

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**REHABILITACIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN 138KV
DOBLE TERNA TRUJILLO NORTE – SANTIAGO DE CAO.
TRABAJOS CON LÍNEA INDUCIDA**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

MARLON RIVERA ROLDAN

**PROMOCIÓN
2001 – II**

**LIMA – PERU
2006**

**REHABILITACIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN 138KV
DOBLE TERNA TRUJILLO NORTE – SANTIAGO DE CAO.
TRABAJOS CON LÍNEA INDUCIDA**

*Debo expresar mi gratitud:
A mi madre, inspiración plena de lucha y
sacrificio,
A mis hermanos, por el apoyo incondicional en
mi carrera,
Y mis sobrinas, esperanza de superación.*

SUMARIO

La rehabilitación o mantenimiento de una línea eléctrica ubicada en la vecindad de otra, implica estar expuesto al fenómeno de inducción. Surge la necesidad de conocer las magnitudes de tensión y corriente inducida según sea el caso para saber si afecta la integridad física de las personas que están expuestas, tomar las medidas de seguridad para cada caso y elaborar un plan de trabajo eficiente.

Por tal motivo se ha analizado el fenómeno de inducción utilizando los parámetros eléctricos de un sistema de transmisión: Inductancia y Capacitancia las cuales se presentan mediante expresiones matriciales y con ello hacer los cálculos para determinar la tensión y corriente inducida.

La efectividad de lo desarrollado se aplica a la Línea de Transmisión 138KV doble terna Trujillo Norte – Santiago de Cao, se da a conocer las magnitudes de la inducción, saber cual de los dos efectos es el mas influyente, el efecto inductivo o el efecto capacitivo.

Este procedimiento de cálculo es aplicable a cualquier conjunto de líneas eléctricas, que son colindantes e influenciadas una de la otra.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	
PRELIMINARES	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Objetivo	4
1.3 Alcances	4
1.4 Situación Actual	5
CAPÍTULO II	
PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA	7
2.1 Características Generales	7
2.1.1 Ubicación	7
2.1.2 Condiciones Climatológicas	7
2.1.3 Características Eléctricas del Sistema	7
2.1.4 Demanda Máxima	8
2.1.5 Estructuras de soporte	8
2.2 Alternativas de Solución	9
2.3 Rehabilitación de la Línea de Transmisión	9
CAPÍTULO III	
DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN INDUCIDA	14
3.1 Inductancia	15
3.1.1 Campo Magnético de un conductor largo y recto	16
3.1.2 Flujo Magnético de un conductor largo y recto	17
3.1.3 Flujo Magnético enlazado en un circuito	19
3.1.4 Consideraciones para simplificación	22

3.1.5	Cálculo de la Inductancia	23
3.2	Reactancia Inductiva y Tensión Inducida	25
3.3	Determinación de la tensión inducida debido al Efecto Inductivo	27

CAPÍTULO IV

CÁLCULO DE LA TENSIÓN INDUCIDA POR EFECTO

CAPACITIVO

34

4.1	Capacitancia	34
4.1.1	Campo eléctrico de un conductor largo y recto	35
4.1.2	Diferencia de potencial de un conductor largo y recto	36
4.1.3	Cálculo de la capacitancia de un sistema de conductores	37
4.1.4	Cálculo de la capacitancia de un sistema de conductores considerando el efecto del suelo	39
4.2	Reactancia Capacitiva y Tensión Inducida	41
4.3	Determinación de la tensión inducida debido al Efecto Capacitivo	43
4.3.1	Cálculo de la corriente capacitiva en condiciones normales	43
4.3.2	Cálculo de la tensión inducida en los conductores no energizados	46
4.3.3	Cálculo de la corriente capacitiva en el proceso de desmontaje de conductores	49
4.3.4	Caso de electrocución de una persona en la línea de transmisión	52
4.3.5	Caso de electrocución de una persona en un tramo de la línea de transmisión	54

CAPÍTULO V

DESCRIPCIÓN BREVE DE LA OBRA A REALIZAR

57

5.1	Criterios Básicos para la Rehabilitación de la Línea L-118	57
5.1.1	Brigadas de trabajo	57
5.1.2	Delimitación material de la zona de trabajo	58
5.1.3	Control del estado de un Poste	58
5.1.4	Medidas a observar durante la subida a una estructura	58
5.1.5	Utilización de Maquinas Elevadoras cerca de Instalaciones bajo tensión	59
5.1.6	Trabajos que interfieren el tráfico vehicular	59
5.1.7	Verificadores de falta de tensión	59
5.1.8	Pértigas Aislantes	59
5.1.9	Dispositivos de Puesta a Tierra y en Cortocircuito	59

5.1.10	Excavación de Pozos y Zanjas	60
5.2	Sistema de Puesta a Tierra	60
5.3	Tendido de Conductor engrasado de 240 mm ²	62
5.4	Trazo de Ruta de la Línea de Transmisión L-118 Rehabilitada	63
5.5	Materiales utilizados en la obra de rehabilitación	64
5.5.1	Conductor de Aleación de Aluminio	64
5.5.2	Accesorios del Conductor de Aleación de Aluminio	65
5.5.3	Aisladores	66
5.5.4	Accesorios de los Aisladores y Ferretería	66
5.5.5	Ferretería para armado de Postes y Crucetas	67
5.5.6	Crucetas de Madera	68
5.5.7	Materiales para Retenidas	68
5.5.8	Materiales para el Sistema de Puesta a Tierra	69
	CONCLUSIONES	71
	ANEXOS	75
	ANEXO A	
	Perfil del Trazo de Terreno y Plano de Recorrido de la L.T. Trujillo Norte – Santiago de Cao	76
	ANEXO B	
	Tipos de estructura de la L.T. Trujillo Norte – Santiago de Cao	79
	ANEXO C	
	Características Técnicas de los Conductores utilizados en la Línea de Transmisión	84
	ANEXO D	
	Características Técnicas del Aislador Antineblina	88
	ANEXO E	
	Puesta a Tierra	90
	BIBLIOGRAFIA	92

PRÓLOGO

En los cursos de antegrado en ingeniería eléctrica, tales como Líneas de Transmisión, Redes de Distribución y similares, se da a conocer los parámetros eléctricos de una línea eléctrica, los mas relevantes son dos, la Inductancia y la Capacitancia, las cuales están expresadas mediante una formula unidimensional, que se obtiene suponiendo una red equilibrada y por tanto representado por un circuito equivalente monofásico, estas formulas unidimensionales se aplican en análisis de flujos de potencia y cálculos de caída de tensión.

Además, estas formulas fueron simplificadas para ahorrar tiempo de cálculo, ya que era muy tedioso resolverlos y se empleaba demasiado tiempo. En la actualidad se cuenta con métodos computacionales que resuelven operaciones matriciales ahorrando el tiempo de cálculo.

Para determinar la tensión y corriente inducida en una línea eléctrica, se necesita expresar la Inductancia y Capacitancia de la línea eléctrica de forma n-dimensional. Por tanto se tiene el concepto de Matriz Inductancia y Matriz Capacitancia, estas matrices son n-dimensionales, donde n es el número de conductores que compone la línea eléctrica.

El objetivo del graduando al escribir este informe, es obtener la matriz inductancia y matriz capacitancia y con ello conocer las magnitudes de la inducción en la línea eléctrica y saber a qué estamos expuestos; además este procedimiento de cálculo es aplicable a cualquier otra línea eléctrica de transmisión o distribución de cualquier nivel de tensión.

La Línea de Transmisión 138KV Trujillo Norte – Santiago de Cao, es materia de cálculo de la tensión y corriente inducida para este informe.

En el capitulo I se realiza una introducción al tema ampliando el sumario. Se describen los antecedentes y se señala el objetivo del informe. También se presenta la situación actual de la línea de transmisión 138KV, que es previa a su rehabilitación.

En el capítulo II se exponen las características generales de la línea de transmisión 138KV y condiciones climatológicas. Se plantean alternativas de solución y se opta por su rehabilitación, a partir de ello se hace una descripción del proceso de rehabilitación, haciendo presente que se va a realizar los trabajos con líneas inducidas.

En el capítulo III se determina la tensión inducida, en primera instancia se hace un análisis detallado para determinar una fórmula general para determinar la tensión inducida por efecto del campo magnético, esta fórmula se aplica al caso de la línea de transmisión 138KV, se obtienen valores moderados que son poco relevantes para nuestro caso.

En el capítulo IV se hace el cálculo de la tensión inducida por efecto del campo eléctrico, se obtiene una expresión general, luego se aplica al caso de la línea de transmisión 138KV y se obtienen valores de inducción considerables que afecta la integridad física de las personas.

Como consecuencia del fenómeno de inducción que son determinantes para tomar medidas de seguridad en el proceso de rehabilitación, el capítulo V hace una descripción del proceso de trabajo, adoptando pautas y criterios de trabajos con líneas inducidas, se describe someramente el trabajo de rehabilitación de la línea de transmisión 138KV.

CAPÍTULO I

PRELIMINARES

1.1. Antecedentes

La Línea de Transmisión 138KV Trujillo Norte - Santiago de Cao está diseñada en doble terna, constituido por 06 conductores de Aleación de Aluminio de 185mm² de sección, con disposición horizontal en estructuras de madera de 21m de altura. Tiene una longitud de 27.45 Km.

La Línea de Transmisión 138KV cuya denominación para cada terna es L-118 y L-119, es utilizada para suministrar energía a los clientes de HIDRANDINA S.A. de la provincia de Ascope (Valle Chicama) departamento de La Libertad, esta línea tiene como subestación de partida la SET Trujillo Norte de propiedad de REP S.A. y como subestación de llegada la subestación Santiago de Cao, con una máxima demanda de 16 MVA. Teniendo como clientes a:

- Industrias Manufacturera y Agro Industriales.
- Industrias Pesqueras y Conserveras ubicados en el Puerto Malabrigo; y
- Diversas localidades urbanas de la provincia de Ascope.

El estado de conservación de esta Línea de Transmisión de doble terna es muy crítico debido a su antigüedad de mas de 25 años, siendo expuesta a los agentes contaminantes proveniente de la brisa salina del mar y de los vientos ya que se encuentra en zona de alta corrosión ambiental. Los componentes metálicos de ambas ternas se encuentran altamente oxidados y corroídos debido al efecto Joule y efecto galvánico principalmente, incrementando las pérdidas de energía en la transmisión y afectando negativamente la confiabilidad del servicio eléctrico por rotura de conductores, situación agravada por la aparición en la zona de vándalos organizados dedicados a la comercialización ilegal de conductores hurtados.

Una sola terna en servicio satisface la demanda requerida. La otra terna se mantiene con tensión para evitar el robo de conductores y accesorios. En síntesis, ambas ternas se energizan en 138KV pero una de ellas transporta la energía y la otra no, y viceversa, estos cambios se realizan en forma periódica.

1.2. Objetivo

La Línea de Transmisión 138KV Trujillo Norte – Santiago de Cao es una instalación electromecánica estratégica desde el punto de vista operativo; y su estado de conservación es crítico por lo ya expuesto en los párrafos anteriores. Para dar una solución integral, reduciendo las pérdidas de energía, costos de mantenimiento, robo de conductores y principalmente lograr su operación óptima; se tiene por objetivo rehabilitar la Línea de Transmisión.

Esta rehabilitación comprende:

- Renovar una sola terna de la Línea de Transmisión 138KV, en este caso la Línea L-118, que consiste básicamente en el reemplazo de la totalidad de los conductores, aisladores, accesorios y ferretería.
- Desmontaje de la segunda terna, Línea L-119.

Adicionalmente, con la rehabilitación de esta Línea de Transmisión 138KV se conseguirá reducir significativamente las Interrupciones intempestivas del suministro eléctrico a los clientes libres y regulados involucrados, que influye en la imagen empresarial.

Se sabe que esta línea de transmisión contiene dos ternas y existe inducción entre ambas, en consecuencia el trabajo de rehabilitación implica mayor riesgo en comparación con una línea de transmisión de simple terna.

Por tanto, el objetivo principal es conocer las magnitudes de inducción en la línea de transmisión y saber a qué estamos expuestos.

1.3. Alcances

El contenido de este informe se centra en calcular la inducción en los conductores no energizados, permitiendo conocer las magnitudes de tensión y corriente inducidas en estos conductores, conocer a qué estamos expuestos y en base a ello tomar las medidas de seguridad y procedimientos de trabajo necesarios. Las actividades posteriores a este

cálculo de inducción se mencionarán de manera sumaria, ya que su procedimiento es conocido y se aplica en la gran mayoría de las líneas de transmisión.

1.4. Situación Actual

La Línea de Transmisión está ubicada dentro del área de concesión de Hidrandina S.A., en la localidad de Trujillo, Departamento de La Libertad, tiene una longitud de 27.45 Km., su recorrido es por litoral desértico y tierras de cultivo.

La Línea de Transmisión 138KV Trujillo Norte - Santiago de Cao, tiene como punto de inicio el Pórtico de Salida de la Subestación Trujillo Norte, está soportada en dos (02) estructuras metálicas y ochenta y tres (83) estructuras de madera, enrumba sobre un terreno predominante arenoso hasta llegar al Pórtico de Llegada de la Subestación Santiago de Cao (ver Anexo A).

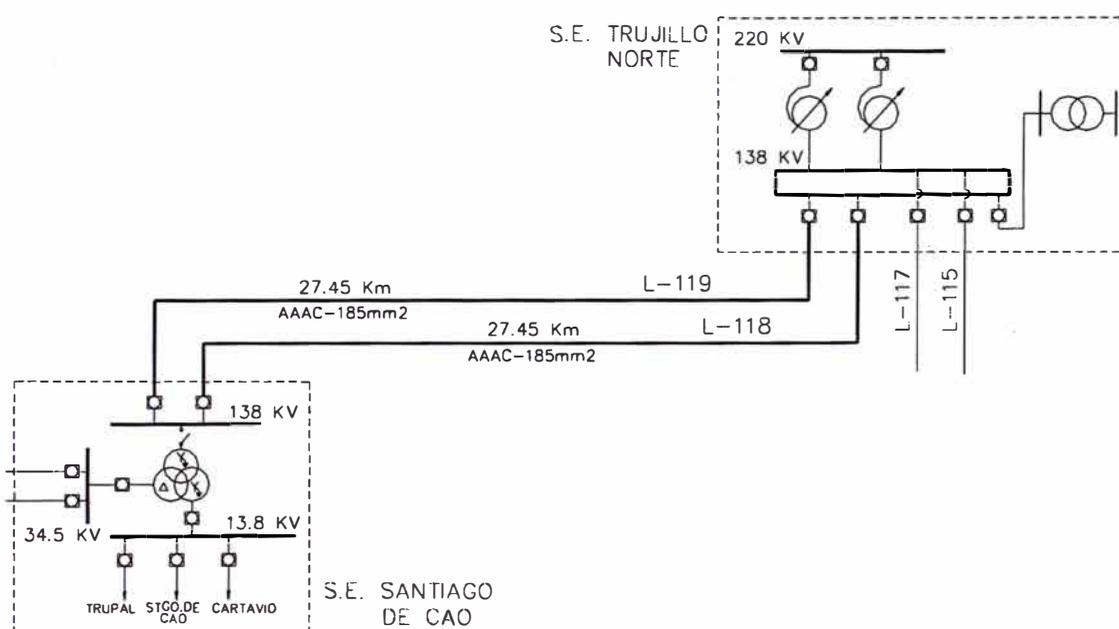


Fig. 1.1 Diagrama Unifilar de la línea de transmisión 138KV.

Como se ve en el diagrama unifilar, la línea está constituida por dos ternas codificadas como L-118 y L-119, con conductores de Aleación de Aluminio AAAC de 185 mm² y soportadas mediante estructuras de postes de madera de 21m de altura, los postes están en buen estado.

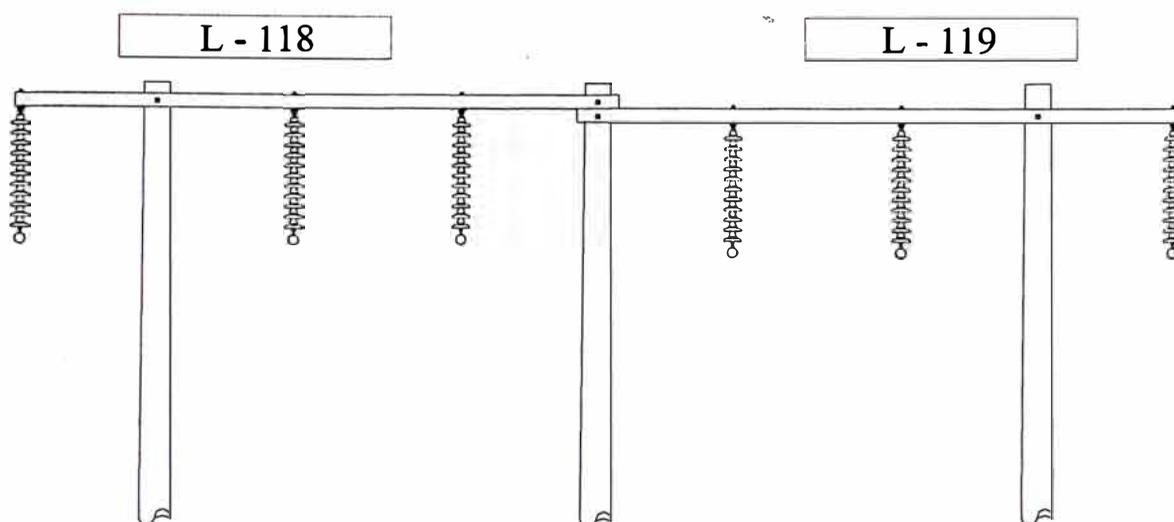


Fig. 1.2 Estructura de suspensión típica de la Línea de Transmisión 138KV.

La línea en su totalidad está sujeta a la acción corrosiva de la atmósfera por la cercanía al mar, y a consecuencia de ello, todos los componentes de la línea, tales como los conductores, aisladores y ferretería, están severamente corroídos, presentándose rotura de los hilos, y así mismo a la antigüedad de los conductores, afectando la continuidad del servicio de energía eléctrica.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA

2.1. Características Generales

2.1.1 Ubicación

La Línea de Transmisión está ubicada dentro del área de concesión de Hidrandina S.A., en la localidad de Trujillo, Provincia de Trujillo, Departamento de La Libertad, tiene una longitud de 27.45 Km. altitud de 10 a 250 m.s.n.m. su recorrido es por litoral desértico y tierras de cultivo (Anexo A).

2.1.2 Condiciones Climatológicas

El clima es calido con temperatura promedio anual de 20°C abundante neblina y alto nivel de contaminación, los parámetros climatológicos son los siguientes:

-	Temperatura Mínima	:	12 °C
-	Temperatura Media	:	20 °C
-	Temperatura Máxima	:	40 °C
-	Velocidad del viento	:	70 Km. /h
-	Humedad Relativa Máxima Promedio Mensual	:	100 %
-	Humedad Relativa Mínima Promedio Mensual	:	70 %
-	Neblina	:	Abundante
-	Contaminación	:	Severa
-	Altitud m.s.n.m.	:	10 a 250

2.1.3 Características Eléctricas del Sistema

La Línea de Transmisión de 138KV es aérea, las principales características eléctricas son las siguientes:

-	Tensión Nominal	:	138 KV
-	Sistema	:	Trifásico

- Frecuencia : 60 Hz
- Instalación : Aérea
- Disposición : Horizontal con conductor desnudo de Aleación de Aluminio AAAC engrasado.

2.1.4 Demanda Máxima

La Línea de Transmisión L-118 L-119 de 138KV, suministra energía a todos los clientes de HIDRANDINA S.A. ubicados en la provincia de Ascope, tiene una máxima demanda de 16 MVA.

Adicionalmente, existe la posibilidad que nuevas industrias pesqueras y conserveras se instalen en el puerto Malabrigo, como consecuencia de ello la demanda máxima puede aumentar en el mediano plazo.

2.1.5 Estructuras de soporte

La línea de transmisión está soportada por 02 estructuras metálicas y 83 estructuras de madera. Las estructuras de madera están compuestas por postes de madera de 21m de altura y crucetas de madera de 11.5m, 7.5m y 5.5m de longitud según sea el caso (Anexo B). Las estructuras están clasificadas según la Tabla 2.1.

TABLA N° 2.1 Clasificación de Estructuras

Cantidad	Tipo de Estructura	Función
02	ZA – 80	Torre Metálica de Anclaje
01	E1	Anclaje Angular Recto
08	E5	Anclaje-Retención y Angular
01	E6	Suspensión Angular
73	E7	Suspensión Normal en Alineamiento

Como se puede apreciar, la estructura representativa de la línea de transmisión es la estructura tipo suspensión normal en alineamiento E7.

2.2. Alternativas de solución

Debido a la antigüedad y su estado precario, la línea de transmisión presenta altos costos de operación y mantenimiento, ambas terna están energizadas pero solo una terna brinda el servicio eléctrico, la segunda terna se mantiene energizada con la finalidad de evitar el robo de los conductores. Mantener esta segunda terna energizada demanda un alto nivel de pérdidas de energía.

Además los niveles de interrupción del servicio eléctrico de la línea de transmisión son altos, afectando su confiabilidad y elevando su costo marginal.

Existen varias alternativas de solución para cumplir con el objetivo que es mejorar la calidad de suministro:

- Mantener una terna sin energizar y la otra energizada en servicio. Las pérdidas de energía disminuye, pero el robo de conductores de la terna sin energizar sería inminente, la operación y confiabilidad de la línea de transmisión no mejora.
- Mantener una terna sin energizar y la otra energizada en servicio, por 15 días alternativamente para cada terna. Las operaciones de maniobra serían muy frecuentes, además el interruptor de potencia y el módulo de salida de la línea de transmisión es de propiedad de la empresa transmisora REP S.A. lo cual no se hace viable y eleva el costo de operación. La confiabilidad de la línea no mejora
- Reubicación de la línea de transmisión, haciendo un nuevo recorrido paralelo a la carretera Panamericana Norte y evitar que la línea cruce por zonas de alta corrosión. El costo es muy elevado porque se trata de una línea nueva.
- Desmantelar una terna y repotenciar la otra reemplazando los conductores y la totalidad de los aisladores, ferretería y accesorios. Las pérdidas de energía serían mínimas, se reducen los gastos de operación y mantenimiento. La línea de transmisión sería muy confiable.

Esta última alternativa es la más aceptable, técnica y económicamente. Esta alternativa es la Rehabilitación de la Línea de Transmisión.

2.3. Rehabilitación de la Línea de Transmisión

La Rehabilitación de esta importante y estratégica línea de transmisión, comprende el reemplazo de la totalidad de los conductores, aisladores, accesorios y ferretería de una sola terna L-118, siendo la terna L-119 desmontada en su totalidad.

En detalle, la rehabilitación consiste en:

- Repotenciar una terna de la Línea de Transmisión 138KV denominada L-118 conformada de la siguiente manera:

02 fases de la antigua terna L-118 de la Línea de Transmisión 138KV.

01 fase de la antigua terna L-119 de la Línea de Transmisión 138KV.

- Desmontar la otra terna de la línea de transmisión 138KV conformada de la siguiente manera:

01 fase de la antigua terna L-118 de la Línea de Transmisión 138KV.

02 fases de la antigua terna L-119 de la Línea de Transmisión 138KV.

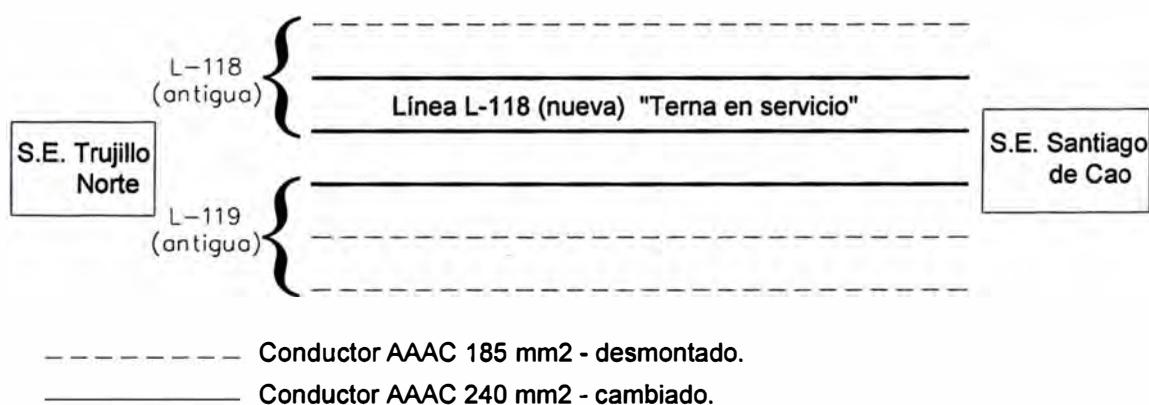


Fig. 2.1 Línea de Transmisión 138KV rehabilitada.

Las actividades principales que se realizarán en la nueva línea de transmisión 138KV denominada L-118 serán:

- Instalación de 227 Pozos de Puesta a Tierra.
- Desmontaje de conductores, cadenas de aisladores, retenidas, amortiguadores, ferreterías y accesorios de 2 fases de la antigua Línea de Transmisión L-118.
- Desmontaje de conductores, cadenas de aisladores, retenidas, amortiguadores, ferreterías y accesorios de 1 fase de la antigua Línea de Transmisión L-119.
- Desmontaje de 10 crucetas de madera de 11.5 m, instalación de 10 crucetas de madera de 11.5 m (previa verificación en el terreno).
- Instalación de 27.45 Km. de terna de conductor de aleación de aluminio AAAC 240 mm² de 37 hilos engrasado.
- Instalación de 55 retenidas simples con doble cable alumoweld de 7 N°9 AWG.

- Ensamble e instalación de cadenas de aisladores; de los tipos suspensión y anclaje con sus respectivas ferreterías y accesorios.
- Instalación de amortiguadores tipo PVC sólido para conductor de 240 mm².

Las principales actividades que se realizarán en la terna a dismantelar será:

- Desmontaje de conductores, cadenas de aisladores, retenidas, amortiguadores, ferreterías y accesorios de la otra fase de la antigua Línea de Transmisión L-118.
- Desmontaje de conductores, cadenas de aisladores, retenidas, amortiguadores, ferreterías y accesorios de las otras dos fases de la antigua Línea de Transmisión L-119.
- Retiro de 6 postes de madera.

La rehabilitación de la línea de transmisión no involucra el reemplazo de los postes y las crucetas de madera por estar en buenas condiciones de conservación, salvo algunas excepciones.

Al concluir los trabajos de rehabilitación de la línea de transmisión, la nueva configuración para la estructura de suspensión, por ejemplo, es la que aparece en la figura 2.2. La nueva configuración de los cuatro tipos de estructuras restantes de la línea, se pueden ver en el Anexo B.

