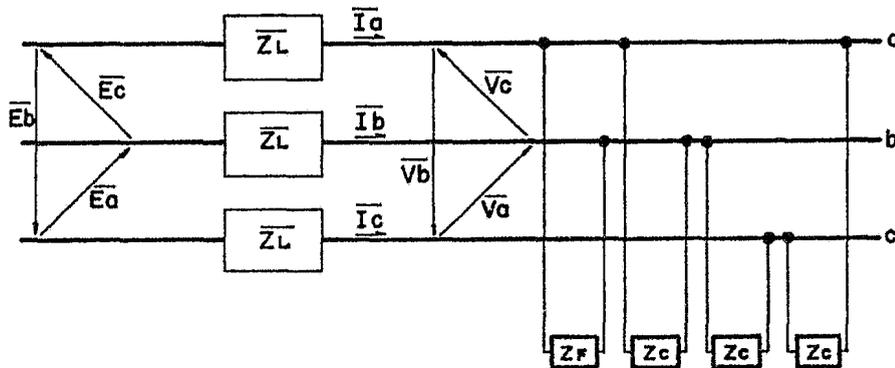
Diagrama vectorial de tensiones y corrientes.



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

$$I'_c = \frac{V_c}{Z_{ab}} \quad \phi_c = \text{arc tang} \frac{R_{ab}}{X_{ab}}$$

### 3. CASO GENERAL DE DESEQUILIBRIO



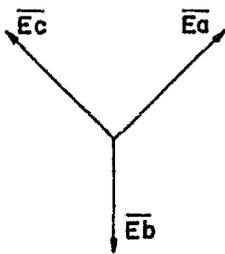
Las tensiones entre fases no son iguales entre si, - ni simétricas, pero si se cumple que :

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

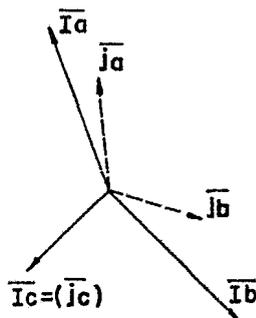
$$\bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{V}_c = 0$$

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

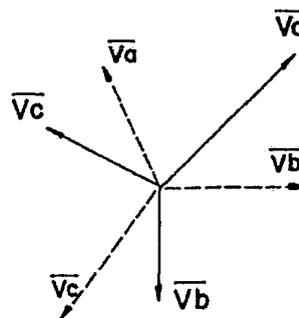
TENSIONES ENTRE FASES A LA SALIDA DEL GENERADOR.



CORRIENTES EN LINEAS

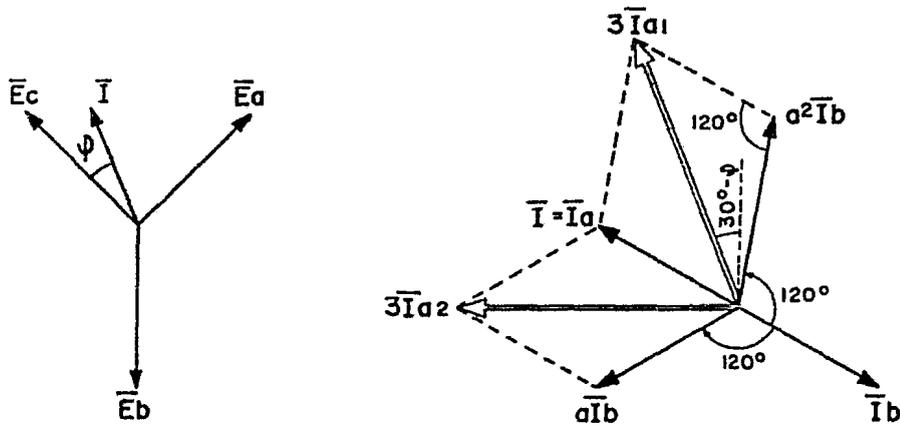
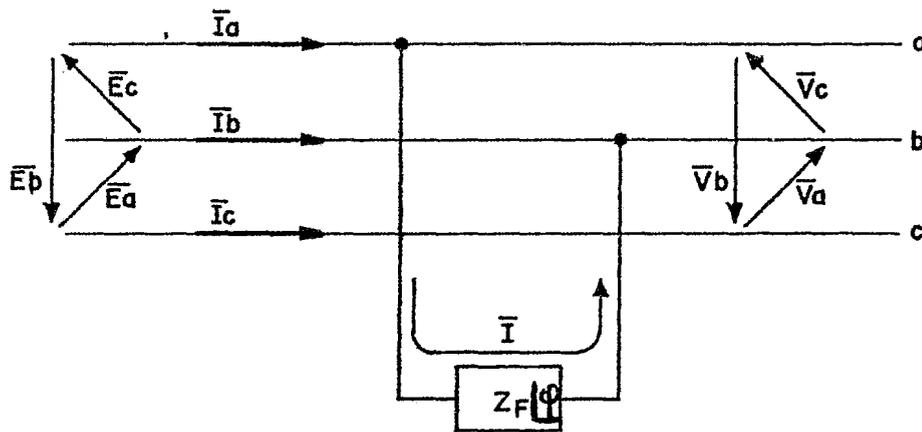