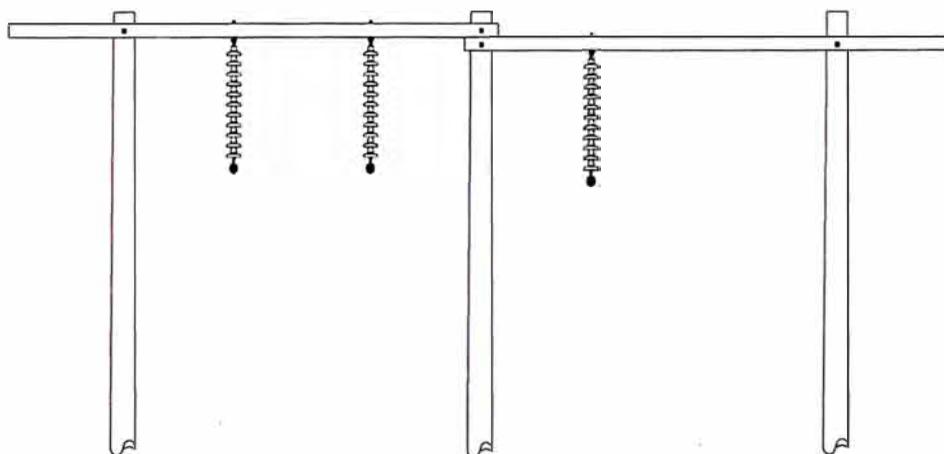


Fig. 2.2 Estructura de suspensión rehabilitada de la Línea de Transmisión 138KV.

En el diagrama unifilar, la rehabilitación de la línea de transmisión 138KV Trujillo Norte – Santiago de Cao queda determinada por un nuevo y único circuito denominado Línea L-118 (Figura 2.3).

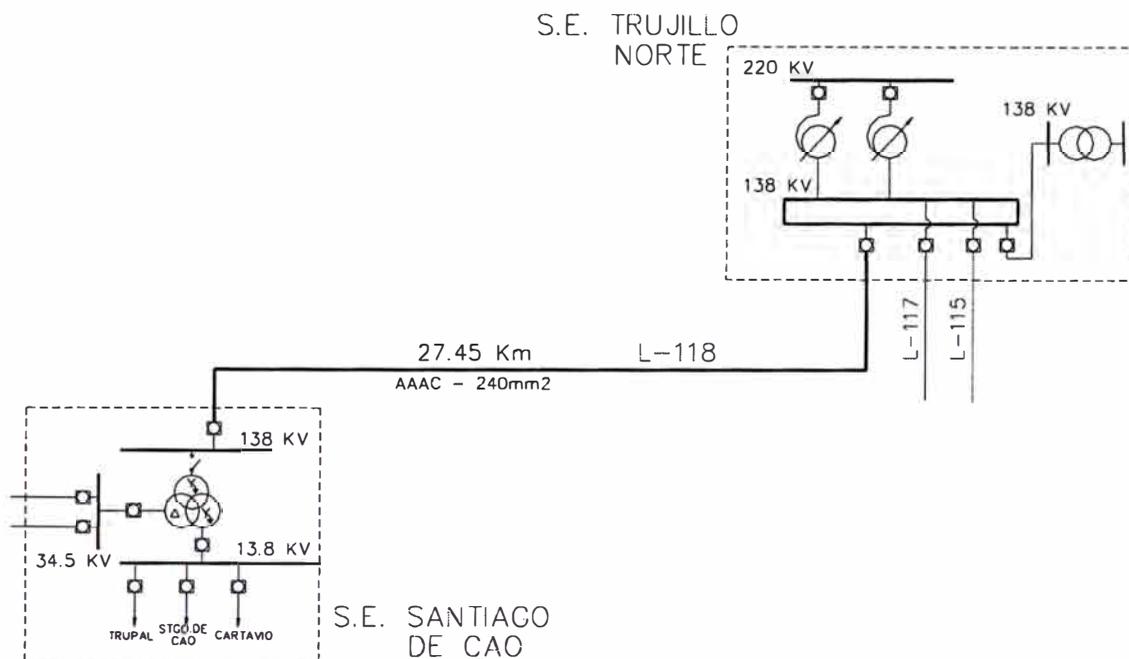


Fig. 2.3 Diagrama Unifilar de la línea de transmisión 138KV rehabilitada.

Con la rehabilitación de la línea de transmisión se consigue:

- Reducir las interrupciones intempestivas del suministro eléctrico a los clientes libres y regulados.
- Garantizar un nuevo programa de venta de energía.
- Contribuir con el fortalecimiento económico-financiero de las industrias manufactureras pesqueras e industriales de la provincia de Ascope, quienes en varias ocasiones expresan su preocupación por la deficiencia y mala calidad del suministro eléctrico.
- Eliminar el pago de compensaciones y multas.
- Mejorar la imagen de la empresa concesionaria del servicio eléctrico.

La Rehabilitación de la Línea de Transmisión 138KV implica realizar trabajos de montaje y desmontaje de conductores y accesorios **sin interrupción del servicio eléctrico**; es decir, la línea estará permanentemente energizada, garantizando la continuidad del servicio eléctrico.

Debido a que esta actividad implica riesgos de tensiones y/o corrientes inducidas por líneas eléctricas adyacentes o fenómenos atmosféricos, se contará con personal técnico competente y habituado a las prácticas de seguridad y familiarizado con el uso de equipos y herramientas para líneas energizadas.

Para el trabajo seguro del personal en las tareas de rehabilitación en una Línea permanentemente inducida, se realiza el Cálculo de las Tensiones Inducidas para que luego sea posible desarrollar una metodología de trabajo seguro, así como la ubicación básica de las puestas a tierra temporarias.

CAPÍTULO III

DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN INDUCIDA

La nueva Línea de Transmisión 138KV L-118 está compuesta por las fases A, B y C, con conductores nuevos de aleación de aluminio AAAC de 240mm^2 ; los aisladores, accesorios y ferretería también son nuevos. Estas fases están dispuestos en forma horizontal y ubicados al centro de la estructura (figura 3.1).

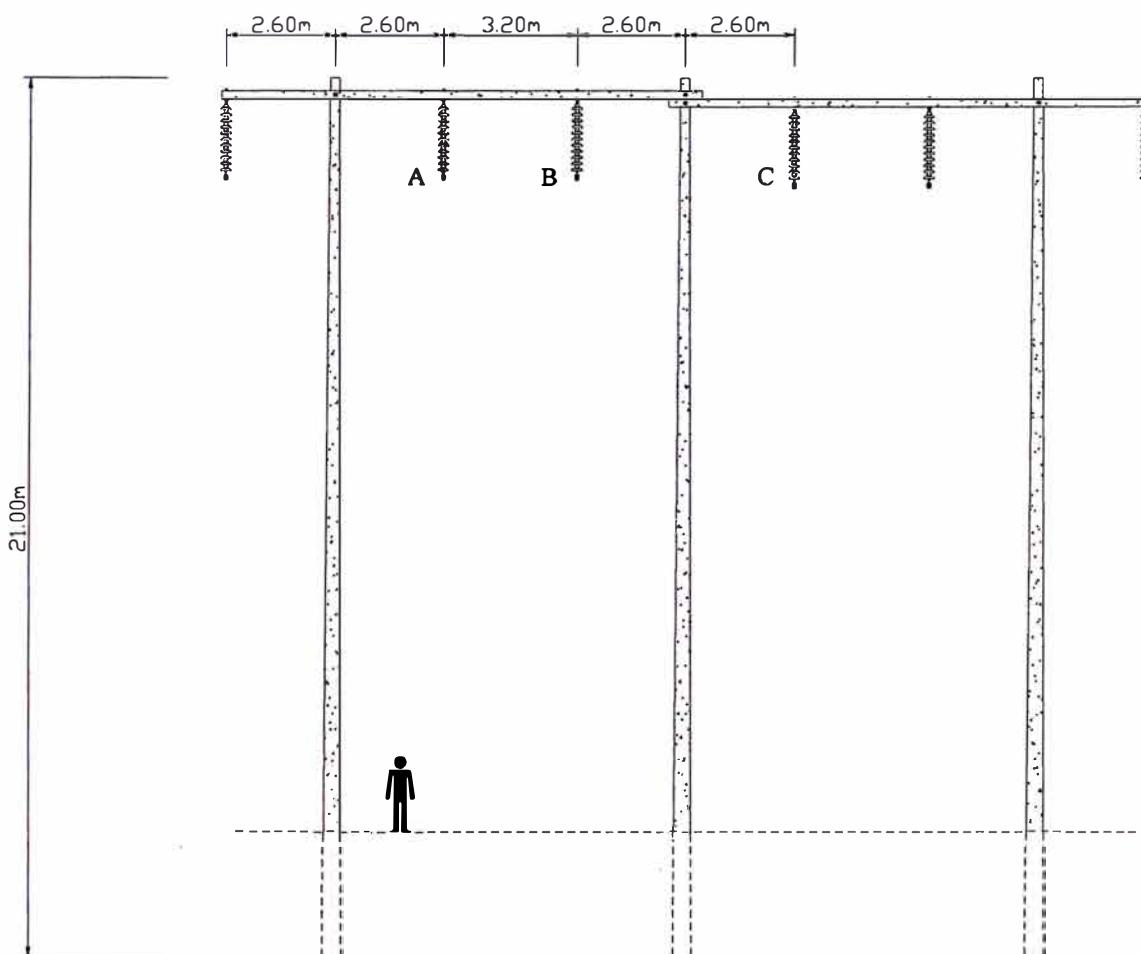


Fig. 3.1 Dimensiones de la estructura representativa de la Línea de Transmisión.

La ubicación de esta nueva línea en el centro de la estructura es muy segura porque los conductores están suspendidos de las crucetas, y estas crucetas se apoyan entre dos postes. Si alguna de las fases estuviera ubicado a un extremo de la estructura, estarían suspendidas del extremo de una cruceta y sometido a esfuerzo de flexión sobre el poste correspondiente, exponiéndose innecesariamente a una posible rotura de cruceta.

Las otras fases ubicadas a los extremos de la estructura serán desmontadas en su totalidad, el desmontaje se hace siempre en presencia de la nueva línea de transmisión L-118 en servicio, provocando inducción en los conductores a desmontar.

En la figura 3.1 se indica las dimensiones de la estructura de alineamiento de la línea de transmisión, está representado en escala para que sea posible hacer la comparación con el tamaño de una persona, y así se pueda tener una idea mas clara de las dimensiones de esta estructura, ya que las personas subirán a estas estructuras para desarrollar labores de desmantelamiento.

Esta línea de transmisión es un caso especial, porque tiene longitud relativamente corta 27.45 Km. y no cuenta con transposición de conductores, por simple deducción se puede afirmar que será una línea eléctricamente desbalanceada, presentando diferentes valores de caída de tensión para cada fase.

Los parámetros de esta línea como son la inductancia y capacitancia, a diferencia de las líneas de transmisión convencionales, no será posible representarlo por un valor equivalente (valor único), mas bien se representa por un conjunto de valores expresados en una matriz.

A priori, se va a determinar las magnitudes de tensión - corriente inducidas debido a la presencia del campo magnético en la línea de transmisión.

3.1. Inductancia

La inductancia relaciona la tensión inducida por un flujo magnético variable, con la razón de cambio de la corriente. Para el caso de las líneas de transmisión, es una cantidad constante que depende de la disposición física de los conductores en el espacio, así como de la dimensión y material de los conductores que compone la línea de transmisión.

Determinan la caída de tensión en la línea, porque induce una fuerza electromotriz que se oponen a la fuerza electromotriz aplicada a la línea. Esta fuerza electromotriz se induce en

los conductores que pertenecen a la línea y también a los conductores que no pertenecen a esta línea que es nuestro tema a tratar.

Partiendo de la Ley de Inducción de Faraday:

$$e = -\frac{d(N\Phi)}{dt} \quad (3.1)$$

Donde $(N\Phi)$ se le denomina enlaces de flujo. Cualquier cambio en los enlaces de flujo magnético en una región, induce tensión en la misma que es proporcional a la razón de cambio de flujo magnético.

Se puede asignar una cantidad constante L para este caso, y estar en función de la corriente que provoca este flujo magnético, de la siguiente forma:

$$e = -L \frac{di}{dt} \quad (3.2)$$

Al comparar estas dos expresiones se tiene:

$$L = \frac{d(N\Phi)}{di} \quad (3.3)$$

Esta expresión se puede definir como la primera derivada del flujo que se enlaza en una región con respecto a la corriente que provoca este flujo. En otras palabras, expresa la cantidad de flujo magnético que se enlaza en una determinada región por unidad de corriente producida por el circuito inductor.

3.1.1 Campo Magnético de un conductor largo y recto

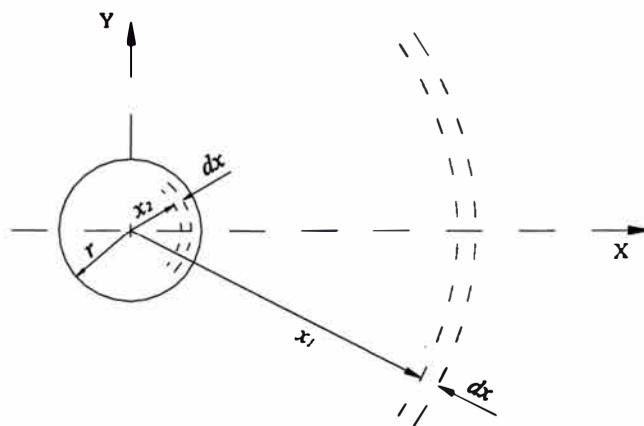


Fig. 3.2 Sección transversal de un conductor cilíndrico.

Sea un conductor cilíndrico, largo y rectilíneo, que circula una corriente i (Fig. 3.2), el número de vueltas es igual a 1 ($N=1$), quedando la expresión de la inductancia de la siguiente manera:

$$L = \frac{d\Phi}{di} \quad (3.4)$$

Esta corriente produce un campo magnético alrededor del mismo conductor cuyas líneas de fuerza son concéntricas con el conductor.

La densidad de flujo magnético en la parte exterior del conductor, a una distancia x_1 del centro del conductor mayor que el radio del conductor será:

$$B = \frac{\mu_a i}{2\pi x_1} \quad (3.5)$$

La densidad de flujo magnético en la parte interior del conductor, a una distancia x_2 del centro del conductor menor que el radio del conductor será:

$$B = \frac{\mu_a i x_2}{2\pi r^2} \quad (3.6)$$

Donde:

$\mu_a = \mu\mu_o$ = Permeabilidad absoluta del material.

μ = Permeabilidad relativa del material.

μ_o = Permeabilidad del espacio vacío = $4\pi \times 10^{-7}$.

i = Corriente que circula a través del conductor.

r = Radio del conductor.

3.1.2 Flujo Magnético de un conductor largo y recto

Para determinar el flujo que se enlaza con la corriente del conductor. Tenemos que considerar el flujo producido por la corriente i en dos partes.

1º. El flujo exterior al conductor, el cual envuelve a toda la corriente. Se determina considerando un área elemental dA de ancho dx y longitud l situada a una distancia x_1 del centro del conductor. Para esta región corresponde la densidad de flujo magnético de la parte exterior del conductor, ecuación (3.5). El flujo elemental $d\Phi$ que se enlaza al conductor será:

$$d\Phi = B.dA = B.l dx = \frac{\mu_a i}{2\pi x_1} l dx \quad (3.7)$$

El flujo total exterior al conductor será:

$$\Phi = \int_r^{\infty} \frac{\mu_a i}{2\pi x_1} l dx = \left[\frac{\mu_a i}{2\pi} l \ln(x_1) \right]_r^{\infty} \quad (3.8)$$

2º. El flujo interior al conductor, no envuelve a toda la corriente. Considerando un área elemental dA de ancho dx y longitud l situada a una distancia x_2 del centro del conductor. En esta región corresponde la densidad de flujo magnético de la parte interior del conductor, ecuación (3.6). El flujo elemental $d\Phi$ que se enlaza con la parte interna del conductor será:

$$d\Phi = B.dA = B.l dx = \frac{\mu_a i x_2}{2\pi r^2} l dx \quad (3.9)$$

Este diferencial de flujo $d\Phi$ envuelve únicamente a la corriente $i \frac{x_2^2}{r^2}$.

Los enlaces de flujo son el producto del flujo magnético y la cantidad de la corriente enlazada. Por tanto el enlazamiento del elemento diferencial de flujo al interior del conductor será $d\Phi$ de la ecuación (3.9), por la fracción de corriente del conductor envuelta en este elemento diferencial $\left(\frac{x_2^2}{r^2}\right)$, de esta manera:

$$d\Phi = \frac{\mu_a i x_2}{2\pi r^2} l dx \left(\frac{x_2^2}{r^2}\right) = \frac{\mu_a i x_2^3}{2\pi r^4} l dx \quad (3.10)$$

$$\Phi = \int_0^r \frac{\mu_a i x_2^3}{2\pi r^4} l dx = \left[\frac{\mu_a i x_2^4}{8\pi r^4} l \right]_0^r \quad (3.11)$$

$$\Phi = \frac{\mu_a i}{8\pi} l \quad (3.12)$$

En resumen, hemos obtenido todo el flujo que se enlaza con la corriente en el conductor.

El caso anterior es solamente teórico, porque se tiene un solo conductor recorrido por una corriente, y no se tiene el conductor de retorno.

3.1.3 Flujo Magnético enlazado en un circuito

En un sistema monofásico, se tiene dos hilos separados una distancia d que conduce una corriente i en el primer conductor y una corriente $-i$ (de retorno) en el segundo conductor. Cada conductor genera su campo magnético, en la figura 3.3 se observa el campo magnético producido por el conductor 1, la totalidad de este campo magnético se enlaza al propio conductor 1, pero este mismo campo no se enlaza en su totalidad con el conductor 2, sino lo hace a partir de la distancia d tomada desde el centro del conductor 1, hasta una distancia muy grande (infinito). La parte del campo magnético que no se enlaza al conductor 2, es el campo magnético ubicado a una distancia menor a d , se puede decir que son cilindros concéntricos con el conductor 1 y no logra envolver al conductor 2.

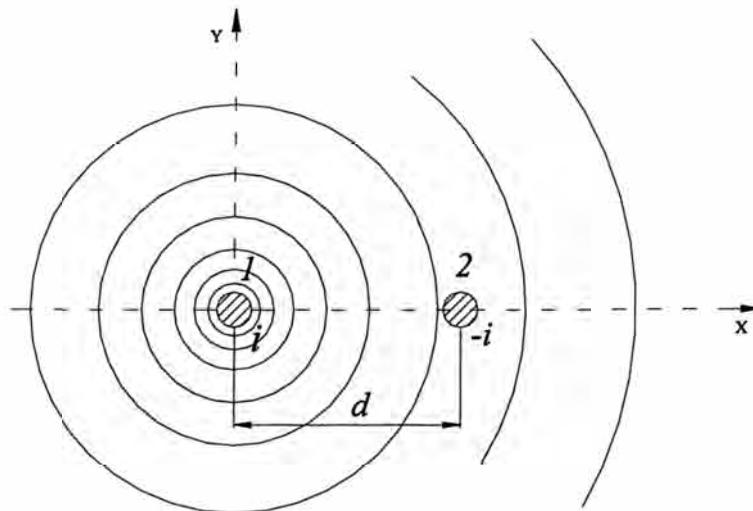


Fig. 3.3 Campo magnético debido solo a la corriente en el conductor 1.

En el sistema monofásico, vemos que una condición importante es que la suma de las corrientes de los conductores sea igual a cero, es decir $i + (-i) = 0$. Esto permite que los campos magnéticos se anulen para distancias muy alejadas a estos conductores (infinito).

En el sistema trifásico, se tiene tres conductores separados entre sí, también puede estar formado por cuatro conductores si es que cuenta con el conductor neutro en el sistema, en ambos casos se cumple la condición de que la suma de las corrientes sea cero $i_A + i_B + i_C = 0$, $i_A + i_B + i_C + i_n = 0$.

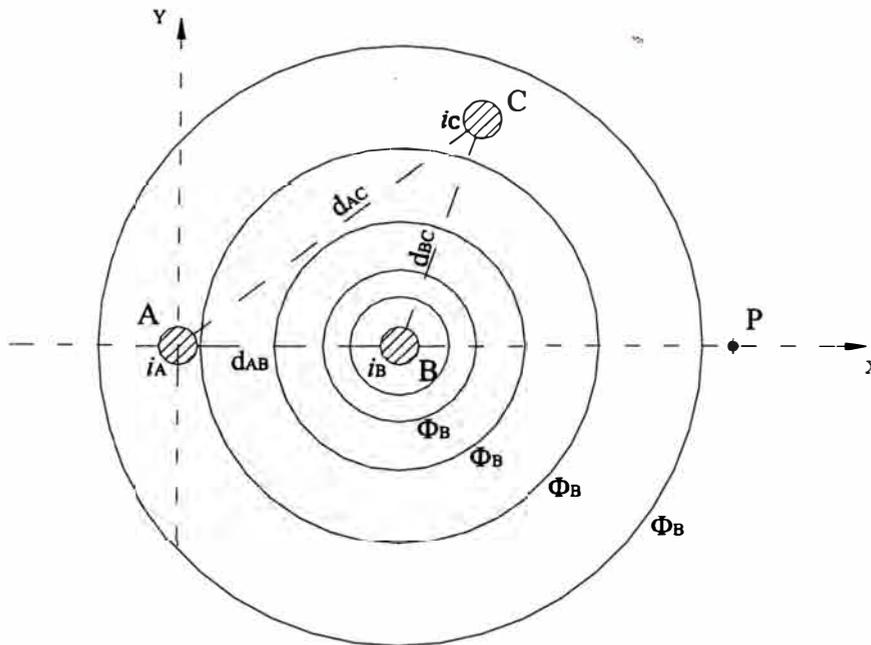


Fig. 3.4 Grupo de 3 conductores que llevan corriente cuya suma es cero.

Para calcular la inductancia de cada uno de los conductores, se debe determinar el flujo que se eslabona con la corriente que circula por cada conductor. Se mencionó en los párrafos anteriores que la suma de corrientes en los conductores debe ser igual a cero, es el caso del circuito monofásico y trifásico. Inclusive se aplica a circuitos con múltiples conductores.

De la figura 3.4 se va a calcular el flujo total que se eslabona en el conductor A , este flujo magnético es producido por cada uno de los conductores del circuito involucrado. Primeramente se verifica que $i_A + i_B + i_C = 0$.

1°. El flujo debido a la corriente i_A sobre el conductor A será el flujo interno al conductor, que se había calculado anteriormente, ecuación (3.12):

$$\Phi = \frac{\mu_a i_A}{8\pi} l \quad (3.13)$$

y el flujo externo al conductor, que va desde el radio del conductor r_A , hasta un punto remoto, en este caso es el punto P . Reemplazando datos en la ecuación (3.8) se tiene:

$$\Phi = \int_{r_A}^{d_{AP}} \frac{\mu_a i_A}{2\pi x} l dx = \frac{\mu_a i_A}{2\pi} l l n \left(\frac{d_{AP}}{r_A} \right) \quad (3.14)$$

Sumando ambas expresiones, se tiene el flujo debido a la corriente i_A sobre el conductor A :

$$\Phi_{i_A} = \frac{\mu_a i_A l}{8\pi} + \frac{\mu_a i_A}{2\pi} l \ln \left(\frac{d_{AP}}{r_A} \right) \quad (3.15)$$

2°. Con respecto al flujo debido a la corriente i_B sobre el conductor A se puede mencionar que el flujo producido por la corriente i_B hasta una distancia d_{AB} del centro del conductor B , no enlaza al conductor A y por tanto no debe tomarse en cuenta para el cálculo del flujo que se eslabona con el conductor A , es como un cilindro de radio d_{AB} y centro en el conductor B , que no abraza al conductor A .

Entonces se debe tomar en cuenta el flujo que envuelve al conductor A , que va desde la distancia d_{AB} respecto al centro del conductor B , hasta el punto P ; que en síntesis es la distancia d_{BP} , esta región si envuelve al conductor A . La región sería como un cilindro hueco de radio interior d_{AB} , radio exterior d_{BP} y cuyo centro está en el centro del conductor B . Por tanto deduciendo de la ecuación (3.8) se tiene el flujo producido por i_B que se eslabona con el conductor A :

$$\Phi_{i_B} = \int_{d_{AB}}^{d_{BP}} \frac{\mu_a i_B}{2\pi x} l dx = \frac{\mu_a i_B}{2\pi} l \ln \left(\frac{d_{BP}}{d_{AB}} \right) \quad (3.16)$$

Que viene a ser el flujo activo que se enlaza con el conductor A , debido a la corriente i_B y considerando este flujo hasta el punto P .

3°. En forma similar se procede con el flujo producido por la corriente i_C sobre el conductor A .

El flujo activo que se enlaza en el conductor A , debido a la corriente i_C y considerando este flujo hasta el punto P , es:

$$\Phi_{i_C} = \int_{d_{AC}}^{d_{CP}} \frac{\mu_a i_C}{2\pi x} l dx = \frac{\mu_a i_C}{2\pi} l \ln \left(\frac{d_{CP}}{d_{AC}} \right) \quad (3.17)$$

Por tanto, el flujo total considerado hasta el punto P , que envuelve al conductor A , es la suma de los flujos de los casos anteriores:

$$\Phi_A = \Phi_{i_A} + \Phi_{i_B} + \Phi_{i_C} \quad (3.18)$$

$$\Phi_A = \frac{\mu_a i_A l}{8\pi} + \frac{\mu_a i_A}{2\pi} l \ln \left(\frac{d_{AP}}{r_A} \right) + \frac{\mu_a i_B}{2\pi} l \ln \left(\frac{d_{BP}}{d_{AB}} \right) + \frac{\mu_a i_C}{2\pi} l \ln \left(\frac{d_{CP}}{d_{AC}} \right) \quad (3.19)$$

Tomando en cuenta que $i_C = -i_A - i_B$ y agrupando

$$\Phi_A = i_A \left[\frac{\mu_a}{8\pi} l + \frac{\mu_a}{2\pi} l \ln \left(\frac{d_{AC}}{r_A} \times \frac{d_{AP}}{d_{CP}} \right) \right] + i_B \left[\frac{\mu_a}{2\pi} l \ln \left(\frac{d_{AC}}{d_{AB}} \times \frac{d_{BP}}{d_{CP}} \right) \right] \quad (3.20)$$

El punto P debe estar en el infinito para considerar todo el flujo activo, entonces si $P \rightarrow \infty$, los quebrados en la expresión anterior tienden a:

$$\frac{d_{AP}}{d_{CP}} \rightarrow 1 \quad \frac{d_{BP}}{d_{CP}} \rightarrow 1$$

La expresión para Φ_A queda simplificado a:

$$\Phi_A = i_A \left[\frac{\mu_a}{8\pi} l + \frac{\mu_a}{2\pi} l \ln \left(\frac{d_{AC}}{r_A} \right) \right] + i_B \left[\frac{\mu_a}{2\pi} l \ln \left(\frac{d_{AC}}{d_{AB}} \right) \right] \quad (3.21)$$

$$\Phi_A = i_A \left[\frac{\mu_a}{8\pi} l + \frac{\mu_a}{2\pi} l \ln \left(\frac{1}{r_A} \right) \right] + i_B \left[\frac{\mu_a}{2\pi} l \ln \left(\frac{1}{d_{AB}} \right) \right] + (i_A + i_B) \left[\frac{\mu_a}{2\pi} l \ln(d_{AC}) \right] \quad (3.22)$$

Sustituyendo nuevamente $-i_C = i_A + i_B$

$$\Phi_A = i_A \left[\frac{\mu_a}{8\pi} l + \frac{\mu_a}{2\pi} l \ln \left(\frac{1}{r_A} \right) \right] + i_B \frac{\mu_a}{2\pi} l \ln \left(\frac{1}{d_{AB}} \right) + i_C \frac{\mu_a}{2\pi} l \ln \left(\frac{1}{d_{AC}} \right) \quad (3.23)$$

Este resultado, es el flujo total que se eslabona con el conductor A.