TENSIONES ENTRE FASES



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

Cálculo de la componente de secuencia positiva y negativa de la corriente para una carga monofásica entre las fases a y b.



$$\vec{I}_{a1} = \frac{\vec{I}_a + a^2\vec{I}_b + a\vec{I}_c}{3} = \frac{\vec{I}}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ - \phi$$

$$\vec{I}_{a2} = \frac{\vec{I}_a + a\vec{I}_b + a^2\vec{I}_c}{3} = \frac{\vec{I}}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ - \phi$$

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

- c) 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".
- 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".

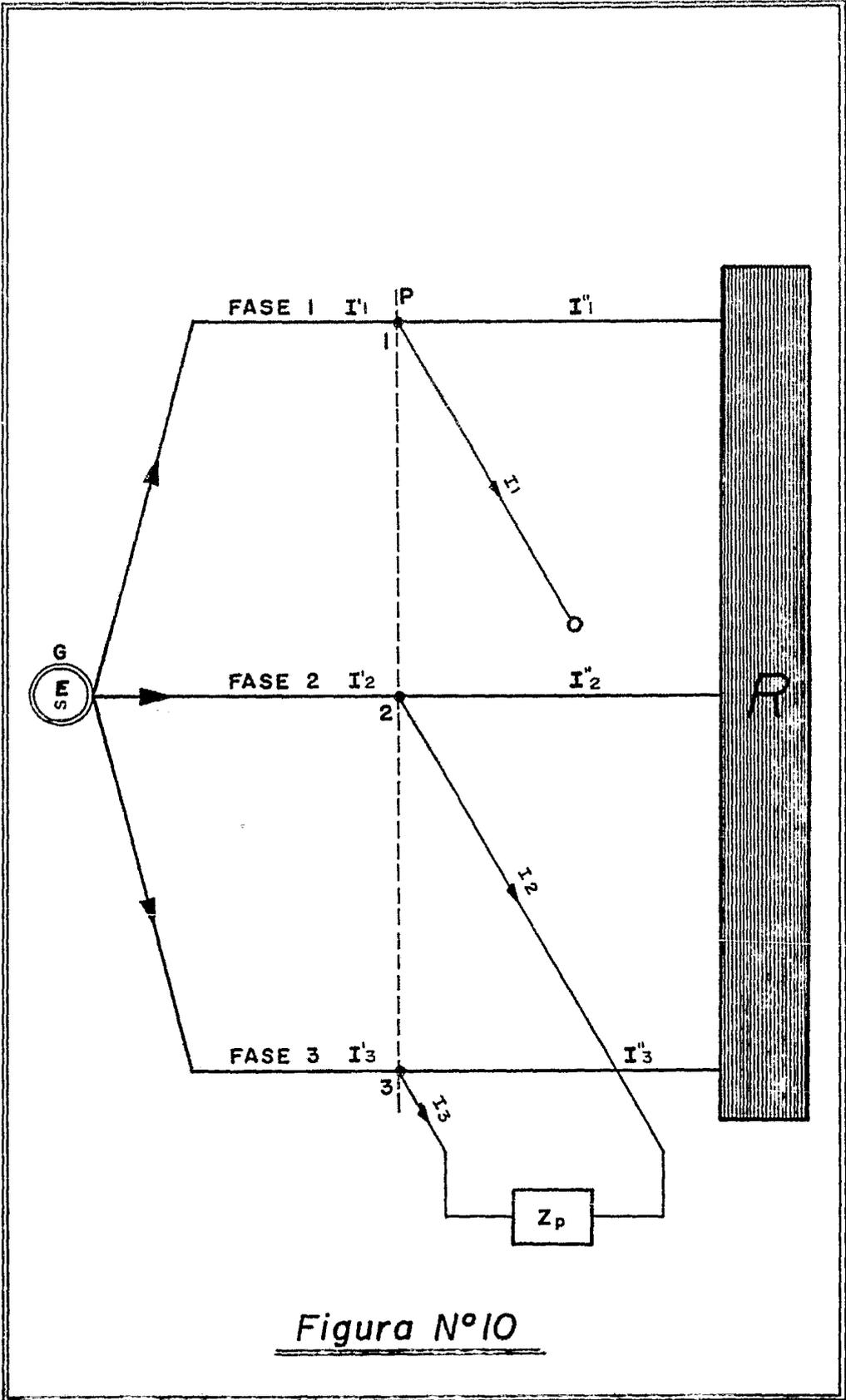


Figura N°10

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).

$$I_1 = I_0 + I_i + I_d$$

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

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

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

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

Obtenemos:

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

$$(2') \quad I_0 + aI_i + a^2I_d = -I_0 - a^2I_i - aI_d$$

$$(3') \quad V_0 + aV_i + a^2V_d - V_0 - a^2V_i - aV_d = (I_0 + aI_i + a^2I_d) Z_p$$

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

$$(2'') \quad 2I_o - I_i - I_d = 0$$

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

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

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 en 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:

$$\begin{array}{rcl}
Z'dI'd & + Vd & = E \\
Z''dI''d & - Vd & = 0 \\
Z'iI'i & + Vi & = 0 \\
Z''iI''i & - Vi & = 0 \\
ZpIo+aZpIi+a^2ZpId+(a^2-a)Vi+(a-a^2)Vd & & = 0 \\
2Io - Ii - Id & & = 0 \\
Io + Ii + Id & & = 0 \\
-I'd + I''d & + Id & = 0 \\
- I'i + I''i + Ii & & = 0
\end{array}$$

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:

$$Vi = \frac{\Delta Vi}{\Delta} \quad Vd = \frac{\Delta Vd}{\Delta}$$

$\Delta$ ,  $\Delta Vi$ ,  $\Delta Vd$ , 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:

$$K = \frac{\Delta Vi}{\Delta Vd}$$