3.1.4 Consideraciones para simplificación

La ecuación (3.23) se puede reducir aplicando los cuatro criterios siguientes:

1°. La permeabilidad absoluta para el aire μ_a prácticamente es igual a la permeabilidad del espacio vacío μ_o , es decir:

$$\mu_a = \mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \quad (3.24)$$

2°. Para el caso del material del conductor, se sabe que estos conductores están hechos de cobre o aluminio, que son materiales no magnéticos, para los cuales la permeabilidad relativa es igual 1, $\mu=1$. Por tanto:

$$\mu_a = \mu\mu_o = \mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \quad (3.25)$$

Reemplazando estos valores de permeabilidad en la ecuación (3.23) se tiene:

$$\Phi_A = i_A \left[\frac{1}{2} + 2 \ln \left(\frac{1}{r_A} \right) \right] l \times 10^{-7} + i_B 2 \ln \left(\frac{1}{d_{AB}} \right) l \times 10^{-7} + i_C 2 \ln \left(\frac{1}{d_{AC}} \right) l \times 10^{-7} \quad (3.26)$$

3°. Respecto al factor que multiplica a la corriente i_A , entre corchetes, se puede simplificar para obtener el radio efectivo del conductor A , de la siguiente forma:

$$\frac{1}{2} + 2Ln\left(\frac{1}{r_A}\right) = 2Ln\frac{1}{e^{-\frac{1}{4}}} + 2Ln\frac{1}{r_A} = 2Ln\frac{1}{e^{-\frac{1}{4}} \cdot r_A} = 2Ln\frac{1}{0.779r_A} = 2Ln\frac{1}{r'_A} \quad (3.27)$$

Siendo r'_A el radio efectivo del conductor A con la siguiente equivalencia: $r'_A = 0.779r_A$

El valor del radio efectivo para diversos tipos de conductores se puede obtener de tablas proporcionadas en catálogos de los fabricantes.

Reemplazando en la ecuación (3.26):

$$\Phi_A = i_A 2Ln\left(\frac{1}{r'_A}\right)l \times 10^{-7} + i_B 2Ln\left(\frac{1}{d_{AB}}\right)l \times 10^{-7} + i_C 2Ln\left(\frac{1}{d_{AC}}\right)l \times 10^{-7} \quad (3.28)$$

Factorizando:

$$\Phi_A = 2l \times 10^{-7} \left[i_A Ln\left(\frac{1}{r'_A}\right) + i_B Ln\left(\frac{1}{d_{AB}}\right) + i_C Ln\left(\frac{1}{d_{AC}}\right) \right] \quad (3.29)$$

4°. Adicionalmente, vemos que existe el termino l , que es la longitud de los conductores, entonces es posible expresar el flujo que se eslabona en el conductor A, por unidad de longitud, en este caso un metro 1m.

Por tanto, el flujo total activo que se enlaza en el conductor A, por metro de longitud será:

$$\Phi_A = 2 \times 10^{-7} \left[i_A Ln\left(\frac{1}{r'_A}\right) + i_B Ln\left(\frac{1}{d_{AB}}\right) + i_C Ln\left(\frac{1}{d_{AC}}\right) \right] \quad (3.30)$$

3.1.5 Cálculo de la Inductancia

En la sección anterior, se ha obtenido el flujo enlazado en el conductor A, de modo similar se obtiene el flujo enlazado, por metro de longitud en los conductores B y C.

$$\begin{aligned} \Phi_A &= 2 \times 10^{-7} \left[i_A Ln\left(\frac{1}{r'_A}\right) + i_B Ln\left(\frac{1}{d_{AB}}\right) + i_C Ln\left(\frac{1}{d_{AC}}\right) \right] \\ \Phi_B &= 2 \times 10^{-7} \left[i_A Ln\left(\frac{1}{d_{BA}}\right) + i_B Ln\left(\frac{1}{r'_B}\right) + i_C Ln\left(\frac{1}{d_{BC}}\right) \right] \\ \Phi_C &= 2 \times 10^{-7} \left[i_A Ln\left(\frac{1}{d_{CA}}\right) + i_B Ln\left(\frac{1}{d_{CB}}\right) + i_C Ln\left(\frac{1}{r'_C}\right) \right] \end{aligned} \quad (3.31)$$

También puede escribirse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\Phi_A &= L_{AA} i_A + L_{AB} i_B + L_{AC} i_C \\ \Phi_B &= L_{BA} i_A + L_{BB} i_B + L_{BC} i_C \\ \Phi_C &= L_{CA} i_A + L_{CB} i_B + L_{CC} i_C\end{aligned}\quad (3.32)$$

Cuya expresión matricial es:

$$\begin{bmatrix} \Phi_A \\ \Phi_B \\ \Phi_C \end{bmatrix} = 2 \times 10^{-7} \begin{bmatrix} \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_A}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AC}}\right) \\ \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_B}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BC}}\right) \\ \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_C}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}\quad (3.33)$$

$$[\Phi] = [L] [i]$$

Donde $[\Phi]$ es la matriz de flujo enlazado por unidad de longitud, $[i]$ es la matriz de corrientes y $[L]$ es la matriz inductancia del sistema de conductores.

$$[L] = 2 \times 10^{-7} \begin{bmatrix} \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_A}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AC}}\right) \\ \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_B}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BC}}\right) \\ \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_C}\right) \end{bmatrix} \text{ Henry/m}$$

Si se tiene un sistema con más conductores, por ejemplo 4 conductores, la ecuación (3.31) será un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas.

Por ejemplo, para el caso del sistema eléctrico con neutro, físicamente resulta aumentado a uno el número de conductores, entonces el primer término de la ecuación (3.31) será:

$$\Phi_A = 2 \times 10^{-7} \left[i_A \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_A}\right) + i_B \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AB}}\right) + i_C \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AC}}\right) + i_n \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{An}}\right) \right]\quad (3.34)$$

De manera similar se obtiene las expresiones para Φ_B , Φ_C y Φ_n .

Y así, podemos adicionar mas términos a la ecuación (3.31), cada vez que aumentamos el numero de conductores en nuestro sistema eléctrico, teniendo presente que la suma de las corrientes tiene que ser cero.

De lo expresado en el párrafo anterior, se puede adicionar otro conductor con corriente nula, no produce campo magnético pero, de acuerdo a la fórmula de flujo enlazado que corresponde a este conductor, está siendo afectado mediante la influencia del campo magnético de cada uno de los conductores que conducen corriente eléctrica.

3.2. Reactancia Inductiva y Tensión Inducida

En el subcapítulo precedente se ha obtenido el flujo que se enlaza en cada conductor, por tanto se puede determinar la tensión inducida en cada conductor.

La Ley de inducción de Faraday en forma matricial es:

$$[E] = -\frac{d}{dt}[\Phi] \quad (3.35)$$

La corriente en cada conductor varía en función del tiempo en forma sinusoidal, el flujo magnético producido también varía en forma sinusoidal y en fase con la corriente de cada conductor. Como consecuencia, la ecuación anterior se puede expresar en términos fasoriales, la derivada de la ecuación anterior se transforma a una expresión fasorial.

$$[E] = -j\omega [\Phi] \quad (3.36)$$

Esta tensión inducida se opone a la tensión aplicada a cada conductor de la línea. Se puede expresar como caída de tensión en la línea.

$$[V] = j\omega [\Phi] \quad (3.37)$$

$$[V] = j\omega [L][I] \quad (3.38)$$

Donde el término $j\omega[L]$ es llamado también reactancia inductiva $[X]$. Se forma la expresión:

$$[V] = [X][I] \quad (3.39)$$

Donde $[V]$ es la matriz caída de tensión del circuito (tensión inducida) por unidad de longitud, $[X]$ es la matriz reactancia inductiva del sistema de conductores. $[I]$ es la corriente del circuito que generalmente es de valor conocido.

Continuando con el ejemplo del sistema de conductores A, B y C (figura 3.4), la ecuación (3.39) se desarrolla de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 V_A &= j\omega 2 \times 10^{-7} \left[i_A \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_A}\right) + i_B \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AB}}\right) + i_C \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AC}}\right) \right] \\
 V_B &= j\omega 2 \times 10^{-7} \left[i_A \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BA}}\right) + i_B \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_B}\right) + i_C \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BC}}\right) \right] \\
 V_C &= j\omega 2 \times 10^{-7} \left[i_A \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CA}}\right) + i_B \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CB}}\right) + i_C \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_C}\right) \right]
 \end{aligned} \tag{3.40}$$

Donde, V_A , V_B , y V_C son las tensiones inducidas por unidad de longitud en los conductores A, B, y C respectivamente. También puede expresarse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 V_A &= X_{AA} I_A + X_{AB} I_B + X_{AC} I_C \\
 V_B &= X_{BA} I_A + X_{BB} I_B + X_{BC} I_C \\
 V_C &= X_{CA} I_A + X_{CB} I_B + X_{CC} I_C
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

Cuya expresión matricial es:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = j\omega \times 2 \times 10^{-7} \begin{bmatrix} \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_A}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AC}}\right) \\ \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_B}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BC}}\right) \\ \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_C}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \tag{3.42}$$

La matriz reactancia inductiva del sistema de conductores A, B y C es:

$$\boxed{[X] = j\omega \times 2 \times 10^{-7} \begin{bmatrix} \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_A}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AC}}\right) \\ \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_B}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BC}}\right) \\ \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_C}\right) \end{bmatrix} \text{ Ohm/m}}$$

Se puede apreciar las reactancias propias y mutuas. Por ejemplo:

$X_{AA} = j\omega 2 \times 10^{-7} \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{r'_A}\right) \Omega / \text{m}$ es la reactancia propia del conductor A.

$X_{AB} = j\omega 2 \times 10^{-7} \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AB}}\right) \Omega / \text{m}$ es la reactancia mutua entre los conductores A y B.

$X_{AC} = j\omega 2 \times 10^{-7} \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AC}}\right) \Omega / \text{m}$ es la reactancia mutua entre los conductores A y C.

3.3. Determinación de la tensión inducida debido al Efecto Inductivo

En la figura 3.5 se muestra la disposición física de los conductores en la estructura de suspensión, que es la estructura representativa de la línea de transmisión 138KV Trujillo Norte – Santiago de Cao. De acuerdo con el planteamiento de ingeniería del problema, los conductores A, B y C son conductores nuevos de aleación de aluminio de 240mm^2 , los cuales han sido instalados y formará parte de la nueva línea de transmisión. Previamente se realizó el desmontaje de los conductores antiguos y se ha reemplazado por estos conductores nuevos.

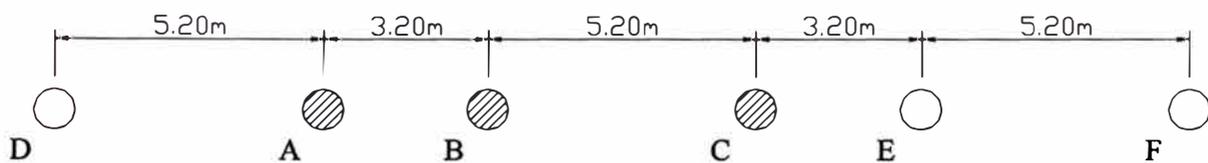


Fig. 3.5 Disposición de conductores en la línea de transmisión.

El siguiente paso es proceder con el desmontaje de los conductores deteriorados D, E y F, quedando finalmente la línea de transmisión con una sola terna de fases A B y C.

En todas las instancias del proceso de montaje y desmontaje de conductores, el suministro de energía no ha sido interrumpido y por tanto se estuvo sometido a tensión eléctrica y paso de corriente eléctrica. Se determinará el cálculo de la tensión inducida en los conductores D, E y F que no están energizados y serán desmontados.

La ecuación (3.40) fue obtenida para el caso de tres conductores, en el caso de la línea de transmisión 138KV, tenemos 6 conductores. Los tres primeros conductores: A, B y C transportan energía, o sea conducen corriente eléctrica; los otros tres conductores: D, E y F no conducen corriente eléctrica. La suma de corrientes de todo el circuito es cero, por tanto se puede formular las ecuaciones que determina la tensión inducida para cada conductor.

$$\begin{aligned}
V_A &= j\omega 2 \times 10^{-7} \left[i_A \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{r'_A} \right) + i_B \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{AB}} \right) + i_C \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{AC}} \right) + i_D \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{AD}} \right) + i_E \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{AE}} \right) + i_F \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{AF}} \right) \right] \\
V_B &= j\omega 2 \times 10^{-7} \left[i_A \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{BA}} \right) + i_B \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{r'_A} \right) + i_C \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{BC}} \right) + i_D \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{BD}} \right) + i_E \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{BE}} \right) + i_F \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{BF}} \right) \right] \\
V_C &= j\omega 2 \times 10^{-7} \left[i_A \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{CA}} \right) + i_B \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{CB}} \right) + i_C \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{r'_A} \right) + i_D \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{CD}} \right) + i_E \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{CE}} \right) + i_F \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{CF}} \right) \right] \\
V_D &= j\omega 2 \times 10^{-7} \left[i_A \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{DA}} \right) + i_B \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{DB}} \right) + i_C \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{DC}} \right) + i_D \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{r'_A} \right) + i_E \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{DE}} \right) + i_F \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{DF}} \right) \right] \\
V_E &= j\omega 2 \times 10^{-7} \left[i_A \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{EA}} \right) + i_B \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{EB}} \right) + i_C \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{EC}} \right) + i_D \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{ED}} \right) + i_E \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{r'_A} \right) + i_F \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{EF}} \right) \right] \\
V_F &= j\omega 2 \times 10^{-7} \left[i_A \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{FA}} \right) + i_B \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{FB}} \right) + i_C \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{FC}} \right) + i_D \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{FD}} \right) + i_E \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{d_{FE}} \right) + i_F \operatorname{Ln} \left(\frac{1}{r'_A} \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.43}$$

La cual puede plantear como una ecuación matricial.

$$[V] = [X] [I]$$

Donde $[X]$ es la matriz reactancia inductiva del sistema de conductores.

En principio, la línea de transmisión tiene una demanda máxima de 16 MVA con carga balanceada, en el nivel de tensión de 138KV, por tanto la corriente eléctrica que pasa por cada conductor es de 66.94 Ampere (conductores A B y C). La corriente por los conductores D, E y F es cero.

Las distancias de separación entre los conductores se muestran en la figura 3.5. En el anexo B se tiene la tabla de datos técnicos de los conductores que forman parte del proyecto de rehabilitación de la línea de transmisión, el radio efectivo para cada conductor es:

Conductor AAAC 185mm² → r'= 6.7968 mm

Conductor AAAC 240mm² → r'= 7.7146 mm.

Reemplazando valores se forma la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \\ V_E \\ V_F \end{bmatrix} = j \times 10^{-4} \begin{bmatrix} 3.67 & -0.87 & -1.61 & -1.24 & -1.85 & -2.13 \\ -0.87 & 3.67 & -1.24 & -1.61 & -1.61 & -1.97 \\ -1.61 & -1.24 & 3.67 & -1.97 & -0.87 & -1.61 \\ -1.24 & -1.61 & -1.97 & 3.76 & -2.13 & -2.33 \\ -1.85 & -1.61 & -0.87 & -2.13 & 3.76 & -1.24 \\ -2.13 & -1.97 & -1.61 & -2.33 & -1.24 & 3.76 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 66.94 \angle 0^\circ \\ 66.94 \angle 120^\circ \\ 66.94 \angle 240^\circ \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.44}$$

Cuya solución es:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \\ V_E \\ V_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0331 \angle 97.3^\circ \\ 0.0317 \angle -153.9^\circ \\ 0.0341 \angle -33.5^\circ \\ 0.0042 \angle 120.1^\circ \\ 0.0059 \angle -43.9^\circ \\ 0.0031 \angle -47.3^\circ \end{bmatrix} \quad \text{Volt / m}$$

Para toda la longitud de la línea será $27,450x [V_i]$:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \\ V_E \\ V_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 909.4 \angle 97.3^\circ \\ 870.7 \angle -153.9^\circ \\ 937.4 \angle -33.5^\circ \\ 115.3 \angle 120.1^\circ \\ 160.8 \angle -43.9^\circ \\ 85.2 \angle -47.3^\circ \end{bmatrix} \quad \text{Volt}$$

Donde V_A , V_B y V_C son las tensiones inducidas en las fases respectivas A, B y C, debido al efecto inductivo propio y efecto inductivo mutuo, llamados también reactancia propia y reactancia mutua respectivamente. En términos técnicos, V_A , V_B y V_C son denominados como caída de tensión, estos valores son 909, 870 y 937 Volt en las fases A, B y C respectivamente.

V_D , V_E y V_F son las tensiones inducidas en los conductores D, E y F debido al efecto inductivo mutuo, cuyos valores respectivos son 115V, 161V y 85V. El efecto inductivo propio no se manifiesta en este caso, debido a que D, E y F no tienen corriente eléctrica.

Conocido los valores de caída de tensión en la línea V_A , V_B y V_C , que son diferentes para cada fase y que está en el rango de 900 Volt se puede deducir por simple inspección que la tensión de envío será desbalanceada.

Es posible mejorar el modelo de representación de la línea de transmisión que está suministrando energía de la siguiente forma, la demanda es de 16MVA para una tensión de 138KV, se obtiene un determinado valor de impedancia en la carga $Z_{CARGA} = f(R, jX)$, La caída de tensión en la línea está en el rango de 900 Volt por tanto la tensión de envío se gradúa automáticamente elevando el nivel de tensión de envío a 139,000 Volt trifásico y balanceado para compensar la caída de tensión. Los resultados serán prácticamente similares a los resultados ya obtenidos, pero el modelo se hace más cercano a la realidad.

Entonces, conocido la tensión de envío (139KV) y la impedancia de carga Z_{CARGA} para cubrir la demanda de 16MVA, se plantea un sistema de ecuaciones por el método de

corrientes de malla (2da ley de Kirchoff) Con ayuda de la figura 3.6 se plantea el sistema de ecuaciones siguiente:

$$\begin{bmatrix} 139,000 \angle 0^\circ \\ 139,000 \angle 120^\circ \\ 0 \end{bmatrix} = \left[f_1(Z_{CARGA}, jX_{LINEA}) \right] \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

Despejando, se obtiene la corriente por fase,

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 67.02 \angle -7^\circ \\ 66.98 \angle 112^\circ \\ 66.91 \angle -127^\circ \end{bmatrix} \text{ Amp}$$

Que es ligeramente desbalanceada, procediendo de manera similar a la ecuación (3.43) y (3.44) se determina la tensión inducida en cada conductor.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \\ V_E \\ V_F \end{bmatrix} = 27,450 \times j \times 10^{-4} \begin{bmatrix} 3.67 & -0.87 & -1.61 & -1.24 & -1.85 & -2.13 \\ -0.87 & 3.67 & -1.24 & -1.61 & -1.61 & -1.97 \\ -1.61 & -1.24 & 3.67 & -1.97 & -0.87 & -1.61 \\ -1.24 & -1.61 & -1.97 & 3.76 & -2.13 & -2.33 \\ -1.85 & -1.61 & -0.87 & -2.13 & 3.76 & -1.24 \\ -2.13 & -1.97 & -1.61 & -2.33 & -1.24 & 3.76 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 67.02 \angle -7^\circ \\ 66.98 \angle 112^\circ \\ 66.91 \angle -127^\circ \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Efectuando,

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \\ V_E \\ V_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 910.3 \angle 89.9^\circ \\ 871.1 \angle -161.1^\circ \\ 936.9 \angle -40.9^\circ \\ 115.4 \angle 112.6^\circ \\ 160.8 \angle -51.4^\circ \\ 85.2 \angle -54.7^\circ \end{bmatrix} \text{ Volt.}$$

Estos valores lo representamos en el siguiente diagrama:

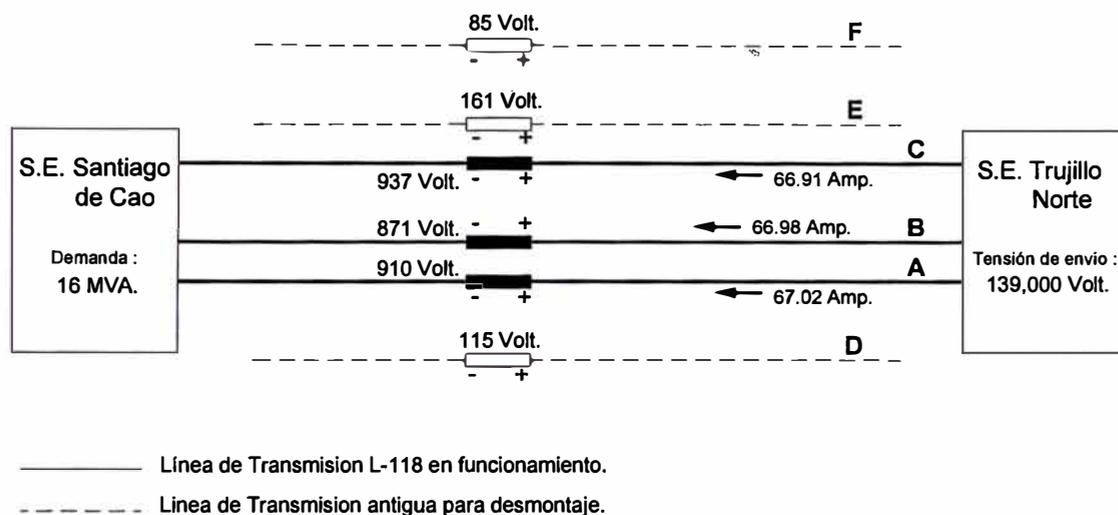


Fig. 3.6 Tensión Inducida y/o Caída de Tensión en la Línea de Transmisión.

Los valores de caída de tensión cada fase de la línea no son iguales, 910, 871 y 907 Volt, esto se debe porque la línea de transmisión no presenta transposición de conductores, los conductores mantienen en esa posición a través de todo su recorrido de 27.45Km.

Con respecto a los conductores D, E y F presentan tensiones inducidas de 115V, 160V y 85V. Se puede observar que a medida que el conductor se aleja de la línea, la tensión inducida disminuye, el conductor E está mas cerca y por eso tiene mayor tensión inducida 160 Volt. Estos valores de tensión inducida son relativamente bajos para nuestro caso y no presenta peligro de consideración en términos eléctricos.

Si los extremos del conductor D se conecta a tierra (figura 3.7), se forma una espira que conduce corriente, en este caso circulará corriente eléctrica entre este conductor y tierra, los valores obtenidos de tensión y corriente inducida son muy bajos, el conductor D influye en el comportamiento eléctrico de la línea, alterando la caída de tensión en la línea. Pero esta influencia no es muy considerable.

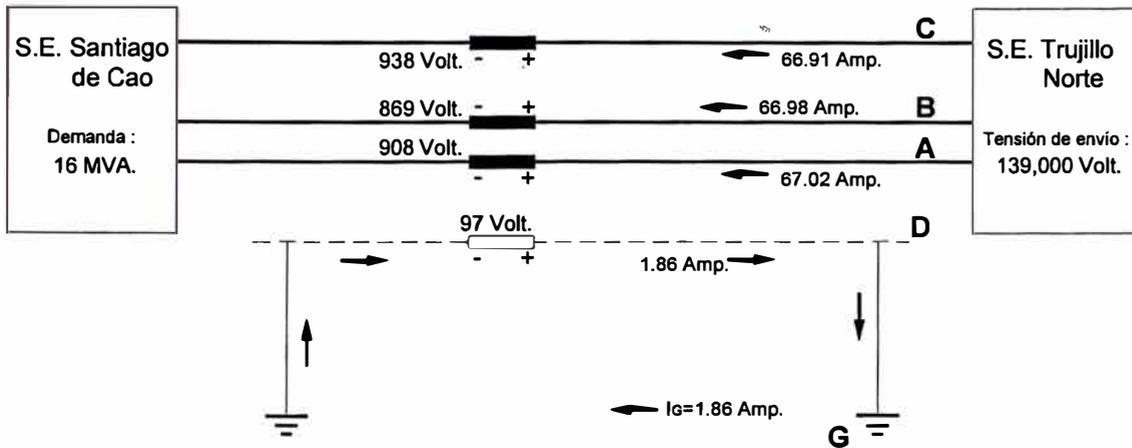


Fig. 3.7 Tensión Inducida y Corriente inducida en la Línea de Transmisión.

Estos resultados se han obtenido planteando un sistema de ecuaciones por el método de corrientes de malla (2da ley de Kirchoff) similar al caso anterior.

$$\begin{bmatrix} 139,000 \angle 0^\circ \\ 139,000 \angle 120^\circ \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = f_2(Z_{CARGA}, jX_{LINEA}) \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_D \\ I_G \end{bmatrix}$$

Despejando, se obtiene la corriente por cada conductor,

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_D \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 67.0171 \angle -7.4176^\circ \\ 66.9746 \angle 112.6695^\circ \\ 66.9076 \angle -127.4056^\circ \\ 1.8605 \angle -110.5653^\circ \\ 1.8605 \angle 69.4347^\circ \end{bmatrix} \text{ Amp}$$

Que es ligeramente desbalanceada, procediendo de manera similar a la ecuación (3.43) y (3.44) se determina la tensión inducida en cada conductor.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \end{bmatrix} = 27,450 \times j \times 10^{-4} \begin{bmatrix} 3.67 & -0.87 & -1.61 & -1.24 \\ -0.87 & 3.67 & -1.24 & -1.61 \\ -1.61 & -1.24 & 3.67 & -1.97 \\ -1.24 & -1.61 & -1.97 & 3.76 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 67.02 \angle -7.42^\circ \\ 66.98 \angle -112.67^\circ \\ 66.91 \angle -127.41^\circ \\ 1.86 \angle -110.57^\circ \end{bmatrix}$$

Efectuando,

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 908.6 \angle 89.6^\circ \\ 868.6 \angle -161.0^\circ \\ 938.5 \angle -40.8^\circ \\ 97.1 \angle 99.5^\circ \end{bmatrix} \text{ Volt}$$

Los cuales han variado muy poco respecto al caso de la línea de transmisión con el conductor D sin conectar a tierra.

En resumen, para esta línea de transmisión, los valores de tensión inducida obtenidos son muy bajos, este efecto de inducción se debe al campo magnético producido por la corriente eléctrica presente en la línea de transmisión; y se hace más evidente en líneas de mayor longitud y con mayor potencia de transmisión.

Otra posibilidad que representa riesgo por inducción en la línea de transmisión, es el efecto del campo eléctrico producido por el nivel de tensión eléctrica, denominado también efecto capacitivo.

CAPÍTULO IV

CÁLCULO DE LA TENSIÓN INDUCIDA POR EFECTO CAPACITIVO

4.1. Capacitancia

Si se aplica una diferencia de potencial a dos cuerpos conductores separados por un dieléctrico, estos conductores adquieren una carga eléctrica q que es proporcional a la diferencia de potencial aplicada v y a una constante de proporcionalidad C llamada capacitancia, que depende de la naturaleza del dieléctrico, de las dimensiones de los cuerpos conductores y de su separación.

$$q = C v \quad (4.1)$$

Si la tensión aplicada v es una función armónica del tiempo, la carga eléctrica será también una función armónica del tiempo.

Para el caso de una línea de transmisión, la capacitancia es el resultado de la diferencia de potencial entre los conductores y origina que ellos se carguen de la misma manera que las placas de un condensador cuando hay una diferencia de potencial entre ellas.

Es decir, la línea se comporta como un condensador, siendo los conductores las placas de un condensador y el dieléctrico es el aire u otro medio aislante que separe los conductores.

La capacitancia de una línea de transmisión depende de las dimensiones de los conductores, de la separación entre ellos y de la naturaleza del dieléctrico.

La base de para determinar la capacitancia es la Ley de Gauss para campos eléctricos. Esta ley establece que la carga total dentro de una superficie cerrada es igual al flujo eléctrico total que sale de la superficie. En otras palabras, la carga total dentro de una superficie cerrada es igual a la integral sobre la superficie de la componente normal de la densidad de flujo eléctrico ($\epsilon \vec{E}$).

Partiendo de la Ley de Gauss:

$$\oint \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{s} = q_n \quad (4.2)$$

Donde:

$\varepsilon = k\varepsilon_0$ = Permitividad del dieléctrico.

k = Permitividad relativa del dieléctrico.

ε_0 = Permitividad del espacio vacío = $\frac{1}{36\pi \times 10^9}$.

E = Intensidad de campo eléctrico.

$d\mathcal{S}$ = Diferencial de superficie.

q_n = Carga neta encerrada.

4.1.1 Campo eléctrico de un conductor largo y recto

Sea un conductor cilíndrico, largo y rectilíneo (figura 4.1) que se encuentra en un medio uniforme, y está aislado de otras cargas de tal manera que la carga se distribuye uniformemente alrededor de su periferia., el campo eléctrico asociado será radial. Todos los puntos equidistantes al conductor son equipotenciales y tienen igual magnitud de campo eléctrico.

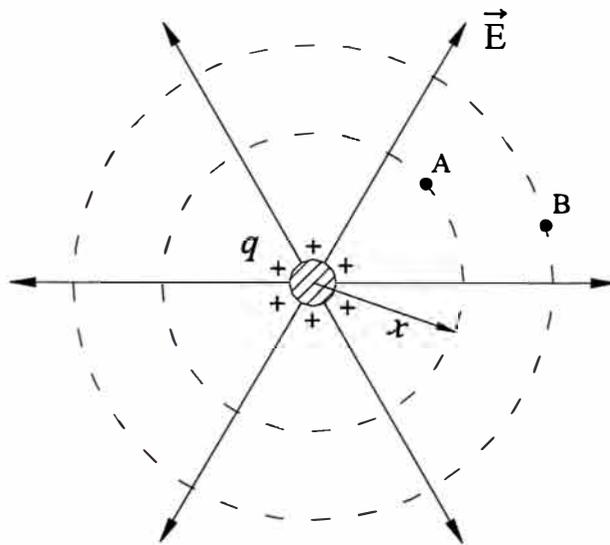


Fig. 4.1 Campo eléctrico de un conductor cilíndrico aislado.

A partir de la ecuación (4.02), se puede determinar la intensidad de campo eléctrico a x metros del centro del conductor, imaginando una superficie cilíndrica concéntrica con el conductor, de x metros de radio y longitud l . Como todas las partes de la superficie del cilindro son equidistantes al conductor, la superficie cilíndrica es equipotencial y la

intensidad de campo eléctrico es igual a la carga encerrada (q_n) en el cilindro, dividido por el área de la superficie del cilindro.

$$E = \frac{q_n}{2\pi\epsilon x \times l} \quad (4.3)$$

E y q_n pueden ser expresiones instantáneas, fasoriales o de valor constante. La intensidad de campo eléctrico es una medida de la fuerza sobre una carga que está en el campo

A lo largo de toda la longitud del conductor, el campo eléctrico E será el mismo para una distancia x desde el centro del conductor, porque a medida que aumenta la longitud l del cilindro hipotético, la carga encerrada q_n aumenta, la relación q_n/l será constante, por tanto podemos expresar el campo eléctrico de la forma:

$$E = \frac{\tilde{q}}{2\pi\epsilon x} \quad (4.4)$$

Donde $\tilde{q} = q_n/l$, es la carga eléctrica por unidad de longitud, llamado también distribución de carga lineal en el conductor, expresado en Coulomb/m.

4.1.2 Diferencia de potencial de un conductor largo y recto

La diferencia de potencial entre dos puntos es numéricamente igual al trabajo necesario para mover una carga positiva entre dos puntos A y B. Su definición es:

$$V_{AB} = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{L} \quad (4.5)$$

La diferencia de potencial es independiente de la trayectoria que se siga, la forma más simple de determinar la diferencia de potencial entre dos puntos (por ejemplo los puntos A y B de la figura 4.1), es calcular la diferencia de potencial entre las superficies equipotenciales que pasan a través de A y B mediante la integración de la intensidad de campo sobre una trayectoria radial entre las superficies equipotenciales. De la ecuación (4.04) y (4.05) se plantea:

$$V_{AB} = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{L} = - \int_A^B \frac{\tilde{q}}{2\pi\epsilon x} \cdot d\vec{L} = - \left[\frac{\tilde{q}}{2\pi\epsilon} \ln(x) \right]_A^B \quad (4.6)$$

Obteniendo la diferencia de potencial entre A y B,

$$V_{AB} = - \frac{\tilde{q}}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{B}{A}\right) \quad (4.7)$$

4.1.3 Cálculo de la capacitancia de un sistema de conductores

Sea un sistema de conductores cilíndricos y paralelos, separados a una determinada distancia, figura 4.2, cada conductor tiene una carga eléctrica por unidad de longitud \tilde{q}_A , \tilde{q}_B y \tilde{q}_C .

Como el radio de cada conductor es pequeño comparado con la separación entre ellos ($d \gg r$), la carga eléctrica de cada conductor está uniformemente distribuida sobre la superficie del conductor. Las líneas de fuerza del campo eléctrico emanan radial y uniformemente de los conductores.

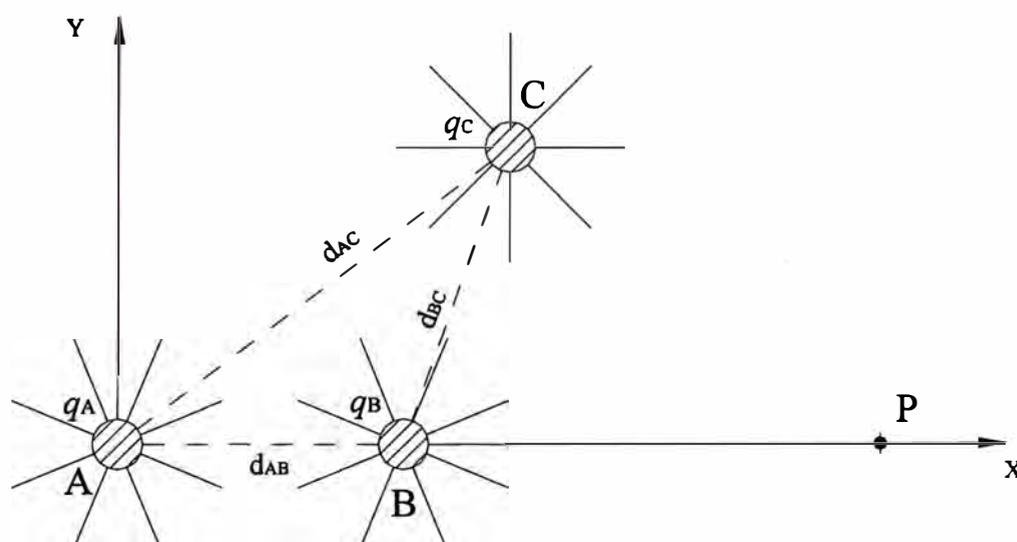


Fig. 4.2 Grupo de conductores cilíndricos y paralelos con carga eléctrica.

De acuerdo a la ecuación (4.04), la intensidad de campo eléctrico provocado por los conductores A, B y C, a una distancia desde su propio centro, es

$$E_A = \frac{\tilde{q}_A}{2\pi\epsilon x_A}, \quad E_B = \frac{\tilde{q}_B}{2\pi\epsilon x_B}, \quad E_C = \frac{\tilde{q}_C}{2\pi\epsilon x_C} \quad (4.8)$$

Respectivamente.

Por superposición, la intensidad de campo eléctrico en el punto P debido a las cargas de los conductores A, B y C será:

$$\vec{E}_P = \vec{E}_A + \vec{E}_B + \vec{E}_C = \frac{\tilde{q}_A}{2\pi\epsilon x_A} + \frac{\tilde{q}_B}{2\pi\epsilon x_B} + \frac{\tilde{q}_C}{2\pi\epsilon x_C} \quad (4.9)$$

La diferencia de potencial V_{AP} entre un punto de la superficie del conductor A y el punto P arbitrario, debido a la presencia de las cargas q_A , q_B y q_C , es:

$$V_{AP} = - \int_A^P \vec{E}_P \cdot d\vec{L} = - \int_{r_A}^{d_{AP}} \frac{\tilde{q}_A}{2\pi\epsilon x_A} \cdot dx_A - \int_{d_{AB}}^{d_{BP}} \frac{\tilde{q}_B}{2\pi\epsilon x_B} \cdot dx_B - \int_{d_{AC}}^{d_{CP}} \frac{\tilde{q}_C}{2\pi\epsilon x_C} \cdot dx_C \quad (4.10)$$

Resolviendo:

$$V_{AP} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\tilde{q}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP}}{r_A} \right) + \tilde{q}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP}}{d_{AB}} \right) + \tilde{q}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP}}{d_{AC}} \right) \right] \quad (4.11)$$

Por comodidad se ha omitido el signo negativo en la ecuación (4.11); a posteriori, todas las expresiones de diferencia de potencial estarán afectados de este signo, por lo que es necesario omitirlo de aquí en adelante. Este signo negativo, expresa trabajo negativo, o sea la carga se mueve de un punto de potencial mayor a otro punto de potencial menor liberando energía por espontaneidad. Por la naturaleza del circuito, no existe agente externo que suministre energía (trabajo). Queda sobreentendido que el circuito realiza trabajo negativo (libera energía).

De otro lado, la permitividad del dieléctrico ϵ , que para nuestro caso es el aire, prácticamente es igual a la permitividad del espacio vacío ϵ_o , es decir:

$$\epsilon = \epsilon_o = \frac{1}{36\pi \times 10^9} \quad (4.12)$$

Por tanto, la diferencia de potencial entre la superficie del conductor A y un punto P , se simplifica a la siguiente expresión:

$$V_{AP} = 18 \times 10^9 \left[\tilde{q}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP}}{r_A} \right) + \tilde{q}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP}}{d_{AB}} \right) + \tilde{q}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP}}{d_{AC}} \right) \right] \quad (4.13)$$

De modo similar se obtiene la diferencia de potencial para el conductor B y C hasta el punto P .

$$V_{BP} = 18 \times 10^9 \left[\tilde{q}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP}}{d_{BA}} \right) + \tilde{q}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP}}{r_B} \right) + \tilde{q}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP}}{d_{BC}} \right) \right] \quad (4.14)$$

$$V_{CP} = 18 \times 10^9 \left[\tilde{q}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP}}{d_{CA}} \right) + \tilde{q}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP}}{d_{CB}} \right) + \tilde{q}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP}}{r_C} \right) \right] \quad (4.15)$$

Se puede formar el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} V_{AP} &= P_{AA} \tilde{q}_A + P_{AB} \tilde{q}_B + P_{AC} \tilde{q}_C \\ V_{BP} &= P_{BA} \tilde{q}_A + P_{BB} \tilde{q}_B + P_{BC} \tilde{q}_C \\ V_{CP} &= P_{CA} \tilde{q}_A + P_{CB} \tilde{q}_B + P_{CC} \tilde{q}_C \end{aligned} \quad (4.16)$$

Cuya forma matricial es:

$$[V_p] = [P][q] \quad (4.17)$$

Donde $[V_p]$ es la matriz diferencia de potencial respecto al punto P, $[P]$ es la matriz de coeficiente de potencial para el punto P. $[q]$ es la carga por unidad de longitud.

Despejando la ecuación (4.17) se tiene $[q] = [P]^{-1} [V_p]^{-1}$. Donde el termino $[P]^{-1}$ se define como la matriz capacitancia en el punto P y se denota como $[C_p]$ en faradios/m. $[q] = [C_p][V]^{-1}$.

La figura 4.2 representa a un sistema con tres conductores. Si se tiene un sistema con más conductores, por ejemplo 4 conductores, la ecuación (4.13) quedará aumentada en un sumando, que corresponde al cuarto conductor, resultando:

$$V_{AP} = 18 \times 10^9 \left[\tilde{q}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP}}{r_A} \right) + \tilde{q}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP}}{d_{AB}} \right) + \tilde{q}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP}}{d_{AC}} \right) + \tilde{q}_N \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP}}{d_{AN}} \right) \right] \quad (4.18)$$

Y así, podemos adicionar más términos si se aumenta el número de conductores al sistema.

4.1.4 Cálculo de la capacitancia de un sistema de conductores considerando el efecto del suelo

Hasta ahora se ha determinado la capacitancia de un sistema de conductores sin considerar el efecto del suelo (efecto de la tierra). En adelante, se va a expresar el fenómeno capacitivo considerando este efecto, porque las expresiones son más generalizadas y a la vez se tendrá obtener resultados mas aproximados a la realidad.

El efecto de la tierra influye considerablemente cuando la distancia entre conductores y la altura de estos conductores respecto a tierra, son magnitudes comparables.

La figura 4.3 es una representación general de un sistema eléctrico considerando el efecto de la tierra.

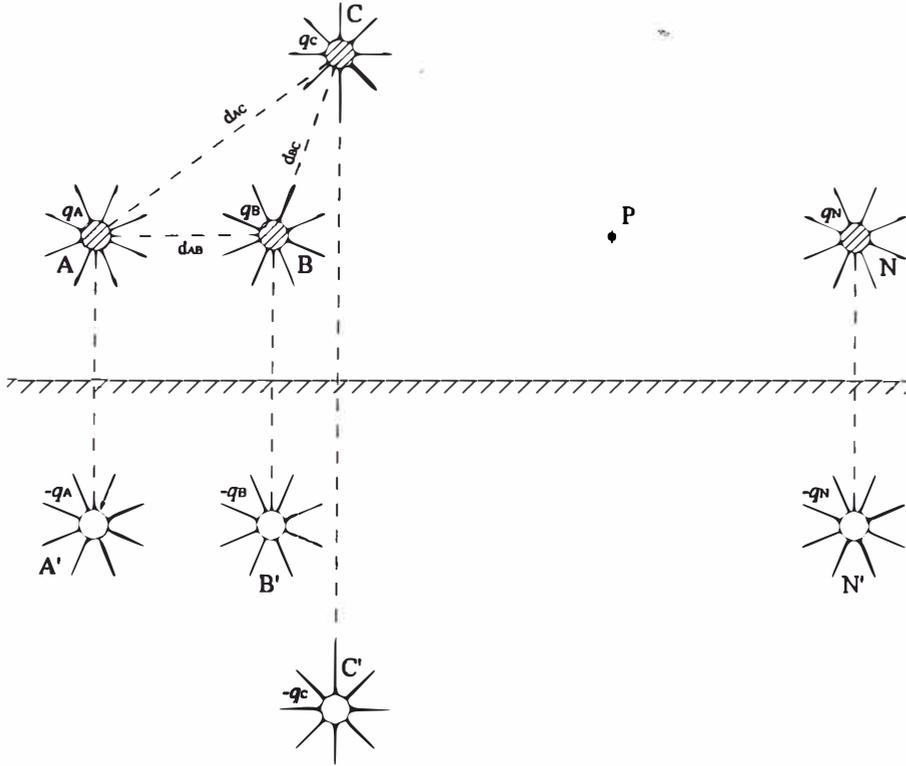


Fig. 4.3 Grupo de conductores con carga eléctrica y sus imágenes.

De acuerdo a la ecuación (4.04), la intensidad de campo eléctrico provocado por los conductores A, B, C y N a una distancia x_i , desde su propio centro; así como el campo eléctrico provocado por sus imágenes A', B', C', N', a una distancia $x_{i'}$, desde sus centros, son respectivamente:

$$E_i = \frac{\tilde{q}_i}{2\pi\epsilon x_i}, \quad y \quad E_{i'} = \frac{-\tilde{q}_i}{2\pi\epsilon x_{i'}} \quad (4.19)$$

Por superposición, la intensidad de campo eléctrico en el punto P será:

$$\vec{E}_P = \sum_i \vec{E}_i + \sum_{i'} \vec{E}_{i'} = \vec{E}_A + \vec{E}_B + \vec{E}_C + \vec{E}_N + \vec{E}_{A'} + \vec{E}_{B'} + \vec{E}_{C'} + \vec{E}_{N'} \quad (4.20)$$

La diferencia de potencial V_{AP} entre un punto de la superficie del conductor A y el punto P arbitrario, debido a la presencia de las cargas reales y cargas imagen es:

$$V_{AP} = \int_A^P \vec{E}_P \cdot d\vec{L}$$

$$= \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(\int_{r_A}^{d_{AP}} \frac{\tilde{q}_A}{x_A} dx_A + \int_{d_{BA}}^{d_{BP}} \frac{\tilde{q}_B}{x_B} dx_B + \int_{d_{CA}}^{d_{CP}} \frac{\tilde{q}_C}{x_C} dx_C + \int_{d_{NA}}^{d_{NP}} \frac{\tilde{q}_N}{x_N} dx_N + \int_{d_{AA'}}^{d_{AP'}} \frac{-\tilde{q}_A}{x_{A'}} dx_{A'} + \int_{d_{BB'}}^{d_{BP'}} \frac{-\tilde{q}_B}{x_{B'}} dx_{B'} + \int_{d_{CC'}}^{d_{CP'}} \frac{-\tilde{q}_C}{x_{C'}} dx_{C'} + \int_{d_{NN'}}^{d_{NP'}} \frac{-\tilde{q}_N}{x_{N'}} dx_{N'} \right) \dots \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned}
V_{AP} &= 18 \times 10^9 \left[\bar{q}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{AA'}}{r_A \times d_{PA'}} \right) + \bar{q}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{AB'}}{d_{BA} \times d_{PB'}} \right) + \bar{q}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{AC'}}{d_{CA} \times d_{PC'}} \right) + \bar{q}_N \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{AN'}}{d_{NA} \times d_{PN'}} \right) \right] \\
V_{BP} &= 18 \times 10^9 \left[\bar{q}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{BA'}}{d_{AB} \times d_{PA'}} \right) + \bar{q}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{BB'}}{r_B \times d_{PB'}} \right) + \bar{q}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{BC'}}{d_{CB} \times d_{PC'}} \right) + \bar{q}_N \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{BN'}}{d_{NB} \times d_{PN'}} \right) \right] \\
V_{CP} &= 18 \times 10^9 \left[\bar{q}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{CA'}}{d_{AC} \times d_{PA'}} \right) + \bar{q}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{CB'}}{d_{BC} \times d_{PB'}} \right) + \bar{q}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{CC'}}{r_C \times d_{PC'}} \right) + \bar{q}_N \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{CN'}}{d_{NC} \times d_{PN'}} \right) \right] \\
V_{NP} &= 18 \times 10^9 \left[\bar{q}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{NA'}}{d_{AN} \times d_{PA'}} \right) + \bar{q}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{NB'}}{d_{BN} \times d_{PB'}} \right) + \bar{q}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{NC'}}{d_{CN} \times d_{PC'}} \right) + \bar{q}_N \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{NN'}}{r_N \times d_{PN'}} \right) \right]
\end{aligned}$$

... (4.22)

Se ha obtenido la diferencia de potencial entre un punto de la superficie del conductor A y el punto P arbitrario. De forma análoga se obtuvo V_{BP} , V_{CP} y V_{NP} .

La forma matricial es $[V_P] = [P][\bar{q}]$, donde el término $[P]^{-1}$ es la matriz capacitancia $[C_P]$ para el punto P , en faradios/m.

4.2. Reactancia Capacitiva y Tensión Inducida

Se ha determinado la diferencia de potencial en función de la carga eléctrica de cada conductor, para las aplicaciones de ingeniería eléctrica, la carga eléctrica no suele emplearse, más bien se utiliza el término de corriente eléctrica, que es una función de la carga, mediante la siguiente igualdad: $\bar{q} = \int \bar{i} dt$

Las ecuaciones ya no quedan expresadas en términos de q , sino en términos de la corriente entre los conductores, llamado también corriente eléctrica transversal. De la ecuación (4.17),

$$[V_P] = [P] \left[\int \bar{i} dt \right] \quad (4.23)$$

En los sistemas eléctricos, la matriz diferencia de potencial $[V]$ varía en función del tiempo de forma sinusoidal, como consecuencia, la corriente eléctrica transversal (expresada por unidad de longitud), varía de forma sinusoidal, entonces la ecuación puede expresarse en términos fasoriales, por tanto la integral de la ecuación anterior se transforma a una expresión fasorial.

$$[V_P] = \frac{1}{j\omega} [P][\bar{i}] \quad (4.24)$$

Donde el término $\frac{1}{j\omega}[P]$ es llamado también reactancia capacitiva $[X_P]$ para un determinado punto P . Se forma la expresión:

$$[V_P] = [X_P][\tilde{i}] \quad (4.25)$$

Como consecuencia de ello, la ecuación (4.22) se transforma en:

$$\begin{aligned} V_{AP} &= \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \left[\tilde{i}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{AA'}}{r_A \times d_{PA'}} \right) + \tilde{i}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{AB'}}{d_{BA} \times d_{PB'}} \right) + \tilde{i}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{AC'}}{d_{CA} \times d_{PC'}} \right) + \tilde{i}_N \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{AN'}}{d_{NA} \times d_{PN'}} \right) \right] \\ V_{BP} &= \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \left[\tilde{i}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{BA'}}{d_{AB} \times d_{PA'}} \right) + \tilde{i}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{BB'}}{r_B \times d_{PB'}} \right) + \tilde{i}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{BC'}}{d_{CB} \times d_{PC'}} \right) + \tilde{i}_N \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{BN'}}{d_{NB} \times d_{PN'}} \right) \right] \\ V_{CP} &= \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \left[\tilde{i}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{CA'}}{d_{AC} \times d_{PA'}} \right) + \tilde{i}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{CB'}}{d_{BC} \times d_{PB'}} \right) + \tilde{i}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{CC'}}{r_C \times d_{PC'}} \right) + \tilde{i}_N \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{CN'}}{d_{NC} \times d_{PN'}} \right) \right] \\ V_{NP} &= \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \left[\tilde{i}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{NA'}}{d_{AN} \times d_{PA'}} \right) + \tilde{i}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{NB'}}{d_{BN} \times d_{PB'}} \right) + \tilde{i}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{NC'}}{d_{CN} \times d_{PC'}} \right) + \tilde{i}_N \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{NN'}}{r_N \times d_{PN'}} \right) \right] \\ &\dots (4.26) \end{aligned}$$

Donde, V_{AP} , V_{BP} , V_{CP} y V_{NP} son las diferencias de potencial de los conductores A, B, C y N con un punto P arbitrario, llamados también tensiones inducidas. La ecuación anterior expresada en forma matricial será:

$$\begin{bmatrix} V_{AP} \\ V_{BP} \\ V_{CP} \\ V_{NP} \end{bmatrix} = \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \begin{bmatrix} \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{AA'}}{r_A \times d_{PA'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{AB'}}{d_{BA} \times d_{PB'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{AC'}}{d_{CA} \times d_{PC'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{AN'}}{d_{NA} \times d_{PN'}} \right) \\ \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{BA'}}{d_{AB} \times d_{PA'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{BB'}}{r_B \times d_{PB'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{BC'}}{d_{CB} \times d_{PC'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{BN'}}{d_{NB} \times d_{PN'}} \right) \\ \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{CA'}}{d_{AC} \times d_{PA'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{CB'}}{d_{BC} \times d_{PB'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{CC'}}{r_C \times d_{PC'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{CN'}}{d_{NC} \times d_{PN'}} \right) \\ \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{NA'}}{d_{AN} \times d_{PA'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{NB'}}{d_{BN} \times d_{PB'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{NC'}}{d_{CN} \times d_{PC'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{NN'}}{r_N \times d_{PN'}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_A \\ \tilde{i}_B \\ \tilde{i}_C \\ \tilde{i}_N \end{bmatrix}$$

La matriz reactancia capacitiva $[X_P]$ para el punto P es:

$$[X_P] = \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \begin{bmatrix} \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{AA'}}{r_A \times d_{PA'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{AB'}}{d_{BA} \times d_{PB'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{AC'}}{d_{CA} \times d_{PC'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{AN'}}{d_{NA} \times d_{PN'}} \right) \\ \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{BA'}}{d_{AB} \times d_{PA'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{BB'}}{r_B \times d_{PB'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{BC'}}{d_{CB} \times d_{PC'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{BN'}}{d_{NB} \times d_{PN'}} \right) \\ \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{CA'}}{d_{AC} \times d_{PA'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{CB'}}{d_{BC} \times d_{PB'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{CC'}}{r_C \times d_{PC'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{CN'}}{d_{NC} \times d_{PN'}} \right) \\ \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{NA'}}{d_{AN} \times d_{PA'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{NB'}}{d_{BN} \times d_{PB'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{NC'}}{d_{CN} \times d_{PC'}} \right) & \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{NN'}}{r_N \times d_{PN'}} \right) \end{bmatrix} \text{ Ohm} \times m$$

4.3. Determinación de la tensión inducida debido al Efecto Capacitivo.

La figura 4.4 muestra la disposición física de los conductores de la línea de transmisión Trujillo Norte – Santiago de Cao, los conductores A, B y C están energizados y se presenta sus imágenes. Los conductores D, E y F no están energizados. La altura promedio de los conductores es de 10 metros respecto al suelo.