Es necesario calcular  $\Delta Vi$  y  $\Delta Vd$ .

El determinante de la tensión de secuencia ne gativa 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 po sitiva 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"

$$K = \frac{\Delta V_i}{\Delta V_d} = \frac{3(a^2-a) E Z''_d Z'_i Z''_i}{3(a^2-a) E [Z''_d Z'_i Z''_i + Z''_d Z_p (Z'_i + Z''_i)]}$$

dividiendo los dos términos de la fracción por

$$3(a^2-a)EZ''_d(Z'_i + Z''_i)$$

$$K = \frac{\frac{Z'_i Z''_i}{Z'_i + Z''_i}}{\frac{Z'_i Z''_i}{Z'_i + Z''_i}} + Z_p$$

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

$$\frac{1}{Z_{ei}} = \frac{1}{Z'_i} + \frac{1}{Z''_i} = \frac{Z'_i + Z''_i}{Z'_i Z''_i}$$

de donde  $Z_{ei} = \frac{Z'_i Z''_i}{Z'_i + Z''_i}$

El coeficiente de disimetría, puede escribirse:

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

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<sub>ei</sub>" sea equivalente a "Z<sub>ed</sub>", 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 EN TRACCION  
ELECTRICA MONOFASICA 25 Kv, 60 Hz

## CAPITULO V

ESQUEMAS DE SUBESTACIONES EN TRACCION ELECTRICA  
MONOFASICA 25 Kv 60 Hz

## a) 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 fuertes 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 en lo mínimo perturbe la red de energía pública.

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

Deben ser por tanto las subestaciones de tracción enlazadas a líneas de gran capacidad debido a que son éstas las que responden a las necesidades de tracción, siendo así; podemos decir que el conjunto de la red de energía 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 subestación 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 locomotora a través de la catenaria, la energía suministrada deberá cumplir las exigencias fundamentales siguientes:

- 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 generadores 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 cero esta corriente alcanza

su valor de pico. De esta forma, se reducen la oscilación de la tensión y la potencia que puede suministrarse.