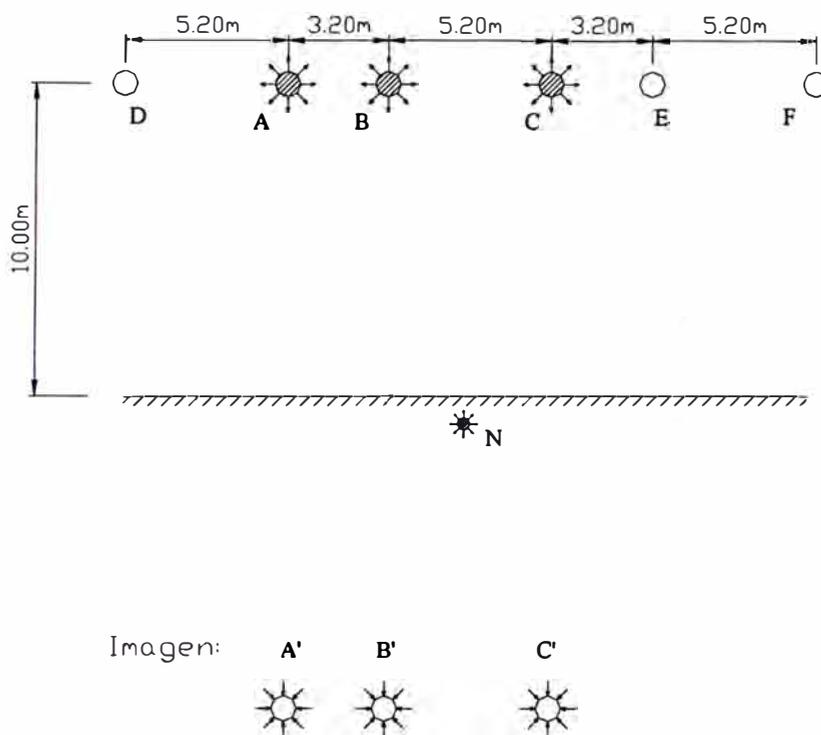


Fig. 4.4 Disposición de los conductores en escala.

El nivel de tensión aplicado a la línea es de 139KVolt para compensarla la caída de tensión debido al efecto inductivo.

El sistema eléctrico es trifásico con neutro a tierra, por tanto está compuesto por cuatro conductores, los tres primeros son llamados conductores de fases A, B y C. El cuarto conductor es el conductor neutro N, que para nuestro caso, es el conductor que va por tierra en todo el recorrido de la línea de transmisión, no tiene imagen y se puede ubicar en la superficie conductora del suelo ya que es una superficie equipotencial.

4.3.1 Cálculo de la corriente capacitiva en condiciones normales

Se va a calcular la carga eléctrica presente en los cuatro conductores, en otras palabras se va a calcular la corriente transversal por unidad de longitud (corriente capacitiva). La

ecuación (4.26) expresa la diferencia de potencial entre los cuatro conductores y un punto arbitrario P . Si este punto P lo acercamos hasta el conductor neutro N ; N y P vienen a ser el mismo punto, la tensión V_{NP} es cero y las tensiones V_{AP} , V_{BP} y V_{CP} serán las tensiones del sistema eléctrico respecto al neutro. Con este artificio, de la ecuación (4.26) se obtiene 3 igualdades; la cuarta igualdad se obtiene del principio fundamental de la conservación de la carga, es decir la suma de las cargas eléctricas (corriente eléctrica) en los cuatro conductores es cero, por tanto se tiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 V_{AN} &= \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \left[\tilde{I}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AN} \times d_{AA'}}{r_A \times d_{NA'}} \right) + \tilde{I}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BN} \times d_{AB'}}{d_{BA} \times d_{NB'}} \right) + \tilde{I}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CN} \times d_{AC'}}{d_{CA} \times d_{NC'}} \right) + \tilde{I}_N \operatorname{Ln} \left(\frac{r_N}{d_{NA}} \right) \right] \\
 V_{BN} &= \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \left[\tilde{I}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AN} \times d_{BA'}}{d_{AB} \times d_{NA'}} \right) + \tilde{I}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BN} \times d_{BB'}}{r_B \times d_{NB'}} \right) + \tilde{I}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CN} \times d_{BC'}}{d_{CB} \times d_{NC'}} \right) + \tilde{I}_N \operatorname{Ln} \left(\frac{r_N}{d_{NB}} \right) \right] \\
 V_{CN} &= \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \left[\tilde{I}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AN} \times d_{CA'}}{d_{AC} \times d_{NA'}} \right) + \tilde{I}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BN} \times d_{CB'}}{d_{BC} \times d_{NB'}} \right) + \tilde{I}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CN} \times d_{CC'}}{r_C \times d_{NC'}} \right) + \tilde{I}_N \operatorname{Ln} \left(\frac{r_N}{d_{NC}} \right) \right] \\
 0 &= \tilde{I}_A + \tilde{I}_B + \tilde{I}_C + \tilde{I}_N
 \end{aligned}
 \dots (4.27)$$

Las distancias de separación entre los conductores, así como de sus imágenes, se obtiene de la figura 4.4. La línea de transmisión está formada por las fases **A**, **B** y **C** que son conductores de 240 mm², el conductor neutro **N** se puede considerar como un conductor de cobre temple blando de 35 mm², ya que este conductor se emplea en la instalación de los sistemas de puesta a tierra con contrapeso.

En el anexo C, se tiene la tabla de datos técnicos de los conductores utilizados para la rehabilitación de la línea de transmisión, el radio para cada conductor es:

Conductor AAAC 240mm², $r = 10.045$ mm. $\rightarrow r_A = r_B = r_C = 10.045$ mm,

Conductor Cobre desnudo 35mm², $r = 3.8$ mm $\rightarrow r_N = 3.8$ mm.

Reemplazando valores en la ecuación (4.27) se forma la ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} 139,000/\sqrt{3} \angle 30^\circ \\ 139,000/\sqrt{3} \angle 150^\circ \\ 139,000/\sqrt{3} \angle 270^\circ \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j3.62 \times 10^8 & -j0.88 \times 10^8 & -j0.45 \times 10^8 & j3.76 \times 10^8 \\ -j0.88 \times 10^8 & -j3.62 \times 10^8 & -j0.66 \times 10^8 & j3.76 \times 10^8 \\ -j0.45 \times 10^8 & -j0.66 \times 10^8 & -j3.62 \times 10^8 & j3.76 \times 10^8 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_A \\ \tilde{I}_B \\ \tilde{I}_C \\ \tilde{I}_N \end{bmatrix}$$

Cuya solución es:

$$\begin{bmatrix} \vec{i}_A \\ \vec{i}_B \\ \vec{i}_C \\ \vec{i}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2745 \angle 114.8^\circ \\ 0.2908 \angle -117.5^\circ \\ 0.2549 \angle 2.7^\circ \\ 0.0062 \angle -146.5^\circ \end{bmatrix} \times 10^{-3} \text{ Ampere / m}$$

La longitud de la línea es de 27.45 Km. por tanto la corriente transversal o corriente capacitiva de toda la línea de transmisión es $27,450 \times [i_i]$:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.536 \angle 114.8^\circ \\ 7.982 \angle -117.5^\circ \\ 6.998 \angle 2.7^\circ \\ 0.171 \angle -146.5^\circ \end{bmatrix} \text{ Ampere}$$

Las corrientes capacitivas (corriente transversal) se muestran en la siguiente figura, así como la representación de la reactancia capacitiva respecto al punto D (conductor D), este punto también puede estar ubicado en E, F ú otro diferente, porque se trata de un punto P arbitrario.

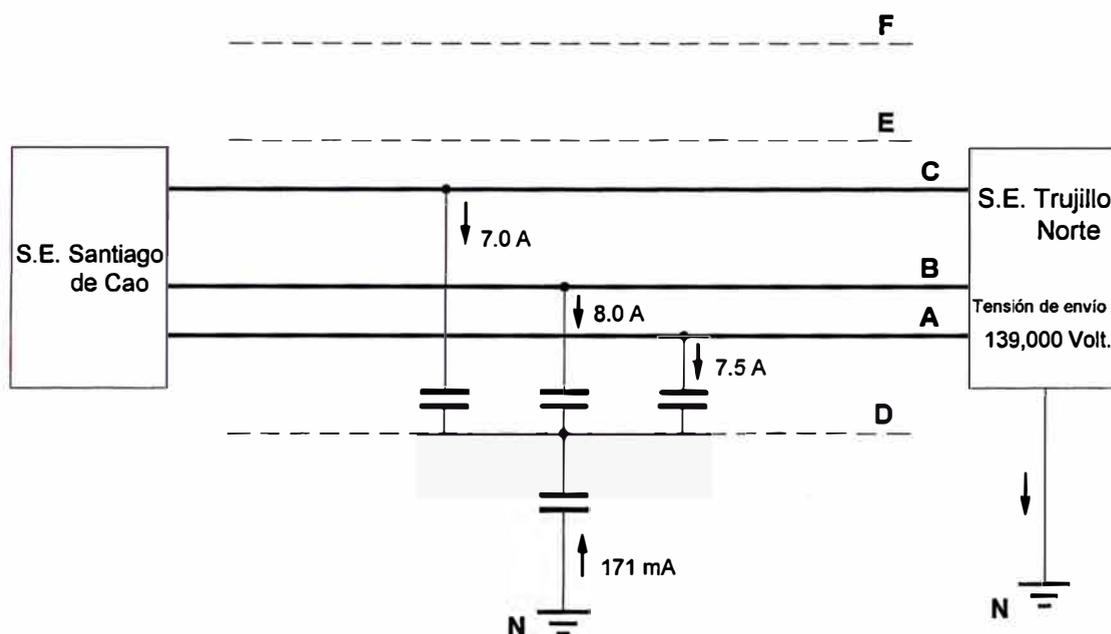


Fig. 4.5 Corrientes capacitivas de la línea de transmisión en condiciones normales, representación de la reactancia capacitiva de la línea con respecto al punto D.

La corriente capacitiva en la fase B es mayor que la corriente capacitiva en la fase A y en la fase C, porque está ubicado entre ambas y forma un capacitor con menor distancia de separación a los conductores A y C. Notamos que la corriente capacitiva en el conductor C es menor porque este conductor es el mas alejado del conjunto.

La corriente por el neutro es muy pequeña, 171 mA y representa de alguna manera el grado de desbalance de corrientes en las fases A, B y C; en la figura 4.4 y figura 4.5 se observa que la configuración de la línea es ligeramente asimétrica, la separación entre A y B es 3.2m y la separación entre el conductor B y el conductor C es de 5.2m.

4.3.2 Cálculo de la tensión inducida en los conductores no energizados

Una vez calculado las corrientes capacitivas en los conductores de la línea de transmisión, y la corriente capacitiva en el conductor neutro, se procede a calcular la tensión inducida en cualquier punto del plano transversal al recorrido de la línea de transmisión

La ecuación (4.26) representa la tensión entre el punto P arbitrario y los conductores de la línea de transmisión incluido el neutro puesto a tierra. Tomamos el punto E, para el cálculo, ya que este conductor está más cerca al conjunto de conductores energizados y por tanto la tensión inducida será mayor con respecto a las otras dos líneas, D y F. En las líneas D, E y F se realizaran trabajos de desmontaje.

Reemplazando valores en la ecuación (4.26) se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_{AE} \\ V_{BE} \\ V_{CE} \\ V_{NE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j3.30 \times 10^8 & -j0.43 \times 10^8 & j0.42 \times 10^8 & 0 \\ -j0.55 \times 10^8 & -j3.17 \times 10^8 & j0.22 \times 10^8 & 0 \\ -j0.12 \times 10^8 & -j0.21 \times 10^8 & -j2.75 \times 10^8 & 0 \\ j0.33 \times 10^8 & j0.45 \times 10^8 & j0.88 \times 10^8 & -j3.76 \times 10^8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.2745 \angle 114.8^\circ \\ 0.2908 \angle -117.5^\circ \\ 0.2549 \angle 2.7^\circ \\ 0.0062 \angle -146.5^\circ \end{bmatrix} \times 10^{-3}$$

Se forma la ecuación matricial $[V_E] = [X_E][\tilde{i}]$. Donde $[X_E]$ es la matriz de reactancia capacitiva para el punto E (conductor E), $[\tilde{i}]$ es la corriente capacitiva por unidad de longitud (corriente transversal). $[V_E]$ representa las tensiones inducidas en el punto E.

Resolviendo:

$$\begin{bmatrix} V_{AE} \\ V_{BE} \\ V_{CE} \\ V_{NE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 89281 \angle 37^\circ \\ 87,530 \angle 141^\circ \\ 65,753 \angle -89^\circ \\ 14,551 \angle 86^\circ \end{bmatrix} \text{ Volt.}$$

Se procede a elaborar el diagrama fasorial de las tensiones inducidas respecto al punto E (figura 4.6). Se observa las tensiones inducidas V_{AE} , V_{BE} , V_{CE} y V_{NE} ; esta última es muy importante mencionarlo, es la tensión inducida respecto al neutro (punto de puesta a tierra)

cuyo valor es 14.5 KV y es la que determina el nivel de peligro que estamos expuestos cuando se toca este conductor para ser desmontado.

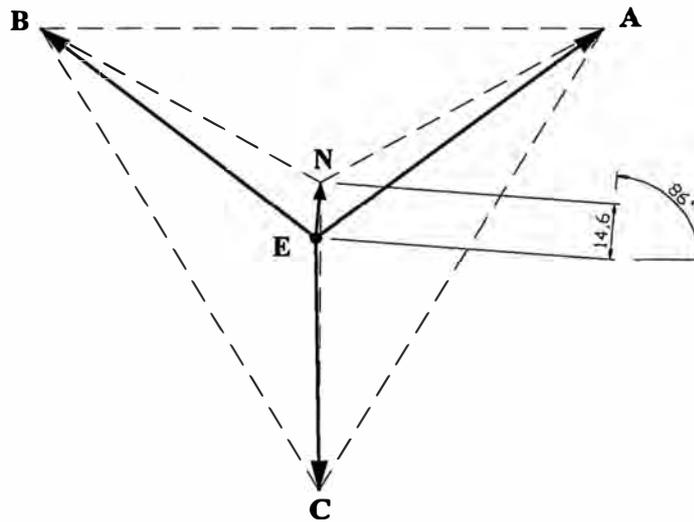


Fig. 4.6 Diagrama fasorial de las tensiones inducidas respecto al punto E.

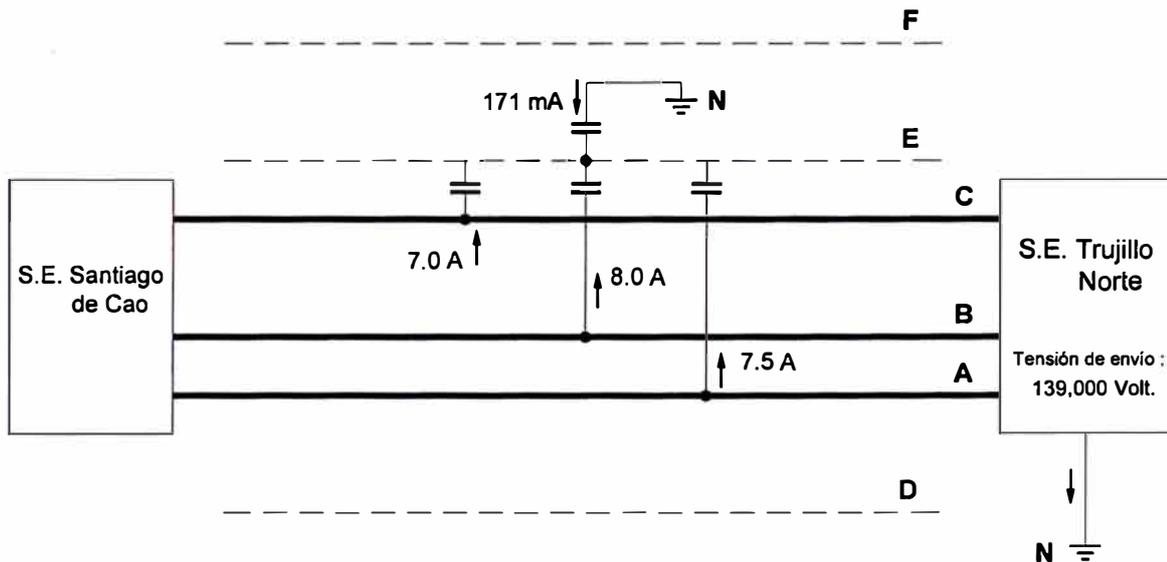


Fig. 4.7 Reactancia capacitiva de la línea de transmisión respecto al punto E.

Asimismo, procediendo de manera similar al punto *E*, se obtiene las tensiones inducidas respecto al punto *D* y punto *F*.

$$\begin{bmatrix} V_{AD} \\ V_{BD} \\ V_{CD} \\ V_{ND} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 72,393 \angle 29^\circ \\ 83,714 \angle 155^\circ \\ 85,207 \angle -94^\circ \\ 7,916 \angle -143^\circ \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V_{AF} \\ V_{BF} \\ V_{CF} \\ V_{NF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 84,175 \angle 34^\circ \\ 84,177 \angle 146^\circ \\ 72,887 \angle -90^\circ \\ 7,365 \angle 90^\circ \end{bmatrix} \quad \text{Volt}$$

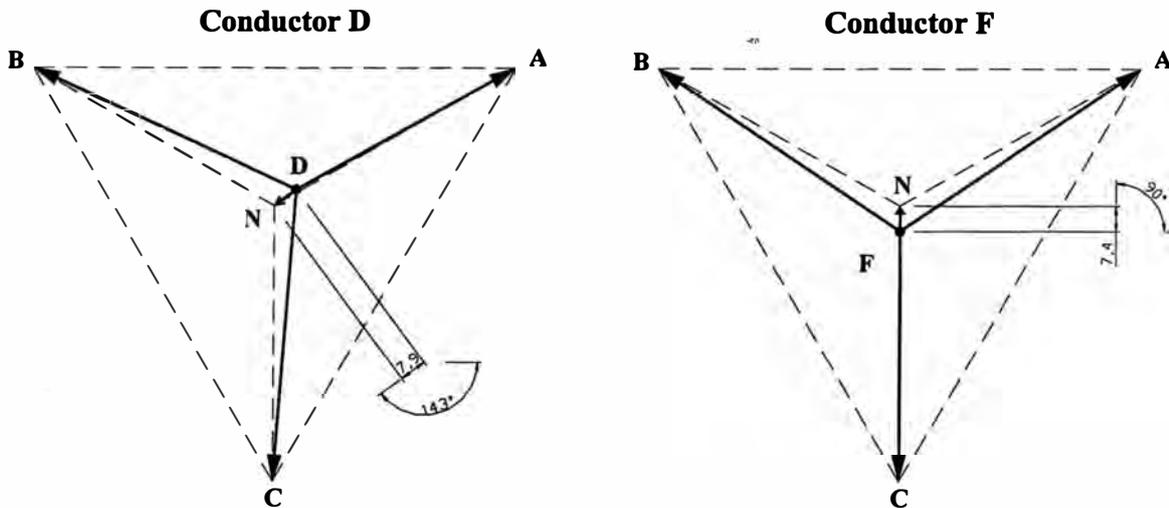


Fig. 4.8 Diagrama fasorial, tensiones inducidas en conductores D y F.

En resumen, se tienen doce valores de tensión inducida, pero los más importantes son tres: V_{ND} , V_{NE} y V_{NF} , ya que indican la tensión inducida entre un conductor no energizado a desmontar y el conductor N que está puesto a tierra.

En las estructuras de la línea de transmisión, este conductor N viene a ser el conductor de puesta a tierra que sube a la estructura y se conecta a toda la ferretería no sometida a tensión eléctrica.

En la figura siguiente se aprecia las tensiones inducidas de los conductores respecto al neutro que está a tierra, estos valores son muy importantes tenerlos presente porque son las tensiones que están expuestas y pueden afectar al personal que está realizando trabajos de rehabilitación de la línea de transmisión.

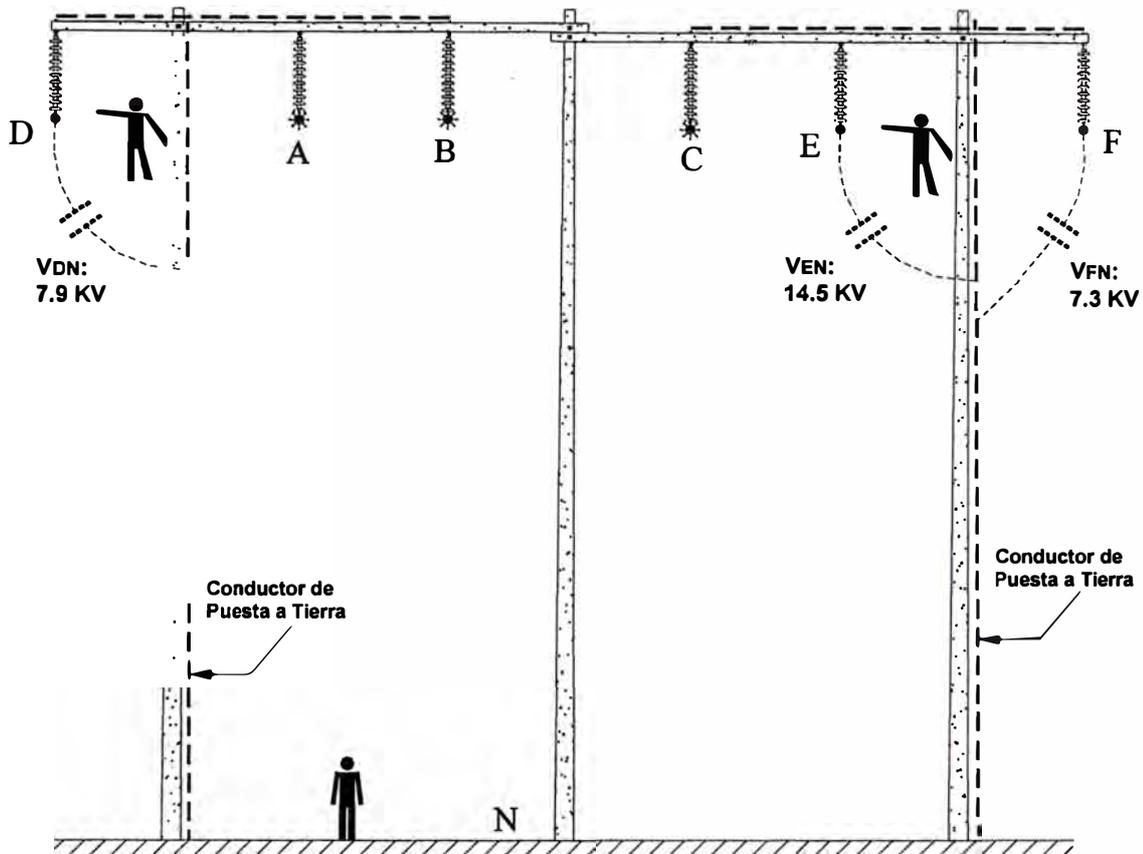


Fig. 4.9 Representación de las tensiones inducidas en las estructuras de la línea de transmisión.

Por ejemplo, antes de realizar el trabajo de desmontaje del conductor E, éste se conectará a tierra, de esta manera circulará corriente hacia tierra y el conductor estará a igual potencial que todo el sistema de puesta a tierra, protegiendo a las personas que están ubicadas en la estructura, y proceder con el desmontaje del conductor E.

Pero, si por algún motivo durante el proceso de desmontaje, el conductor de puesta a tierra se desprende del conductor E, éste vuelve al potencial de 14.5 KV sometiendo a las personas ubicadas en la estructura a este potencial, siendo causa de accidentes muy graves.

4.3.3 Cálculo de la corriente capacitiva en el proceso de desmontaje de conductores

Se procede a desmontar el conductor E. Por razones de seguridad, el conductor E está conectado a tierra, la nueva configuración se muestra en la figura 4.10 Se va a calcular la nueva corriente transversal por unidad de longitud (corriente capacitiva) especialmente la corriente hacia tierra.

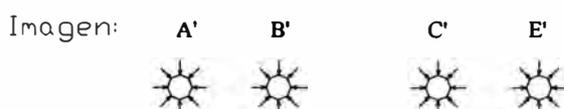
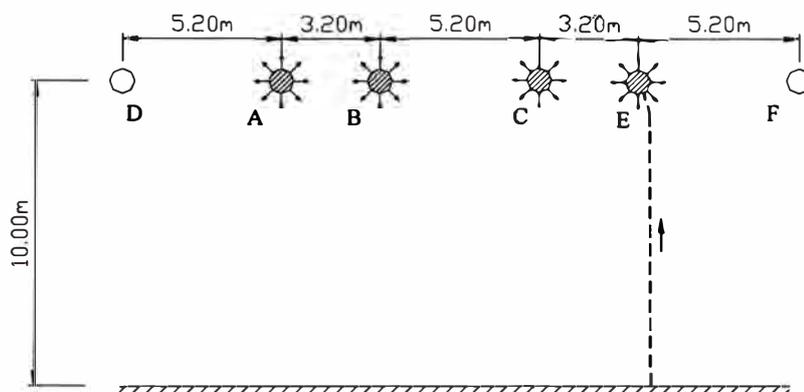


Fig. 4.10 Conductor E conectado a tierra.

De la ecuación (4.26) el punto P lo acercamos hasta el conductor E ; E y P vienen a ser el mismo punto, la tensión V_{EP} es cero y las tensiones V_{AP} , V_{BP} y V_{CP} serán las tensiones del sistema eléctrico respecto al neutro, por tanto se tiene 3 igualdades. La cuarta igualdad se obtiene del principio de conservación de la carga, la suma de las cargas eléctricas en los cuatro conductores es cero, completándose el sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned}
 V_{AE} &= \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \left[\tilde{i}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AE} \times d_{AA'}}{r_A \times d_{EA'}} \right) + \tilde{i}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BE} \times d_{AB'}}{d_{BA} \times d_{EB'}} \right) + \tilde{i}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CE} \times d_{AC'}}{d_{CA} \times d_{EC'}} \right) + \tilde{i}_E \operatorname{Ln} \left(\frac{r_E \times d_{AE'}}{d_{EA} \times d_{EE'}} \right) \right] \\
 V_{BE} &= \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \left[\tilde{i}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AE} \times d_{BA'}}{d_{AB} \times d_{EA'}} \right) + \tilde{i}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{EP} \times d_{BB'}}{r_B \times d_{EB'}} \right) + \tilde{i}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CE} \times d_{BC'}}{d_{CB} \times d_{EC'}} \right) + \tilde{i}_E \operatorname{Ln} \left(\frac{r_E \times d_{BE'}}{d_{EB} \times d_{EE'}} \right) \right] \\
 V_{CE} &= \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \left[\tilde{i}_A \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{AE} \times d_{CA'}}{d_{AC} \times d_{EA'}} \right) + \tilde{i}_B \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{BE} \times d_{CB'}}{d_{BC} \times d_{EB'}} \right) + \tilde{i}_C \operatorname{Ln} \left(\frac{d_{CE} \times d_{CC'}}{r_C \times d_{EC'}} \right) + \tilde{i}_E \operatorname{Ln} \left(\frac{r_E \times d_{CE'}}{d_{EC} \times d_{EE'}} \right) \right] \\
 0 &= \tilde{i}_A + \tilde{i}_B + \tilde{i}_C + \tilde{i}_E
 \end{aligned}$$

... (4.28)

Las distancias de separación entre los conductores, así como de sus imágenes, se obtiene de la figura 4.10. Los conductores A, B y C son de 240 mm^2 , el conductor a desmontar E es de 185 mm^2 .

En el anexo C, se tiene la tabla de datos técnicos de los conductores utilizados para la rehabilitación de la línea de transmisión, el radio para los conductores es:

Conductor AAAC 240mm², $r = 10.045$ mm. $\rightarrow r_A = r_B = r_C = 10.045$ mm,

Conductor AAAC 185mm², $r = 8.850$ mm. $\rightarrow r_E = 8.850$ mm,

Reemplazando valores en la ecuación (4.28) se forma la ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} 139,000/\sqrt{3} \angle 30^\circ \\ 139,000/\sqrt{3} \angle 150^\circ \\ 139,000/\sqrt{3} \angle 270^\circ \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j3.29 \times 10^8 & -j0.43 \times 10^8 & j0.43 \times 10^8 & j3.36 \times 10^8 \\ -j0.55 \times 10^8 & -j3.17 \times 10^8 & j0.22 \times 10^8 & j3.23 \times 10^8 \\ -j0.12 \times 10^8 & -j0.21 \times 10^8 & -j2.75 \times 10^8 & j2.81 \times 10^8 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_A \\ \tilde{I}_B \\ \tilde{I}_C \\ \tilde{I}_E \end{bmatrix}$$

Representado como $[V_E] = [A][\tilde{I}]$, donde $[A]$ es una matriz de coeficientes.

La solución es:

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_A \\ \tilde{I}_B \\ \tilde{I}_C \\ \tilde{I}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2698 \angle 113.4^\circ \\ 0.2884 \angle -115.9^\circ \\ 0.2696 \angle 2.2^\circ \\ 0.0363 \angle 177.2^\circ \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad \text{Ampere / m}$$

La corriente transversal o corriente capacitiva de toda la línea de transmisión es 27,450x [i_i], por tanto la corriente bajo este régimen (conductor E a tierra) es:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.406 \angle 113.4^\circ \\ 7.916 \angle -115.9^\circ \\ 7.401 \angle 2.2^\circ \\ 0.997 \angle 177.2^\circ \end{bmatrix} \quad \text{Ampere}$$

La corriente capacitiva en el conductor E es de 997 mA. La corriente capacitiva en el neutro N, en condiciones normales de operación de la línea, que fue calculada en el punto 1° es de 171 mA, este aumento considerable se debe a que el conductor E, que está conectado a tierra para su desmontaje, está mas cerca al conjunto de conductores activos A, B y C, aproximadamente a 3.2 m. Con respecto a la corriente capacitiva en el conductor N, que es a operación normal de la línea de transmisión, el valor es relativamente bajo porque el conductor neutro N a tierra, está a nivel del suelo, aproximadamente a 10m alejado de los conductores activos A, B y C.

De otro lado, Si el conductor D o F se conecta a tierra para su desmontaje, la corriente capacitiva para cada caso será:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.723 \angle 115.4^\circ \\ 7.952 \angle -118.6^\circ \\ 6.876 \angle 3.6^\circ \\ 0.494 \angle -58.8^\circ \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.475 \angle 114.2^\circ \\ 7.957 \angle -116.8^\circ \\ 7.135 \angle 2.5^\circ \\ 0.472 \angle 176.7^\circ \end{bmatrix} \quad \text{Ampere, respectivamente.}$$

Notamos que la corriente capacitiva en D conectado a tierra es 494mA, en F conectado a tierra es 472mA, son corrientes de valor menor al caso del conductor E conectado a tierra.

Se hace mención a estos valores de corriente, porque se puede dar el caso que se desprenda el conductor de puesta a tierra, para el conductor E por ejemplo, y éste conductor estará nuevamente sometida a la tensión inducida 14.5 KV, afectará a la persona que se encuentra trabajando en esta línea provocando la electrocución y luego del contacto con este conductor y se conecta nuevamente a tierra, soportando el cuerpo humano la corriente a tierra cuyo valor será algo menor que 997mA, 494mA ó 472mA según sea el caso, siendo estos valores de corriente muy altos y por tanto destructivos para el cuerpo humano.

4.3.4 Caso de electrocución de una persona en la línea de transmisión

De lo explicado en el párrafo anterior, Se va a calcular el valor de la corriente cuando se hace contacto a tierra y el cuerpo humano forma parte del circuito.

El conductor E está conectado a tierra, pero se interpone en su recorrido, una persona que forma parte de este circuito, con una resistencia R_H de 4,000 Ohm, se va a determinar la corriente a tierra, la cual también pasa por el cuerpo humano, la nueva configuración se muestra en la figura 4.11.

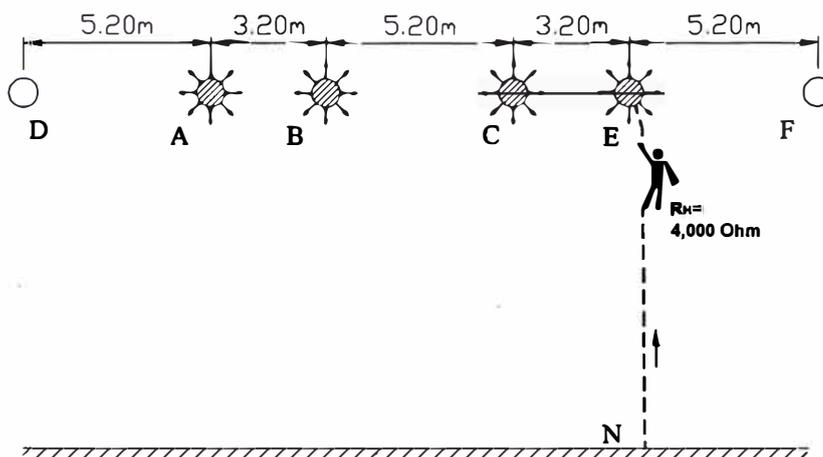


Fig. 4.11 Conductor E conectado a tierra a través de una resistencia R_H .

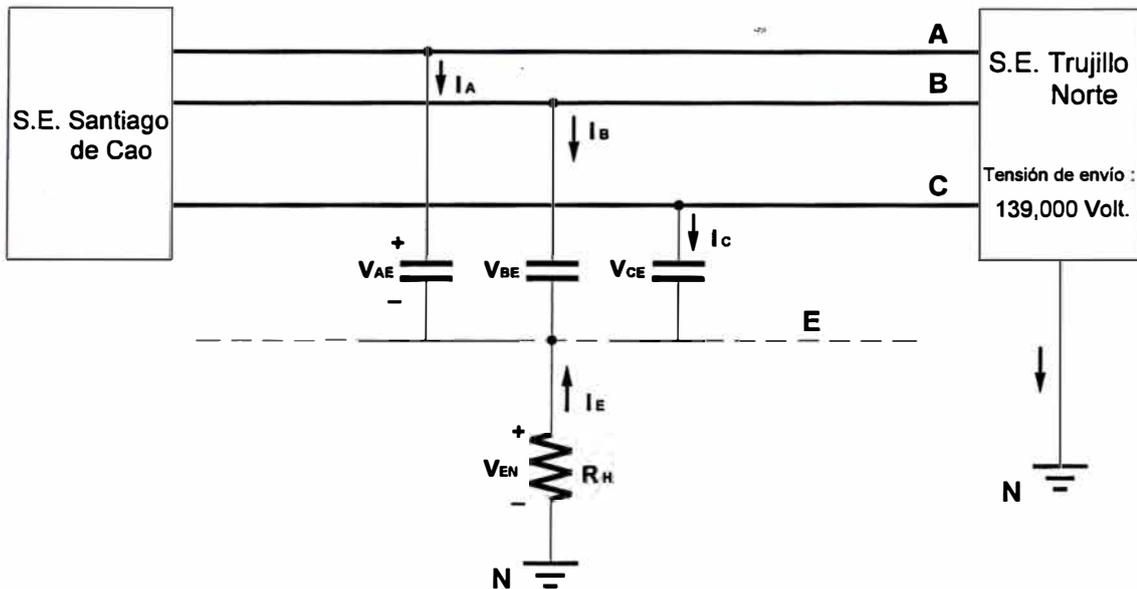


Fig. 4.12 Circuito representativo, conductor E conectado a tierra mediante \$R_H\$.

De la figura 4.12 se plantea el sistema de ecuaciones por el método de corrientes de malla (2da ley de Kirchoff).

$$V_{AN} = V_{AE} + V_{EN} = A_{11} \left(\frac{I_A}{\ell} \right) + A_{12} \left(\frac{I_B}{\ell} \right) + A_{13} \left(\frac{I_C}{\ell} \right) + A_{14} \left(\frac{I_E}{\ell} \right) + R_H (-I_E)$$

$$V_{BN} = V_{BE} + V_{EN} = A_{21} \left(\frac{I_A}{\ell} \right) + A_{22} \left(\frac{I_B}{\ell} \right) + A_{23} \left(\frac{I_C}{\ell} \right) + A_{24} \left(\frac{I_E}{\ell} \right) + R_H (-I_E)$$

$$V_{CN} = V_{CE} + V_{EN} = A_{31} \left(\frac{I_A}{\ell} \right) + A_{32} \left(\frac{I_B}{\ell} \right) + A_{33} \left(\frac{I_C}{\ell} \right) + A_{34} \left(\frac{I_E}{\ell} \right) + R_H (-I_E)$$

$$0 = I_A + I_B + I_C + I_E$$

Siendo \$\ell\$ la longitud del conductor, que para nuestro caso será todo el tramo de la línea de transmisión 27,450m. \$A_{ij}\$ son los coeficientes de la ecuación planteada en la sección 4.3.3:

\$[V_E] = [A][\vec{i}]\$. Reemplazando valores,

$$\begin{bmatrix} 139,000/\sqrt{3} \angle 30^\circ \\ 139,000/\sqrt{3} \angle 150^\circ \\ 139,000/\sqrt{3} \angle 270^\circ \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j1.20 \times 10^4 & -j0.16 \times 10^4 & j0.16 \times 10^4 & (-0.4 + j1.22) \times 10^4 \\ -j0.20 \times 10^4 & -j1.16 \times 10^4 & j0.08 \times 10^4 & (-0.4 + j1.18) \times 10^4 \\ -j0.05 \times 10^4 & -j0.08 \times 10^4 & -j1.0 \times 10^4 & (-0.4 + j1.02) \times 10^4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_E \end{bmatrix}$$

Despejando, se obtiene la corriente para cada conductor,

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.355 \angle 113.8^\circ \\ 7.985 \angle -115.8^\circ \\ 7.363 \angle 1.3^\circ \\ 0.964 \angle 162.4^\circ \end{bmatrix} \quad \text{Ampere}$$

La corriente capacitiva a tierra I_E es de 964 mA, y es la que circula a través del cuerpo humano con resistencia R_H de 4,000 Ω ; esta corriente es ligeramente menor a la corriente en el conductor E cuando está conectado directamente a tierra, 997mA. Pero de una manera ú otra estos valores son muy altos para que el cuerpo humano lo resista.

De otra parte, si el conductor D o F se conecta a tierra a través del cuerpo humano con resistencia $R_h=4,000$ Ohm.; y, siguiendo el procedimiento de cálculo para determinar las corrientes, similar al caso del conductor E; se obtiene la matriz de corriente capacitiva para cada caso.

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.717 \angle 115.0^\circ \\ 7.926 \angle -118.4^\circ \\ 6.911 \angle 3.6^\circ \\ 0.479 \angle -72.8^\circ \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.448 \angle 114.4^\circ \\ 7.987 \angle -116.8^\circ \\ 7.126 \angle 2.2^\circ \\ 0.460 \angle 170.1^\circ \end{bmatrix} \quad \text{Ampere, respectivamente.}$$

La corriente capacitiva a tierra para el conductor D y F es de 479mA y 460mA respectivamente, estos valores también son ligeramente menor si el conductor D o F estuviera conectado directamente a tierra.

4.3.5 Caso de electrocución de una persona en un tramo de la línea de transmisión

Durante el proceso de montaje ó desmontaje de la línea, éste se realiza por tramos, cada tramo es de aproximadamente 2,200m, que es la longitud contenida en un carrete de cable de aleación de aluminio de 185mm² y 240mm², es decir que se realiza este proceso para un conductor de 2,200m de longitud.

Este conductor de 2,200m de longitud, si no está conectado al sistema de puesta a tierra, está expuesto a la tensión inducida de 14.5KV, 7.9KV ó 7.3KV según sea el caso.

Si está conectado a tierra, circulará corriente capacitiva a tierra, cuyo valor por simple deducción, será mucho menor al calculado en el punto anterior, que comprendía a toda la longitud de la línea de transmisión.

El valor de esta corriente capacitiva se va a determinar a continuación.

Se tiene el conductor E que será desmontado, tiene una longitud de 2,200m y debe estar conectado directamente a tierra, pero esta vez por accidente, está conectado a tierra a través del cuerpo humano de resistencia $R_H = 4000\Omega$ (referencia figura 4.11).

Al igual que en la sección 4.3.4, el sistema de ecuaciones planteado es el mismo:

$$V_{AN} = V_{AE} + V_{EN} = A_{11}\left(\frac{I_A}{\ell}\right) + A_{12}\left(\frac{I_B}{\ell}\right) + A_{13}\left(\frac{I_C}{\ell}\right) + A_{14}\left(\frac{I_E}{\ell}\right) + R_H(-I_E).$$

$$V_{BN} = V_{BE} + V_{EN} = A_{21}\left(\frac{I_A}{\ell}\right) + A_{22}\left(\frac{I_B}{\ell}\right) + A_{23}\left(\frac{I_C}{\ell}\right) + A_{24}\left(\frac{I_E}{\ell}\right) + R_H(-I_E)$$

$$V_{CN} = V_{CE} + V_{EN} = A_{31}\left(\frac{I_A}{\ell}\right) + A_{32}\left(\frac{I_B}{\ell}\right) + A_{33}\left(\frac{I_C}{\ell}\right) + A_{34}\left(\frac{I_E}{\ell}\right) + R_H(-I_E)$$

$$0 = I_A + I_B + I_C + I_E$$

Pero en este caso ℓ es la longitud del tramo del conductor similar al contenido en el carrete, es decir $\ell = 2,200\text{m}$. Reemplazando valores,

$$\begin{bmatrix} 139,000/\sqrt{3} \angle 30^\circ \\ 139,000/\sqrt{3} \angle 150^\circ \\ 139,000/\sqrt{3} \angle 270^\circ \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j1.50 \times 10^4 & -j0.19 \times 10^4 & j0.19 \times 10^4 & (-0.4 + j1.53) \times 10^4 \\ -j0.25 \times 10^4 & -j1.44 \times 10^4 & j0.10 \times 10^4 & (-0.4 + j1.47) \times 10^4 \\ -j0.06 \times 10^4 & -j0.09 \times 10^4 & -j1.3 \times 10^4 & (-0.4 + j1.28) \times 10^4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_E \end{bmatrix}$$

se obtiene

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.593 \angle 113.5^\circ \\ 0.635 \angle -115.9^\circ \\ 0.593 \angle 2.1^\circ \\ 0.079 \angle 175.9^\circ \end{bmatrix} \quad \text{Ampere}$$

Se observa que la corriente a tierra es de 79mA y pasa por el cuerpo humano, el cual lo puede soportar hasta 3 segundos, posterior a ello sufrirá daños muy graves, como son quemaduras, fibrilación ventricular y posterior a ello, la muerte de la persona.

Si el conductor está conectado a tierra sin intervención del cuerpo humano, la corriente es de 79.86mA, por tanto podemos afirmar que en ambos casos la corriente capacitiva a tierra son prácticamente similares.

Para el caso de los conductores D y F conectados a tierra mediante el cuerpo humano se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.619 \angle 115.4^\circ \\ 0.637 \angle -118.6^\circ \\ 0.551 \angle 3.6^\circ \\ 0.039 \angle -59.9^\circ \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.599 \angle 114.2^\circ \\ 0.638 \angle -116.8^\circ \\ 0.572 \angle 2.5^\circ \\ 0.038 \angle 177.8^\circ \end{bmatrix} \quad \text{Ampere, respectivamente.}$$

La corriente capacitiva a tierra para el conductor D y F es de 39mA y 38mA respectivamente, pasan a través del cuerpo humano, el cual lo puede soportar hasta 11 segundos sin causar daños muy graves.

En consecuencia, para la Línea de Transmisión 138 KV Trujillo Norte – Santiago de Cao, se puede afirmar que el fenómeno de inducción por efecto de la inductancia de la línea es de baja magnitud, por tanto no son relevantes.

Pero el fenómeno de inducción debido al efecto capacitivo, produce magnitudes de tensión y corriente que afectan considerablemente la integridad física de las personas; y son determinantes para tomar las medidas de seguridad necesarias.

CAPÍTULO V

DESCRIPCIÓN BREVE DE LA OBRA A REALIZAR

Para el trabajo seguro del personal en las tareas de rehabilitación en una Línea permanentemente inducida, se realizó el cálculo de tensión y corriente inducidas, por tanto se conoce sus magnitudes, lo siguiente es desarrollar una metodología constructiva para desarrollar el trabajo de rehabilitación de la línea de transmisión, restitución del Sistema de Puesta a Tierra y ubicación básica de Tierras Temporarias.

La obra de rehabilitación comprende esencialmente el cambio de conductores, este cambio implica reemplazar la ferretería, las cadenas de aisladores, las grapas de suspensión y de anclaje para conductor, las varillas de armar, etc., por otras unidades nuevas.

Los cambios se efectúan sobre las estructuras de madera existente y bajo la modalidad de Trabajos en Línea Inducida, cuyas tareas se ejecutan con personal especializado y con experiencia comprobada.

Ha sido necesario construir Puestas a Tierra en todas las estructuras, logrando alcanzar valores de resistencia que fluctúan entre 4 y 18 Ohm.

Al concluir los trabajos, la nueva configuración rehabilitada, determina el nuevo y único circuito denominado Línea L-118.

5.1. Criterios Básicos para la Rehabilitación de la Línea L-118

El objeto es desarrollar pautas de trabajo aplicables a la obra de Rehabilitación de la Línea de Transmisión 138KV Trujillo Norte – Santiago de Cao.

5.1.1 Brigadas de trabajo

Los trabajos en línea inducida siempre deben ser considerados peligrosos, pero mas todavía cuando se presenta condiciones de aislamiento desfavorables: neblina, ropa de trabajo sucia - húmeda, transpiración, contacto con piezas metálicas propias de la instalación, etc.

Los trabajadores participantes calificados; conocen y dominan la actividad que se les asigna y las normas de seguridad establecidas para el puesto de trabajo.

Las charlas periódicas de seguridad, están orientadas a prevenir accidentes y contingencias; en tal sentido, todos los trabajadores sin excepción están obligados a utilizar sus equipos de protección personal y los concernientes a la naturaleza del trabajo.

5.1.2 Delimitación material de la zona de trabajo

En principio, toda la zona de trabajo cerca de conductor desnudo bajo tensión debe estar delimitada materialmente. Se emplea señalización visible como: carteles, banderolas, banderines, barreras, cintas, etc., prevista para el uso de señalización.

Se verifica la falta de tensión precedida ésta por la puesta a tierra.

5.1.3 Control del estado de un Poste

El mal estado de un poste no es siempre comprobable por un sencillo examen exterior. Para los postes de madera antes de escalarlo es necesario controlar su estado, o bien mediante una percusión con un martillo debe producir un sonido duro, puro y musical, o bien mediante un sondeo interesando la parte enterrada en 0.40 m aproximadamente.

El sondeo de la parte enterrada es difícilmente realizable; procede entonces considerar sospechosos los postes y debe ser **consolidados** antes de subirlos.

Consolidar un poste es asegurar mediante un dispositivo apropiado. Cables tirantes que actúan en tres direcciones distintas y enganchados a puntos fijos resistentes.

5.1.4 Medidas a observar durante la subida a una estructura

- La subida a una estructura debe obligatoriamente efectuarse con las manos libres.
- Estar proveído de un cinturón de seguridad y mantenerlo atado, durante toda la duración del trabajo, en un punto fijo cuya solidez la habrá verificado antes. Nunca debe quedar solo en la obra.
- El equipo y herramientas deben ser izados y bajados mediante una cuerda de servicio atados cuidadosamente.
- Excepto en el caso donde se pudo constatar el buen estado de una estructura, es necesario, antes de toda escalada, **consolidarlo**.
- Designar a una persona competente (Supervisor de Seguridad) cuyo único trabajo es asegurarse de que los obreros no franqueen los límites de la zona de trabajo señalizado.

5.1.5 Utilización de Maquinas Elevadoras cerca de Instalaciones bajo tensión

Se debe delimitar la zona de evolución de la maquina tomando en cuenta sus dimensiones, el espacio necesario a su maniobra y la posibilidad de ruptura de los cables que pueden oscilar ocasionando una descarga eléctrica.

5.1.6 Trabajos que interfieren el tráfico vehicular

- Deben señalizarse conforme a las instrucciones ministeriales vigentes.
- Se anunciará la obra y/o equipo en la carretera con una señalización avanzada a 150m por lo menos de sus extremos y conforme a los reglamentos vigentes.
- Si se interrumpe momentáneamente el tráfico, se colocará una bandera roja cerca de la señal de interrupción, para cubrir los puntos peligrosos.
- Por la noche, se reemplazan las banderas rojas por señales luminosas.
- La suspensión del tráfico puede, en unos casos, necesitar el aviso a las autoridades competentes y la vigilancia policíaca.

5.1.7 Verificadores de falta de tensión

- Los dispositivos de verificación de falta de tensión deben adaptarse a la tensión de las instalaciones en que están utilizados.
- Se debe verificar antes del uso, que el equipo esté en buen estado.
- Para la utilización de estos aparatos, el empleo de guantes aislantes y equipos complementarios es obligatorio.

5.1.8 Pértigas Aislantes

Las pértigas deben tener un aislamiento apropiado a la tensión de servicio de la instalación en que están utilizadas. Cada vez que se utiliza la pértiga, verificar que ningún defecto aparece en su aspecto exterior y que no está ni húmeda ni sucia.

5.1.9 Dispositivos de Puesta a Tierra y en Cortocircuito

La puesta a tierra y en cortocircuito de todos los conductores en que debe efectuarse el trabajo, solo puede hacerse mediante un dispositivo especial. Las operaciones deben efectuarse en el orden siguiente:

- a) Asegurarse de que todas las piezas de contacto así como los conductores del aparato estén en buen estado.
- b) Utilizando guantes dieléctricos, conectar el cable de tierra del dispositivo al conductor copperweld de línea de bajada de línea a tierra, o bien al piquete metálico (varilla o jabalina de copperweld) proveniente del pozo de tierra.
- c) Desenrollar completamente el conductor del dispositivo si está colocado en un tambor, para evitar los efectos electromagnéticos.
- d) Empezando por el conductor más cercano, fijar las pinzas en cada uno de los conductores, utilizando una pértiga aislante y guantes dieléctricos. Estar apartado de los conductores de tierra y de cualquier otro conductor.
- e) Verificar el ajuste de fijación de las pinzas a los conductores. Un deficiente ajuste expone a grave riesgo de electrocución al personal.
- f) Para la supresión de los dispositivos de puesta a tierra y en corto circuito, accionar rigurosamente en el orden contrario.

5.1.10 Excavación de Pozos y Zanjas

Las Excavaciones deben estar blindadas, entibadas o apuntaladas. Las medidas de protección y la colocación de los dispositivos de seguridad se realizan antes de toda bajada de un obrero a la excavación. Tomar en cuenta las sobrecargas y vibraciones previsibles debidas al tráfico por las vías transitables cercanas a las excavaciones.

5.2. Sistema de Puesta a Tierra

El sistema de puesta a tierra construido garantiza que el máximo valor obtenido en cada una de las 85 estructuras de la Línea L-118 Rehabilitada sea de 20 Ohm, como exige la práctica de la ingeniería, y Normas CNE 2000, IEEE Std. 80, IEEE Std. 142.

El sistema de puesta a tierra particular construido que corresponde a cada estructura, se detalla en el Anexo E.

La Puesta a Tierra de las estructuras tiene los siguientes objetivos:

- Evitar Tensiones de Toque y Paso peligrosas, entre estructuras y equipos, y el terreno; en operación normal o durante fallas.
- Proveer al sistema, una vía de baja impedancia tal que durante fallas asegure la rápida operación de la protección.

- Conducir a tierra las corrientes de descargas de rayo limitando las sobretensiones producidas, evitando efectos secundarios.
- Medio de protección de tensiones y corrientes inducidas durante el proceso de rehabilitación de la línea de transmisión.
- Servir como conductor de retorno en instalaciones que requieren de puestas a tierra sólidas a través de los puntos neutros.

Las excavaciones y relleno de los pozos son de dos tipos:

Tipo N Material propio compactado (terreno natural).

Tipo T Material de préstamo compactado con tierra de cultivo tratado con sal, bentonita y sustancias orgánicas.

Para posibilitar el acceso a los dispersores para efectos de mantenimiento preventivo durante la operación de la Línea, se instalan cajas de registro de concreto armado.

El conexionado del conductor de tierra proveniente del poste con la varilla copperweld, se efectúa mediante soldadura exotérmica.

Instalación de línea de tierra en las estructuras

Se hincaron electrodos copperweld en cada pozo y relleno - compactado con material de préstamo tratado conforme a la configuración establecida en planos (Anexo E).