- 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 una alimentación sin potencia reactiva alguna es imposible.
  
- La alimentación de energía debe estar estabilizada. Cada interrupción de alimentación de energía 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.

- 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.

## b) 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: el acoplamiento monofásico, en "V" y Scott.

Los factores que determinan el utilizar un acoplamiento en específico, son objeto de un estudio técnico-económico que tendrá en cuenta las siguientes limitaciones como son: 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 esquemas tienen la siguiente configuración:

### 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 de los tres, como lo muestra la figura (11).

Esta disposición necesita en la región férrea, la instalación de zonas neutras para evitar los corto circuito entre fases secundarias, cuyas tensiones se hallan defasadas  $\frac{2T}{3}$ .

Acoplamiento en "Y"

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 desequilibrio se atenúa pero no se suprime. Este acoplamiento necesita un número de zonas neutras doble de aquél necesario para el acoplamiento monofásico.

Acoplamiento "Scott"

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

Las tensiones secundarias están defasadas  $\frac{TT}{2}$  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:

- 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
- mala tasa de 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 éstos montajes aparece solamente cuando el tráfico está bastante equilibrado en las dos antenas, lo que raramente se presenta.

ACOPLAMIENTO DIRECTO

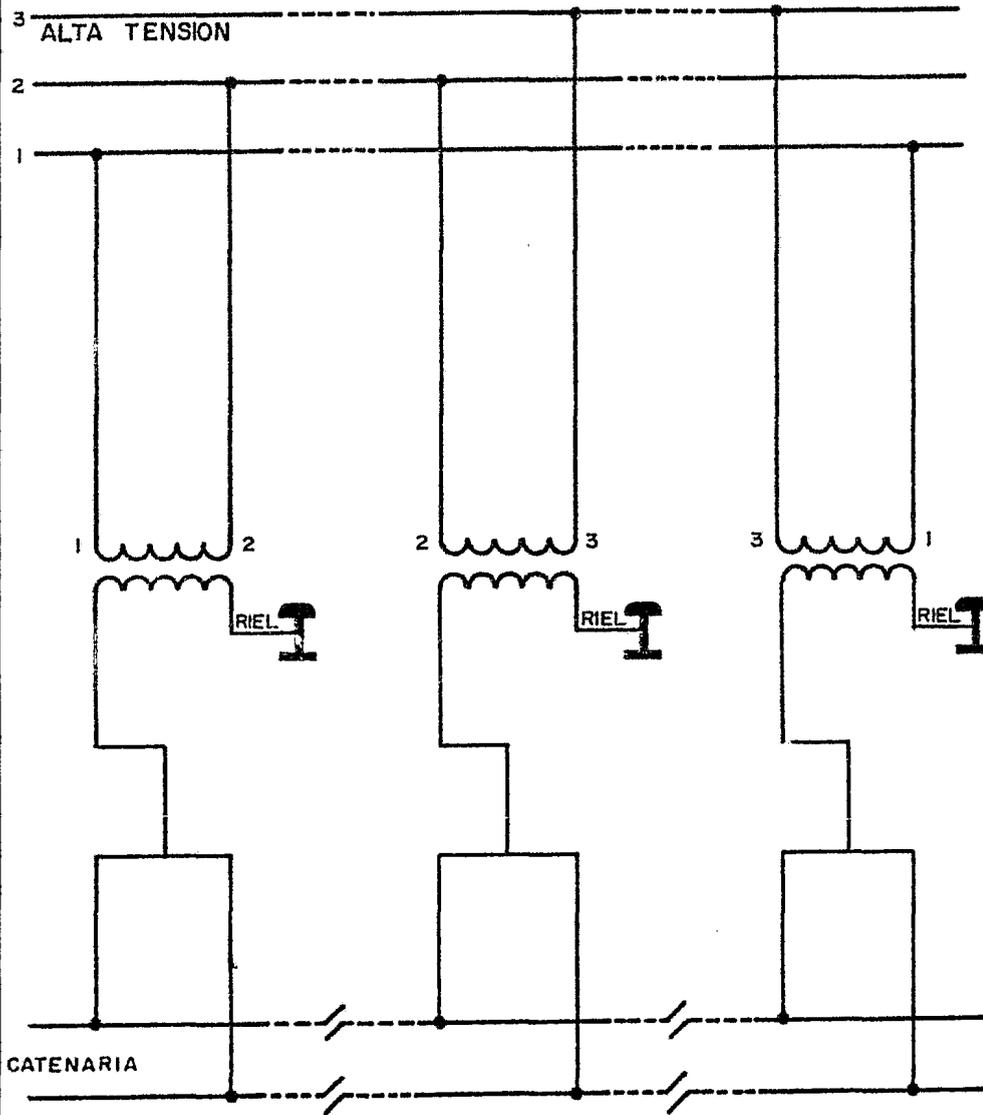


Figura N° 11

# ACOPLAMIENTO EN V

## DIAGRAMA VECTORIAL DELTA ABIERTA-DELTA ABIERTA

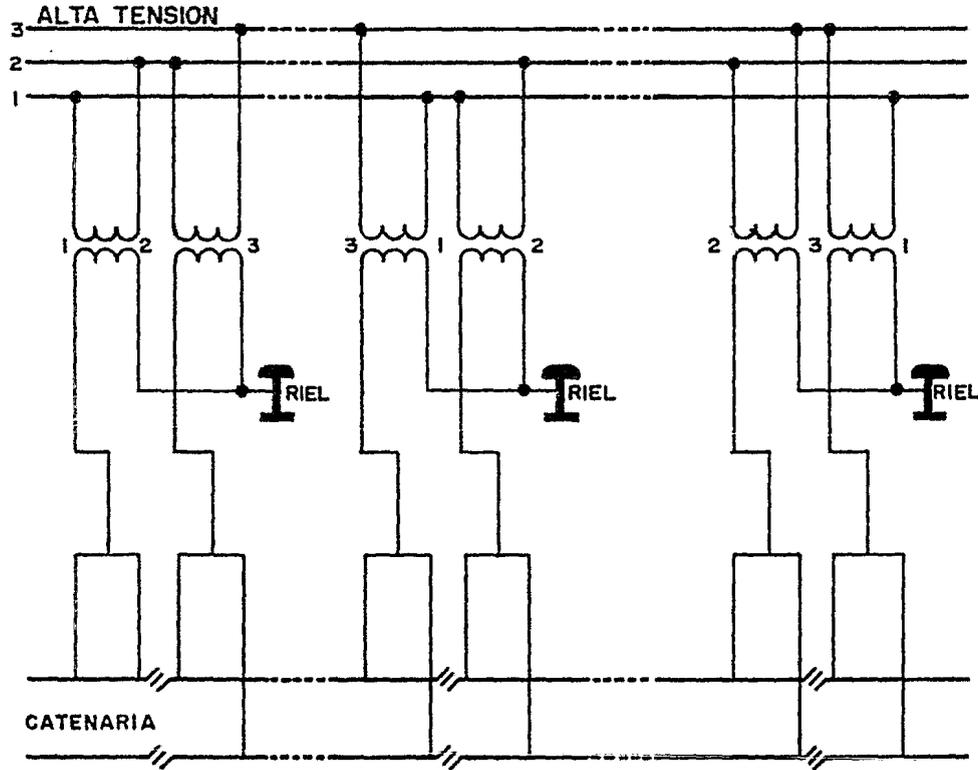
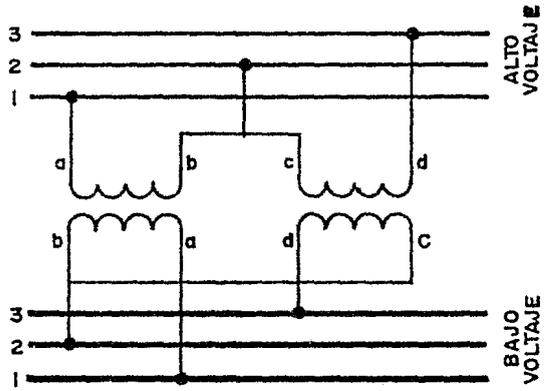
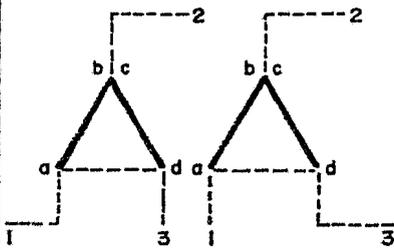


Figura N°12

## \* MONTAJE SCOTT

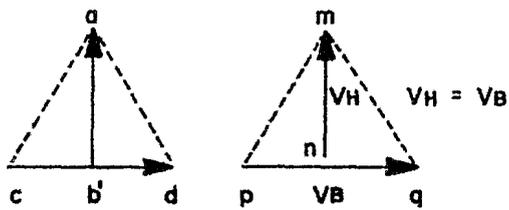
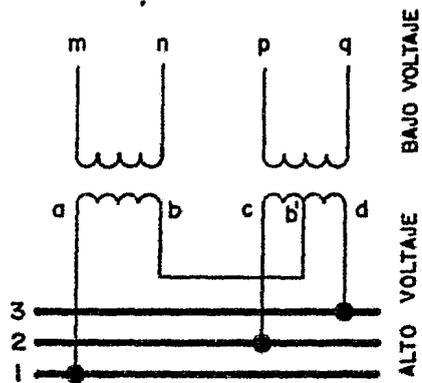


DIAGRAMA VECTORIAL



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

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

LOS DEVANADOS SECUNDARIOS TIENEN CADA UNO  $n_2$  ESPIRAS

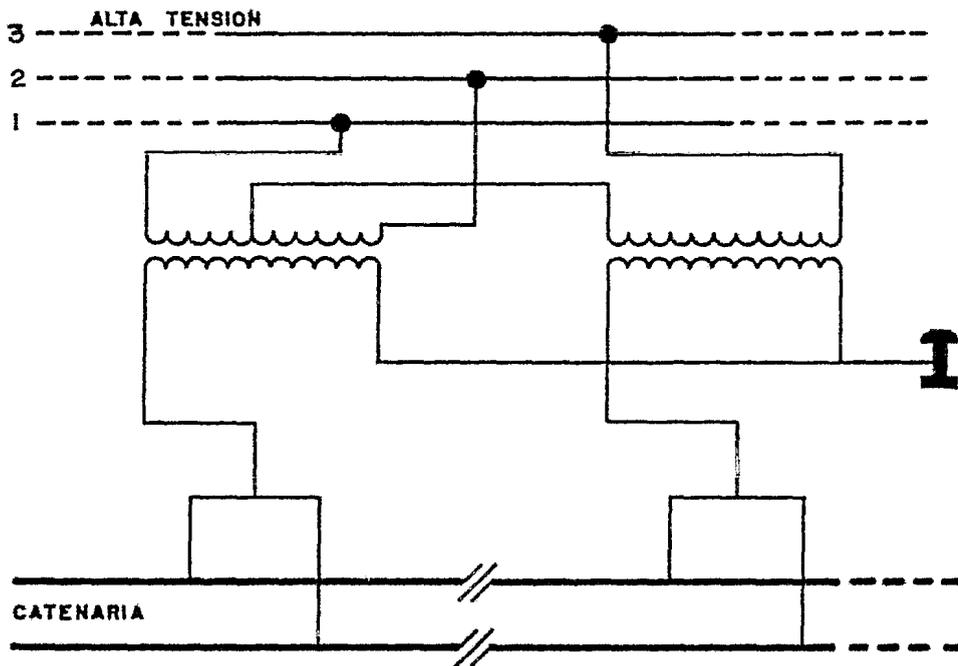


Figura N° 13

### c) 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 razón siguiente:

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 también Puesto de Seccionamiento (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 longi-

tud tal que los pantógrafos de dos locomotoras acopladas no pueden provocar la puesta en paralelo intempestiva de dos antenas alimentadas por fases diferentes.