Esta actividad se realizó en las siguientes etapas:

-Primera Etapa.- Instalación del conductor copperweld en una longitud variable en función a la altura del poste de madera; dejando una mecha de conductor arrollado en el extremo superior para su posterior conexión con la ferretería de la estructura.

-Segunda Etapa.- Construcción de los Pozos de Tierra y medición – verificación que el valor obtenido de la Resistencia de Puesta a Tierra no supere 25 Ohm.

-Tercera Etapa.- Conexión del extremo inferior de la Línea de Tierra en Estructura con el sistema de Pozos de acuerdo a configuración establecida.

Medida de la Resistencia de Puesta a Tierra

La medida de la resistencia de las puestas a tierra adquiere gran importancia por tratarse de instalaciones efectuadas en terrenos de tipo desértico y pedregoso, cuya alta resistividad corresponde a la capa superficial que generalmente es de poco espesor, donde se instalaron los dispersores.

Así mismo, el valor de Resistencia obtenida garantiza las maniobras de conexionado de las tierras temporales para la dispersión de las **tensiones inducidas al personal y equipos.**

Los valores obtenidos y la cantidad de dispersores instalados, se encuentra en el anexo E. Se observa que la resistencia máxima medida es de 18 Ohm en la estructura No.59, que está compuesta por 04 varillas.

5.3. Tendido de Conductor engrasado de 240 mm²

Luego del transporte de los equipos de tendido y de las bobinas de conductor en la cantidad y ubicación previstas en el Plan de Tendido, se instala el conductor fase por fase. La instalación del conductor se realiza siguiendo los pasos básicos:

- Instalar el winche y freno en posición de trabajo previsto en el Plan de Tendido.
- Puesta a tierra temporaria del winche y freno.
- Instalación de poleas en las cadenas de aisladores en la fase del tamo previsto para el tendido.
- Conectar a tierra un extremo de la polea. El acceso al pozo de tierra es mediante el conductor copperweld adherido a las crucetas y postes.
- Extender el cable guía (cordina) en todo el tramo según la fase a tender.
- Conectar el extremo final del cable guía con el conductor AAAC mediante “medias punteras” y yunto giratorio.
- Ubicar al personal intermedio en la ubicación prevista para cada uno, premunidos de un radio transmisor – receptor en completo estado operativo.
- En estricta coordinación entre el personal responsable del winche, freno y personal intermedio, iniciar el proceso de tendido.
- Concluido el proceso anterior, y en estado de pre-tensado, el conductor se anclará mediante una grampa tipo pistola en la cadena de aislador.
- Transcurrido 48 horas de la condición anterior, se procede al tensado del conductor hasta el flechado controlado permanentemente con un teodolito.
- Concluida la etapa anterior, se procede al engrampado y colocación de las varillas de armar.
- Instalar los amortiguadores según los requerimientos.
- Para el Tendido de los otros dos conductores, proceder de acuerdo a lo indicado.

La instalación del conductor se realiza en línea inducida. En consecuencia se deben instalar tierras temporarias fijas y móviles, teniendo en consideración los valores de tensión y corriente inducidas, calculados en el capítulo anterior.

Desmontaje de Conductores y accesorios complementarios

En todo momento el cable piloto y conductor deben permanecer a tierra mediante el uso de poleas especiales puestos a tierra. El desmontaje de los conductores AAAC se realiza con personal especializado para trabajos en líneas con corriente inducida por la proximidad de la otra terna que está en servicio permanente. Posteriormente, con la debida precaución se procederá al retiro de los amortiguadores de cloruro de polivinilo sólido instalados sobre el conductor.

Luego del desmontaje de los conductores, con la debida precaución se procederá al retiro de las cadenas de aisladores de suspensión y de anclaje. Con respecto al desmontaje de los Accesorios de las Cadenas de Aisladores (adaptadores y pernos) se debe comprobar que posean los pasadores de seguridad, arandelas y tuercas.

5.4. Trazo de Ruta de la Línea de Transmisión L-118 Rehabilitada

La ubicación de las estructuras de la Nueva Línea L-118 Rehabilitada permanece inalterable y en su ubicación primigenia. En consecuencia, se verifica que la ruta cumple con los criterios básicos de selección siguientes:

- Poligonal con 13 vértices a lo largo de toda la extensión de la línea.
- Aprovecha los accesos carrozables y peatonales existentes.
- Evita zonas deleznales o de derrumbes.

Es así que, desde la Subestación Trujillo Norte de propiedad de Red de Electricidad del Perú (REP); la Nueva Línea de Transmisión 138 KV L-118, inicia su recorrido hasta alcanzar el Pórtico de la Subestación Santiago de Cao, progresiva 27,137 Punto Terminal de la Línea 138 KV.

Características del Trazo.- Las características más importantes son:

- Longitud Total (topográfica): 27137 m.
- Longitud Total (conductor) : 27325.73 m.
- Número de vértices : 13
- Cota Mínima - Máxima : 15 - 250 m.s.n.m.

Las deflexiones del eje longitudinal se encuentran en el anexo A.

Distancias Mínimas de Seguridad.- Las distancias de seguridad verticales se aplican en las condiciones de temperatura y carga del conductor de 50°C, sin presencia de viento (CNE-234 A1).

- Terreno no transitable por vehículos	:	6.25 m
- Trochas, calles, avenidas	:	7.25 m
- Carreteras, calles, avenidas	:	8.25 m
- A otras líneas que se cruzan	:	2.00 m
- A puntos no accesibles de construcciones	:	3.75 m
- A líneas de telecomunicaciones	:	3.05 m

5.5. Materiales utilizados en la obra de rehabilitación

Los materiales utilizados, para reemplazar a los desmantelados que constituyen la Línea L-118 Rehabilitada, son similares exceptuando el conductor AAAC 240 mm².

5.5.1 Conductor de Aleación de Aluminio

El conductor de aleación de aluminio (engrasado) es cableado, concéntrico, desnudo y compuesto de 37 hilos, para la sección nominal requerida (240 mm²). El cableado del conductor de aleación de aluminio está compuesto de capas de alambres de aleación de aluminio 6201-T81.

Los hilos de la capa exterior del cableado es en sentido derecho, estando las capas interiores cableados en sentido contrario entre sí, otorgándole una máxima adherencia entre los alambres de cada capa y entre las capas y tener la capacidad de 6841 Kg. de carga de rotura. La longitud contenida en cada carrete suministrado es de 2500 m. Las características técnicas principales se muestran en el anexo C.

Grasa de Protección

La grasa empleada para la protección del conductor de aleación de aluminio contra la corrosión, cumple con las normas ASTM D-127 y NVG 1758 81. Constituyendo una grasa estable, con alto coeficiente de fricción, resistente a las condiciones ambientales prevalecientes en el sitio y a una temperatura permanente de 80°C sin alterar sus propiedades; cumple además los siguientes requerimientos:

- Punto de goteo no menor de 140°C.
- Penetración no menor de 170 mm/10 (ASTM D 217).
- Concentración de sal al 5% mayo a 500 horas (ASTM 117).
- Compatible con otros productos grasos o gelatinosos utilizados en juntas y conexiones.
- Absorción de agua nula.

- Mantiene sus características inalterables a 200°C por encima del punto de goteo durante 168 horas.
- Pérdidas por evaporación mínimas durante ciclos prolongados de sobrecarga térmica.

5.5.2 Accesorios del Conductor de Aleación de Aluminio

Estos accesorios se usan con el conductor, son los siguientes:

Varillas de Armar Simple para conductor AAAC-240 mm², 1930 mm de longitud, son de aluminio del tipo preformado y están instalados sobre los conductores de fase y toda esta unidad se encuentra dentro de la grapa de suspensión.

La varilla de armar forma una capa protectora en el conductor, sin intersticios y con una presión adecuada para evitar aflojamiento debido a envejecimiento.

Junta de empalme (Manguito de Empalme) para conductor AAAC 240 mm² son de aleación de aluminio del tipo de compresión con el tiro de rotura mínimo de 90 % del tiro de rotura del conductor.

Manguito de Reparación para conductor AAAC 240 mm² son de aleación de aluminio del tipo de compresión, longitud. La utilización del manguito será solamente en los casos de leves daños locales en la capa exterior del conductor menor al 50 % del número de hilos.

Pasta para aplicación a Conectores y Manguitos de Empalme consiste en una sustancia químicamente inerte, de alta eficiencia eléctrica e inhibidor contra la oxidación, soluble con el agua, larga vida en almacenamiento y no toxico. Es un compuesto rellenedor, de todos los accesorios de compresión.

Conectores de Empalme para conductor AAAC de 170 hasta 280 mm² del tipo vías paralelas, de tres pernos. Se utilizan para realizar empalmes en el conductor, en aquellas partes del conductor no sometidas a esfuerzos mecánicos.

Amortiguadores son del tipo espiral antivibración, de 1680 mm de longitud, 0.8Kg. Fabricados de Cloruro de Polivinilo Sólido (PVC) de forma helicoidal, diseñado para operar en ambientes de temperatura desde -5 °C hasta 160 °C.

Por recomendaciones del fabricante, se ha instalado amortiguadores en los conductores de fase conforme al detalle siguiente:

Vano 60 m – 179 m	Dos amortiguadores
Vano 180 m – 359 m	Cuatro amortiguadores

Vano 360 m – 729 m Seis amortiguadores

5.5.3 Aisladores

Los aisladores de suspensión son del tipo Antineblina con ensamble tipo casquillo y bola (Ball and socket), adecuados para ser usados en cadenas de aisladores.

Cada aislador está provisto con un ánodo de sacrificio, cuya forma y material es un manguito de zinc impregnado sobre el vástago del aislador.

El material dieléctrico aislante es de porcelana vitrificada, libre de defectos. El vidriado homogéneo cubre todas las partes del aislador no cubiertas por el metal.

El material de las partes metálicas es de hierro maleable o acero galvanizado por inmersión en caliente según Normas ASTM A 153 para lograr un espesor mínimo de 150 μm , con pasadores de bloqueo fabricados de bronce resistente a la corrosión.

Las características técnicas principales se muestran en el anexo D.

5.5.4 Accesorios de los Aisladores y Ferrería

Están sujetas a esfuerzos mecánicos, son de acero forjado, adecuadamente tratado para aumentar su resistencia a choques y deslizamientos. Las superficies de acabado son lisas, la galvanización por inmersión en caliente tiene una textura lisa, uniforme, limpia y espesor mínimo de 150 μm . Para evitar el aflojamiento de los pernos en su conjunto, todas las tuercas están fijadas por medio de un dispositivo de seguridad.

Todas las piezas que están bajo tensión eléctrica cumplen con el criterio eléctrico de no poseer esquinas agudas o resaltes que produzcan un excesivo gradiente de campo eléctrico. Son fabricados de material antimagnético.

Estos accesorios se usan en la cadena de aisladores y son los siguientes:

Pernos Ojo de 12” y 14” de acero forjado, la carga de rotura mínima es de 25000 Lb. Longitud roscada 152mm. Las dimensiones básicas son las siguientes:

- Perno ojo de ¾” x 12” con tuerca y arandela cuadrada de 3” x 3” x ¼”
- Perno ojo de ¾” x 14” con tuerca y arandela cuadrada de 3” x 3” x ¼”

Grillete Tipo “U” de acero forjado, galvanizado por inmersión en caliente, con una resistencia mínima a la rotura de 25000 Lb. Está provisto de un pin pasante de 5/8” pulg. y un pasador de seguridad de bronce.

Adaptador Horquilla – Bola de acero forjado, galvanizado en caliente, resistencia a la rotura mínima de 25,000 Lb. Tiene una longitud de 75 mm, abertura de la horquilla de 22

mm, provisto de un pin pasante de 16 mm (5/8 pulg.) de diámetro y pasador de seguridad de bronce.

Adaptador Casquillo – Horquilla de acero forjado, galvanizado en caliente, con una resistencia a la rotura mínima de 25000 Lb. Tiene una longitud de 65 mm, abertura de horquilla de 22 mm, provisto de pin pasante de 16 mm. (5/8 pulg.). Pasador de seguridad de bronce.

Adaptador Horquilla – Ojo de acero forjado y galvanizado por inmersión en caliente, resistencia a la rotura mínima de 25000 Lb. Tiene una longitud de 67 mm, abertura de horquilla de 22 mm, provisto de pin pasante de 16 mm (5/8 pulg). Pasador de seguridad de bronce.

Adaptador Casquillo - Ojo Corto, articula el aislador de porcelana y la grapa de suspensión. Es de acero forjado galvanizado por inmersión en caliente, resistencia mínima a la rotura de 25000 Lb.; tiene una longitud de adaptación de 60 mm y diámetro del orificio de 11/16”.

Adaptador Casquillo - Ojo Alargado, articula la cadena de aisladores y la grapa de anclaje. Es de acero forjado y galvanizado por inmersión en caliente, resistencia a la rotura mínima de 25000 Lb. tiene una longitud de adaptación de 139.7 mm diámetro del orificio de 13/16.

Grapa de Suspensión, está constituida por el cuerpo y mordaza de aleación de aluminio; pernos, tuercas y arandela de acero galvanizado; abertura del acoplamiento horquilla de 39 mm y perno pasante de 16 mm diámetro con pasador de seguridad de bronce. Resistencia a la rotura mínima de 25000 Lb. adecuado para engrampar el conductor 240 mm² con su respectiva varilla de armar previamente instalada.

Grapa de Anclaje Tipo Pistola de 5 Pernos para conductor AAAC 240mm², está constituida por el cuerpo y mordaza de aleación de aluminio, provisto de 5 pernos tipo “U” de 12.70mm de diámetro, tuercas y arandela de acero galvanizado, abertura del acoplamiento horquilla de 35 mm y perno pasante de 19 mm diámetro con pasador de seguridad de bronce. Resistencia mínima a la rotura de 25000 Lb.

5.5.5 Ferretería para armado de Postes y Crucetas

Perno Maquinado de acero forjado, galvanizado en caliente. Carga de rotura mínima de 25000 Lb. longitud roscada de 152 mm. Son de las siguientes dimensiones:

- Perno maquinado de 7/8” diámetro x 18” longitud, con tuerca y contratuerca.

- Perno maquinado de 7/8" diámetro x 22" longitud, con tuerca y contratuerca.

Arandelas, son fabricadas de plancha de fierro galvanizado. Resistencia mínima al esfuerzo cortante de 57 KN. Son de las dimensiones siguientes:

- Arandela cuadrada plana de 3"x3", 1/4" de espesor, con agujero central 13/16".
- Arandela cuadrada curvada de 3"x3", 1/4" de espesor, agujero central 13/16".
- Arandela cuadrada plana de 4"x4", 1/4" de espesor, con agujero central 15/16".
- Arandela cuadrada curvada de 4"x4", 1/4" de espesor, agujero central 15/16".

5.5.6 Crucetas de Madera

De 7 1/4 x 5 1/4 x 11.50m la especie forestal para la fabricación de las crucetas es Coastal Douglas Fir, se reemplaza las crucetas deterioradas y pernos maquinados utilizando el orificio existente en el poste, especialmente aquellas unidades de la Línea L-118 antigua que soporta dos fases de la nueva Línea L-118 Rehabilitada.

5.5.7 Materiales para Retenidas

Perno Angular, se utiliza como enlace entre el cable Alumoweld de la retenida y la estructura soporte (poste de madera). Es de acero forjado y galvanizado en caliente, espesor mínimo de galvanizado 150 µm. 14" de longitud, 3/4" diámetro, longitud roscada 152 mm. Están provistos de arandelas, tuercas y contratuercas adecuadas.

Carga mínima de rotura de 25,000 Lb.

Cable Alumoweld de 7x9 AWG consisten en hilos de acero recubiertos de aluminio 1350, mediante un proceso de extrusión continua y endurecimiento por trefilación, otorgando al cable alta resistencia a la corrosión atmosférica y polución.

Tradicionalmente conocidos como Alumoweld, se utilizan en las retenidas de los postes y soportan los esfuerzos a los cuales serán sometidos estos postes. Las características técnicas principales se muestran en el anexo C.

Amarre Preformado Alumoweld sirve para sujetar el cable Alumoweld a la estructura y varilla de anclaje. Carga de rotura mínima: 12,330 Lb. (5,740 Kg.).

Varilla de Anclaje de acero forjado y galvanizado en caliente, tiene 3/4" de diámetro x 2.40 m de longitud con una resistencia a la rotura de 25,000 Lb.

La varilla está compuesta en un extremo por un ojal de doble canal para instalar doble amarre preformado y en el otro extremo una longitud roscada. Está provisto de arandela, tuerca y contratuerca del mismo material.

Arandela de Anclaje de acero galvanizado de 4" x 4" x ½", está provista de una perforación central de 13/16" de diámetro. Se utiliza en el extremo roscado de la varillas de anclaje para tirar el cable de retenida con el bloque de concreto.

Bloque de Concreto Armado 1.50 x 0.6 x 0.30 m fabricado con malla de acero corrugado de 3/8" de diámetro y un agujero de 25mm para la varilla de anclaje, va directamente enterrado en el suelo.

Protector de PVC de cloruro de polivinilo de color amarillo, para señalar la retenida, longitud 2.40 m, 2" de diámetro.

5.5.8 Materiales para el Sistema de Puesta a Tierra

Varilla Copperweld, es un electrodo de puesta a tierra constituido por una varilla que termina en punta: El núcleo es de acero al carbono; está revestida de una capa de cobre electrolítico recocido con una conductividad igual a la especificada para los conductores de cobre. El espesor de este revestimiento es de aproximadamente 0,270 mm.

Longitud : 2,40 m

Diámetro nominal : 16 mm

Conector Varilla – Conductor de bronce ó cobre, con aditamentos que permitan una sujeción adecuada entre el cable de puesta a tierra (35 - 50 mm²) y la varilla de cobre de 5/8" diámetro.

Conector Conductor – Conductor fabricado en cobre de alta resistencia mecánica, de tipo doble vía, compuesta de dos pernos (similar a catálogo Burndy Cod CP2525).

Plancha doblada de Cobre tipo "J" para conectar el conductor de puesta a tierra con los accesorios metálicos de fijación de los aisladores en los postes y crucetas de madera. Fabricada es plancha de cobre, en forma de "J" de 3 mm de espesor y se aplicarán al poste sujetando al conductor. Está provisto de un ojal para ingreso de pernos de 13/16" Ø.

Grapas para fijar Conductor a Poste son tipo Copperweld en forma de "U", con sus extremos puntiagudos para facilitar la penetración al poste de madera. Adecuado para conductor de cobre de 35 y 50 mm².

Conductor de Puesta a Tierra

Conductor tipo Copperweld, es un conductor de acero con recubrimiento de cobre tipo Copperweld, de 7 N° 10 AWG de sección, con una conductividad del 40%. Las características técnicas principales se muestran en el anexo C. Su instalación es para uso exterior sobre la superficie de la cruceta y el poste de madera.

Conductor de Cobre Desnudo Temple Blando de 35mm² de sección, su instalación es subterránea hacia el electrodo de puesta a tierra. Las características técnicas principales se muestran en el anexo C.

CONCLUSIONES

1. La tensión y corriente inducidas en los conductores debido a la inductancia de la Línea de Transmisión 138 KV Trujillo Norte – Santiago de Cao son de baja magnitud, produce una caída de tensión desbalanceada de aproximadamente 1KV, e induce a los conductores no energizados una tensión de 115V en el peor de los casos. El fenómeno de inducción por efecto de la inductancia, generalmente toma importancia para líneas de transmisión largas, o bien los conductores tiene separación mínima y potencia de envío considerable. Esta línea de transmisión tiene características muy particulares, es de corta longitud, no existe transposición de conductores, y debido a la configuración de su estructura, la separación de fases es relativamente grande respecto al nivel de tensión de la línea. Se puede afirmar que el fenómeno de inducción en este caso no es relevante.
2. La tensión y corriente inducidas debido a la capacitancia de la Línea de Transmisión 138KV Trujillo Norte – Santiago de Cao, produce magnitudes elevadas que afectan considerablemente la integridad física de las personas; y son determinantes para tomar las medidas de seguridad necesarias. Los valores de tensión inducida para los conductores no energizados son de 14.5, 7.9 y 7.3 KV. La inducción por efecto capacitivo es independiente de la longitud de la línea de transmisión. Además la matriz capacitancia del sistema de transmisión eléctrico se representa incluyendo el efecto del suelo ya que la distancia de separación máxima entre conductores es de 8.4m y la altura promedio de los conductores es de 10m, estas magnitudes son comparables.
3. Se debe tener presente que los resultados obtenidos debido al fenómeno de inducción en la línea de transmisión analizada, es aplicable solamente a ella. Esos resultados no se deben generalizar para cualquier línea de transmisión parecida o diferente. En otras palabras, respecto al fenómeno de inducción no se deben adoptar criterios en base a la

línea de transmisión analizada y generalizarlos para otras líneas de transmisión o red de distribución. Caso opuesto a los resultados, las formulas obtenidas en este informe se pueden aplicar a cualquier otra línea de transmisión o red de distribución primaria.

4. De forma más general, este procedimiento de cálculo se aplica a cualquier otra línea eléctrica de simple terna o múltiple terna con otra línea eléctrica o red de comunicación colindante que pueden provocar inducción. Es posible obtener las magnitudes de inducción de una línea sobre otra y viceversa, conocer si estamos expuestos ante el fenómeno de inducción por efecto inductivo o efecto capacitivo o ambas, determinar cual es la más influyente para luego tomar las medidas de seguridad para cada caso y elaborar un plan de trabajo eficiente.
5. Los parámetros eléctricos de una línea de transmisión o conjunto de líneas eléctricas colindantes, como son la inductancia y capacitancia, o mejor aún como la reactancia inductiva y reactancia capacitiva, se representa por un conjunto de valores expresados en una matriz.

La Matriz Reactancia Inductiva del conjunto de líneas eléctricas se obtiene de la siguiente formula:

$$[X] = j\omega \times 2 \times 10^{-7} \left[\text{Ln} \left(\frac{1}{d_{ij}} \right) \right]_N \quad \text{Ohm/m}$$

Donde N es el número de conductores del conjunto de líneas eléctricas.

i, j se designan como $\{1, 2, 3, \dots, N\}$ ó $\{A, B, C, \dots\}$.

d_{ij} es la distancia entre el i -ésimo y j -ésimo conductor, esta distancia se representa en la matriz reactancia inductiva en la fila i , columna j .

Por ejemplo un conjunto de líneas eléctricas compuesto por una línea de transmisión de cuatro conductores A, B, C, y D, y una línea telefónica de dos conductores E y F, tiene como Matriz Reactancia Inductiva:

$$[X] = j\omega \times 2 \times 10^{-7} \begin{bmatrix} \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AC}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AD}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AE}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{AF}}\right) \\ \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BC}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BD}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BE}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{BF}}\right) \\ \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CC}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CD}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CE}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{CF}}\right) \\ \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{DA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{DB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{DC}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{DD}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{DE}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{DF}}\right) \\ \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{EA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{EB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{EC}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{ED}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{EE}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{EF}}\right) \\ \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{FA}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{FB}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{FC}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{FD}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{FE}}\right) & \operatorname{Ln}\left(\frac{1}{d_{FF}}\right) \end{bmatrix} \text{ Ohm/m}$$

La matriz resulta simétrica, los elementos diagonales de la matriz es la reactancia propia de cada conductor, los otros términos son las reactancias mutuas entre los conductores i y j correspondiente. La ecuación matricial $[V] = [X][I]$ queda planteada, las corrientes por cada conductor es conocido, por tanto resolviendo se obtiene la tensión inducida en cada conductor.

La Matriz Reactancia Capacitiva del conjunto de líneas eléctricas se obtiene de la siguiente formula:

$$[X_P] = \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{d_{jP} \times d_{ij'}}{d_{ji} \times d_{Pj'}} \right) \right]_N \text{ Ohm} \times m$$

Donde N es el número de conductores del conjunto de líneas eléctricas.

i, j se designan como $\{1, 2, 3, \dots, N\}$ ó $\{A, B, C, \dots\}$.

d_{jP} es la distancia entre el j -ésimo conductor y el punto P arbitrario.

d_{ji} es la distancia entre el j -ésimo é i -ésimo conductor.

$d_{ij'}$ es la distancia entre el i -ésimo conductor y la imagen del j -ésimo conductor.

$d_{Pj'}$ es la distancia entre el punto P arbitrario y la imagen del j -ésimo conductor.