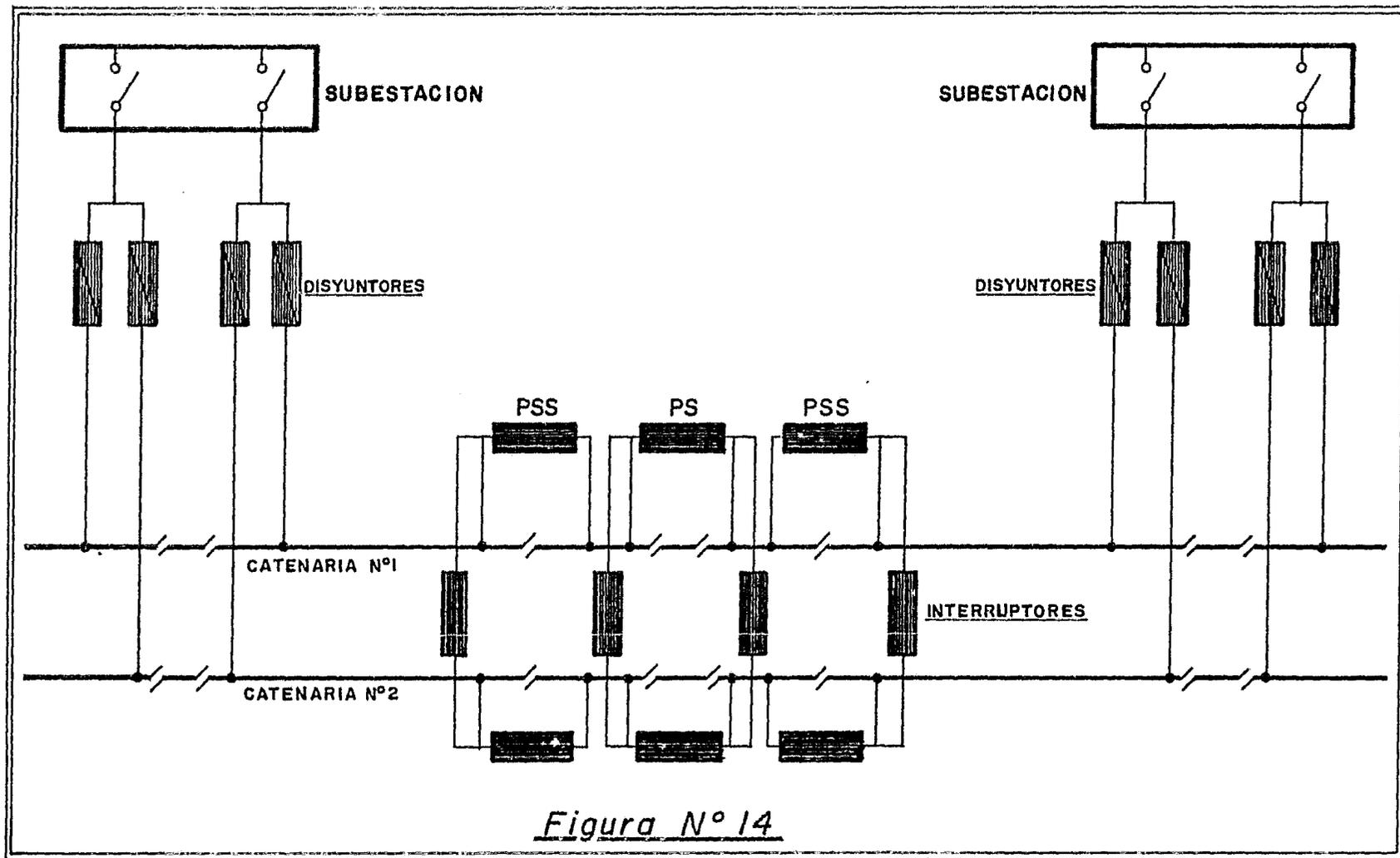
Existen así mismo entre las secciones de separación y la subestación puestos de subseccionamiento (PSS), como lo muestra la figura (14).

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 separación 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.



B I B L I O G R A F I A

## B I B L I O G R A F I A

- I.- MARCEL TESSIER  
"TRACTION ÉLECTRIQUE ET THERMO-ÉLECTRIQUE", 1978  
Éditions Scientifiques Riber  
54, Rue du Vert-Bois, Paris
- II.- JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY, (JICA)  
"SEMINAR ON ELECTRIFICATION", 1982  
Mitsui, Building  
2-1, Nishishinjuku  
Shinjuku-Ku  
Tokyo, Japan
- III.- ASOCIACION DE INVESTIGACION DEL TRANSPORTE, (AIT)  
"JORNADAS TECNICAS SOBRE ELECTRIFICACION 25 Kv,  
50 Hz", 1981  
Alberto Alcocer # 38  
Madrid - 16, España
- IV.- RAFAEL GUERRERO C.  
"CALCULO DE FALLAS EN SISTEMAS DE POTENCIA", 1978  
Federación Editorial Mexicana  
Manzanillo 64  
México, 7, D.F.