Por ejemplo para un conjunto de líneas eléctricas compuesto por una red eléctrica de dos conductores A y B : y otra red de conductores C y D , la Matriz Reactancia Capacitiva para el punto P será:

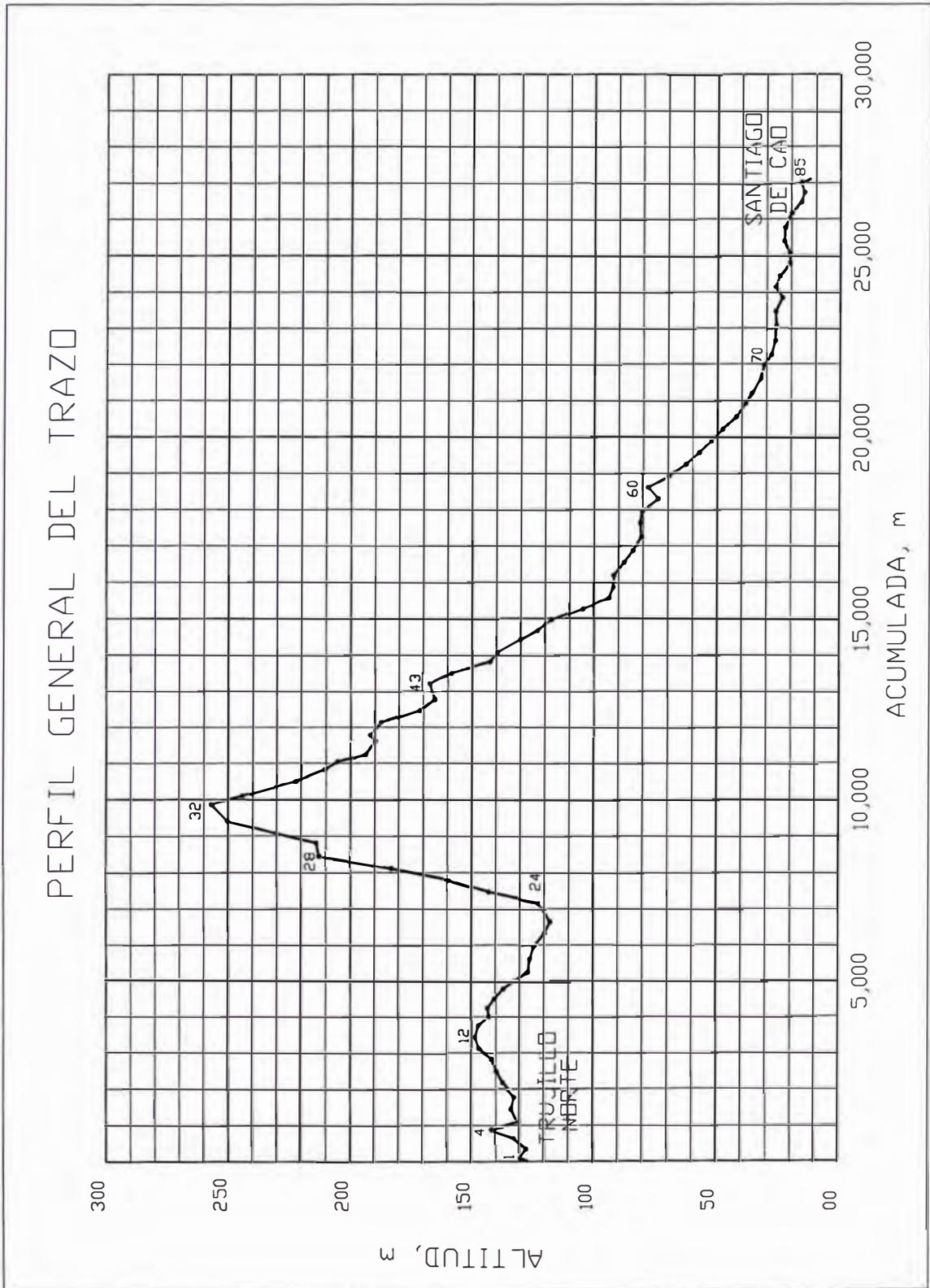
$$[X_p] = \frac{18 \times 10^9}{j\omega} \begin{bmatrix} \text{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{AA'}}{d_{AA} \times d_{PA'}} \right) & \text{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{AB'}}{d_{BA} \times d_{PB'}} \right) & \text{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{AC'}}{d_{CA} \times d_{PC'}} \right) & \text{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{AN'}}{d_{NA} \times d_{PN'}} \right) \\ \text{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{BA'}}{d_{AB} \times d_{PA'}} \right) & \text{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{BB'}}{d_{BB} \times d_{PB'}} \right) & \text{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{BC'}}{d_{CB} \times d_{PC'}} \right) & \text{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{BN'}}{d_{NB} \times d_{PN'}} \right) \\ \text{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{CA'}}{d_{AC} \times d_{PA'}} \right) & \text{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{CB'}}{d_{BC} \times d_{PB'}} \right) & \text{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{CC'}}{d_{CC} \times d_{PC'}} \right) & \text{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{CN'}}{d_{NC} \times d_{PN'}} \right) \\ \text{Ln} \left(\frac{d_{AP} \times d_{NA'}}{d_{AN} \times d_{PA'}} \right) & \text{Ln} \left(\frac{d_{BP} \times d_{NB'}}{d_{BN} \times d_{PB'}} \right) & \text{Ln} \left(\frac{d_{CP} \times d_{NC'}}{d_{CN} \times d_{PC'}} \right) & \text{Ln} \left(\frac{d_{NP} \times d_{NN'}}{d_{DD} \times d_{PN'}} \right) \end{bmatrix} \text{ Ohm} \times m$$

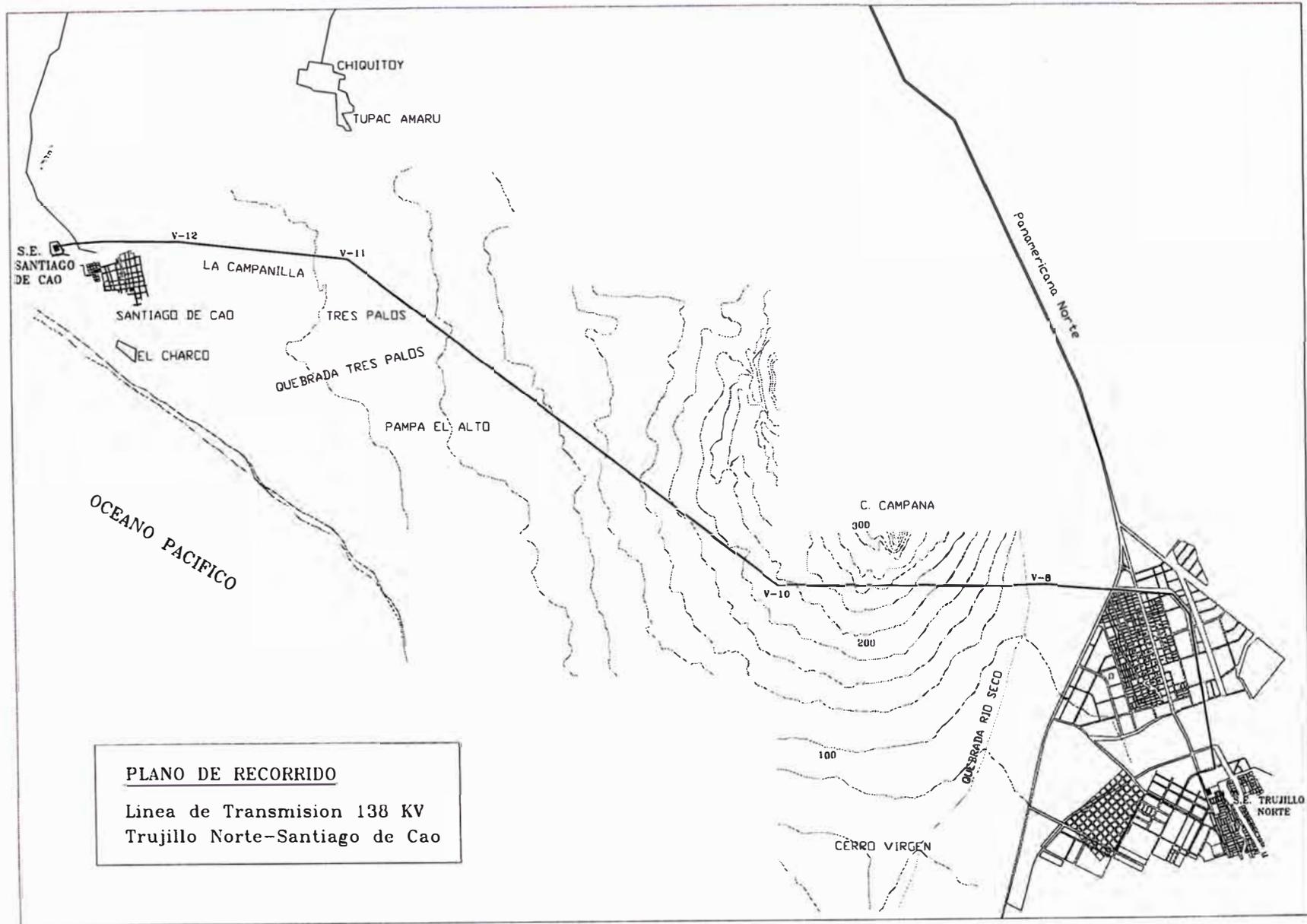
Se plantea la ecuación matricial $[V_p] = [X_p][\tilde{i}]$, las corrientes capacitivas son de valor conocido, por tanto efectuando se obtiene la solución para $[V_p]$ que es la diferencia de potencial entre los conductores y el punto P arbitrario, llamados también tensiones inducidas en P.

ANEXOS

ANEXO A

PERFIL DEL TRAZO DE TERRENO Y PLANO DE RECORRIDO DE LA L.T. TRUJILLO NORTE - SANTIAGO DE CAO





DEFLEXIONES DEL EJE LONGITUDINAL DE LA LINEA

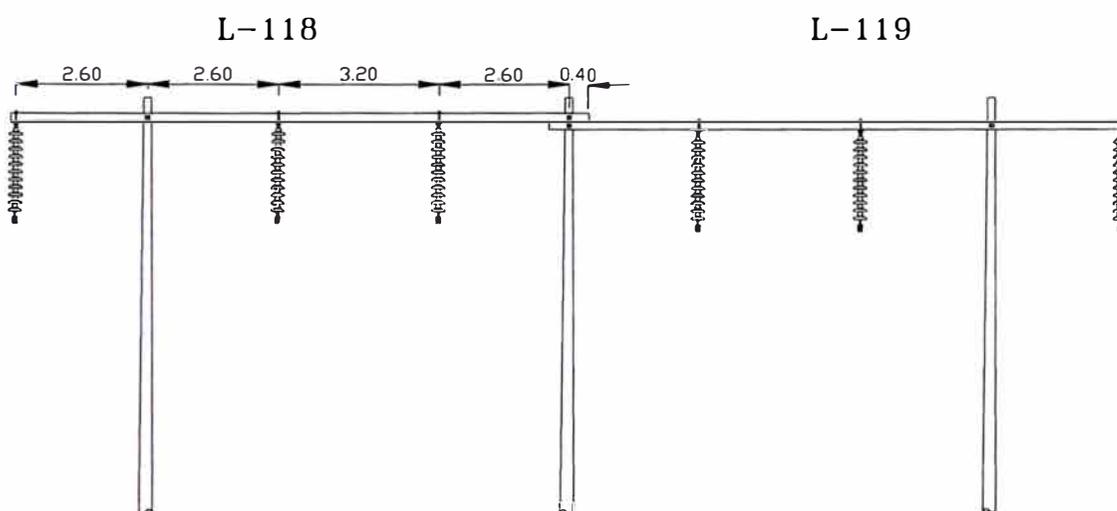
Estructura Nº - Tipo	Vértice Nº.	Progresiva (m)	ANGULO DE LINEA			
			°	'	“	sentido
1 - ZA 80	V-1	86.95	90	4	34	Der.
2 - ZA 80	V-2	353.57	89	11	37	Der.
4 - E1	V-3	879.33	84	38	49	Izq.
13 - E6	V-4	3762.35	30	53	56	Izq.
15 - E5	V-5	4240.08	45	14	6	Izq.
19 - E7	V-6	5260.16	2	27	9	Izq.
20 - E7	V-7	5628.96	1	47	33	Izq.
23 - E7	V-8	6636.13	6	26	24	Izq.
24 - E7	V-9	7165.73	2	15	38	Der.
38 - E5	V-10	11614.71	37	17	55	Der.
69 - E5	V-11	21635.83	30	54	7	Izq.
78 - E5	V-12	24785.46	5	8	38	Izq.
85 - E5	V-13	27013.16	27	45	22	Izq.
Pórtico		27136.98				

ANEXO B

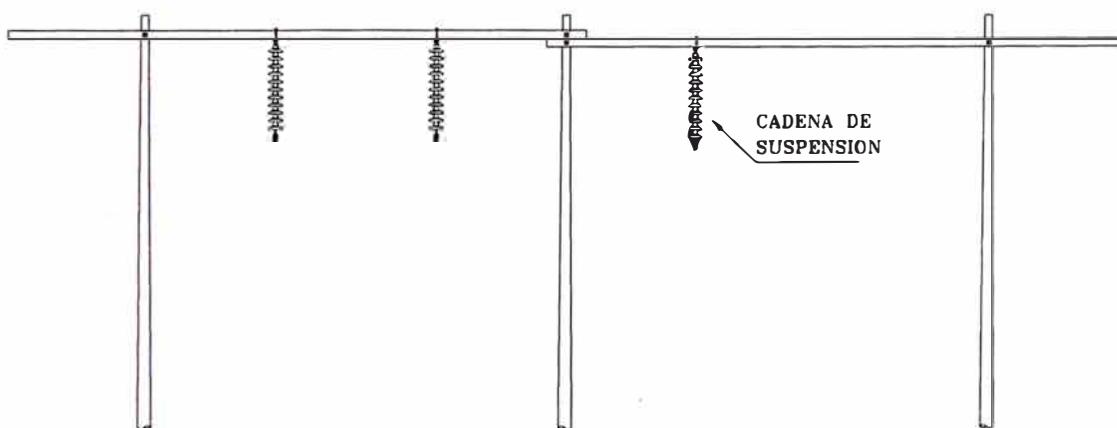
TIPOS DE ESTRUCTURA DE LA L.T. TRUJILLO NORTE - SANTIAGO DE CAO

ESTRUCTURA TIPO E7

SUSPENSION NORMAL EN ALINEAMIENTO 0° - 5°



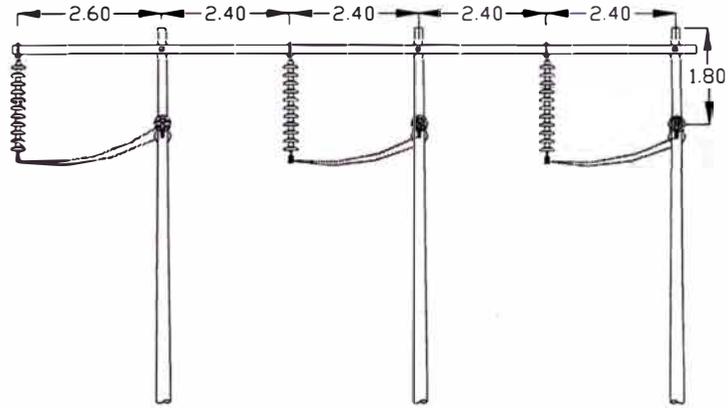
L-118 Rehabilitada



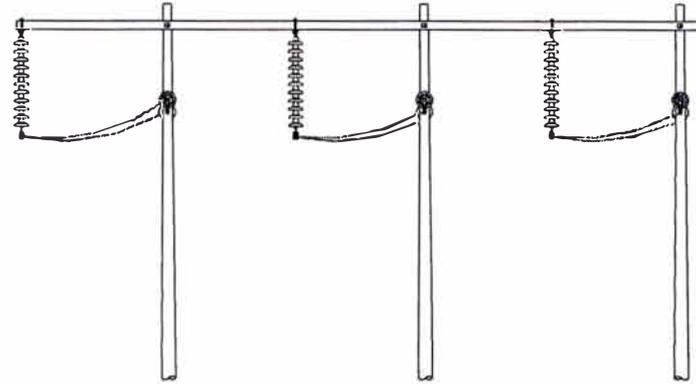
ESTRUCTURA TIPO E5

ANCLAJE-RETENCION Y ANGULAR

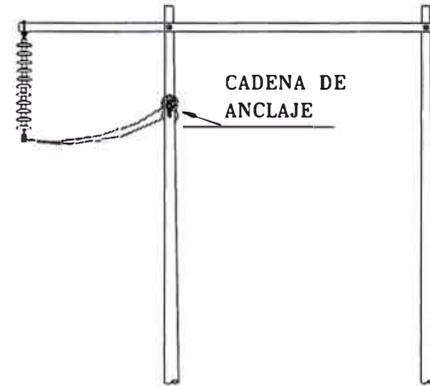
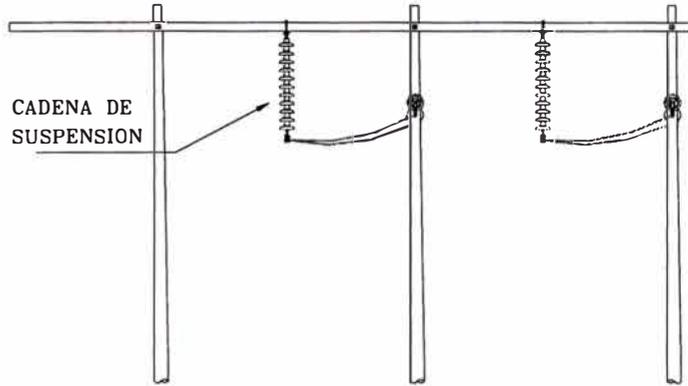
L-118



L-119

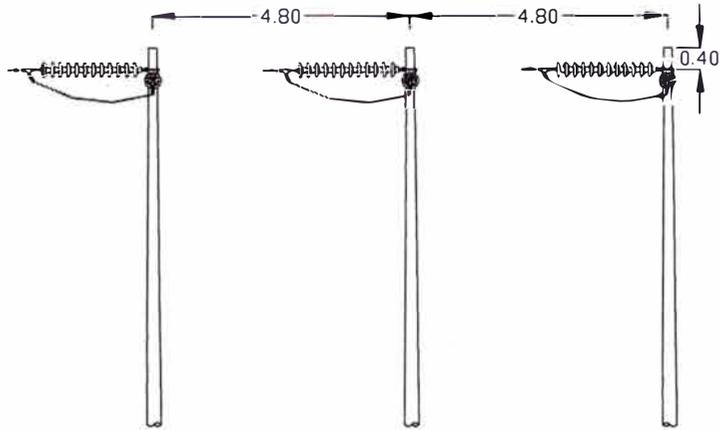


L-118 Rehabilitada

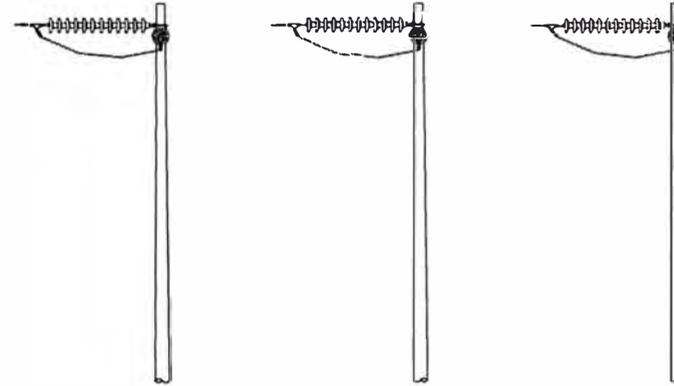


ESTRUCTURA TIPO E1
ANCLAJE ANGULAR RECTO

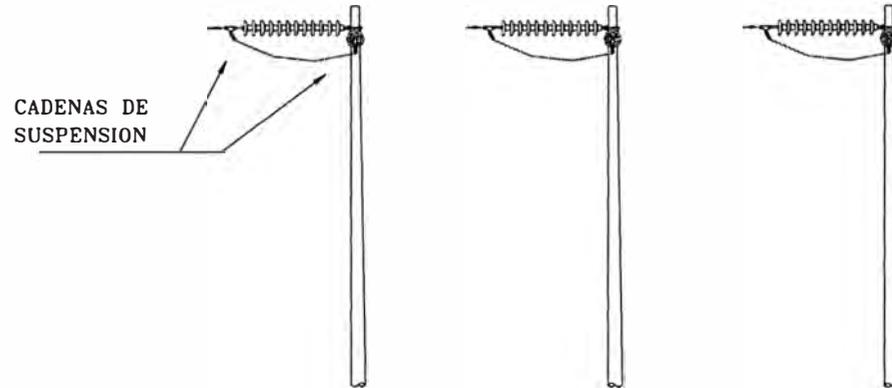
L-118



L-119



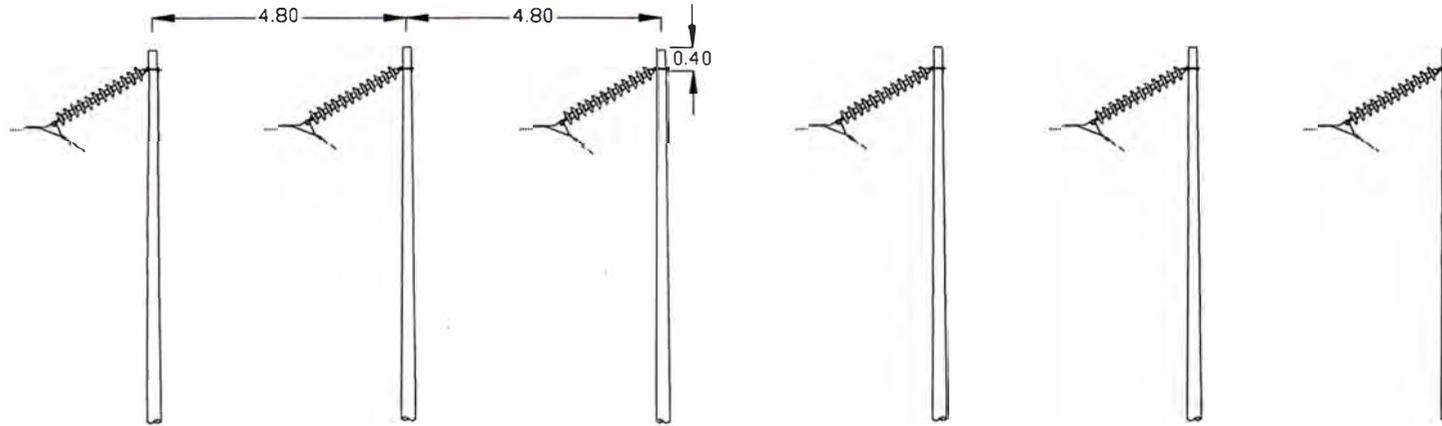
L-118 Rehabilitada



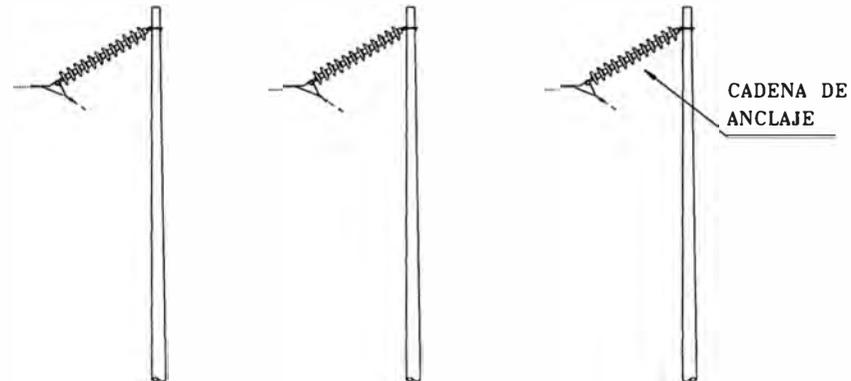
ESTRUCTURA TIPO E6
SUSPENSION ANGULAR

L-118

L-119



L-118 Rehabilitada



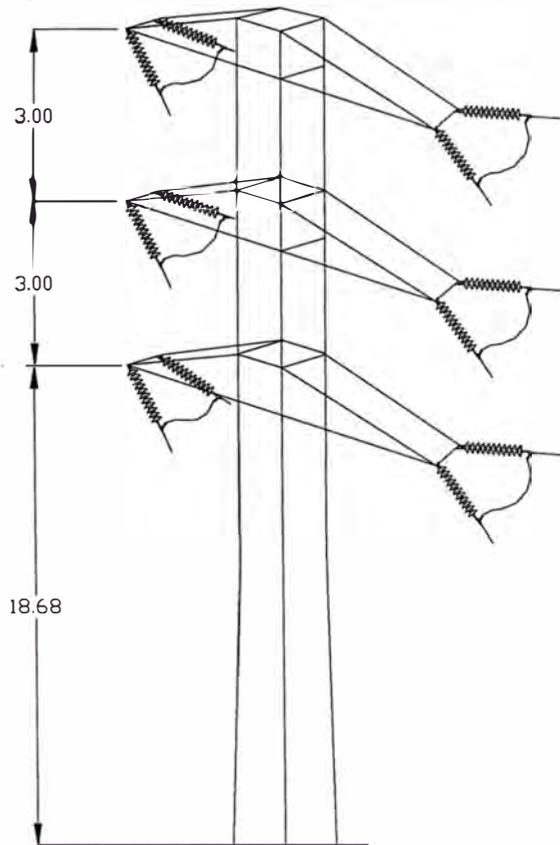
ESTRUCTURA TIPO ZA-80

TORRE METALICA DE ANCLAJE

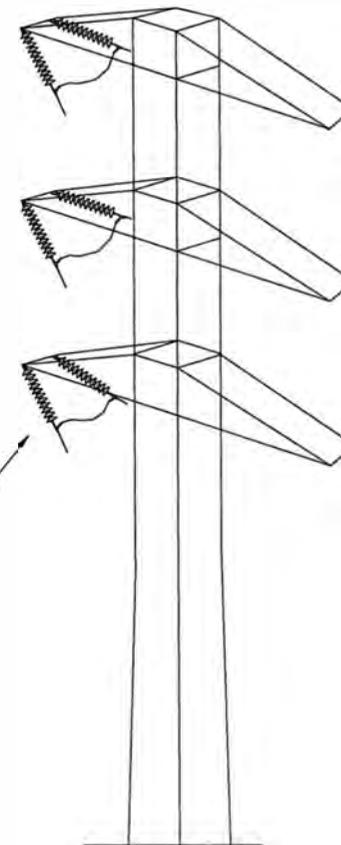
L-118

L-119

L-118 Rehabilitada



CADENA DE ANCLAJE



ANEXO C

CARACTERISTICAS TÉCNICAS DE LOS CONDUCTORES UTILIZADOS EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

TABLA DE DATOS TECNICOS			
CONDUCTOR DE ALEACION DE ALUMINIO ENGRASADO 240mm²			
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	
1	Fabricante		CABELUM
2	Procedencia		Venezuela
3	Norma de Fabricación		ASTM B398,B399
4	Material		Aleación de Aluminio
5	Tipo		AAAC (6201-T81)
6	Protección		Grasa Neutra
7	Sección Nominal (Equivalente)	mm ²	240
8	Sección Real	mm ²	236.038
9	Temperatura de Operación	°C	80
10	Número de Hilos		37
11	Diámetro cada Hilo	mm	2.85
12	Diámetro Nominal Exterior	mm	20.09
13	Radio efectivo	mm	7.715
14	Carga de Rotura	Kg	6,841
15	Peso	Kg/Km	656.76
16	Densidad a 20° C	gr/cm ³	2.7
17	Coeficiente de Dilatación a 20°C	1/°C	23 x 10 ⁻⁶
18	Coeficiente de Temperatura a 20° C	1/°C	0.0036
19	Resistencia eléctrica en C.C. a 20° C	Ohm/Km	0.1385
20	Cableado		Concentrico
	- Capa exterior		sentido derecho
	- Capas interiores		sentidos contrarios entre sí.
21	Norma de protección Grasa Neutra		ASTM D-127, NVG 175881
22	Referencia		Catalogo CABELUM

TABLA DE DATOS TECNICOS			
CONDUCTOR DE ALEACION DE ALUMINIO 185 mm² ENGRASADO			
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	
1	Fabricante		
2	Procedencia		
3	Norma de Fabricación		IEC 208 ASTM B398.227 ITINTEC 370.227
4	Material		Aleación de Aluminio
5	Tipo		AAAC (6201)
6	Protección		Grasa Neutra
7	Sección Nominal (Equivalente)	mm ²	185
8	Sección Real	mm ²	
9	Temperatura de Operación	°C	80
10	Número de Hilos		37
11	Diámetro cada Hilo	mm	2.52
12	Diámetro Nominal Exterior	mm	17.70
13	Radio efectivo	mm	6.797
14	Carga de Rotura	Kg	5,257
15	Peso	Kg/Km	510
16	Densidad a 20° C	gr/cm ³	2.7
17	Coeficiente de Dilatación a 20°C	1/°C	23 x 10 ⁻⁶
18	Coeficiente de Temperatura a 20° C	1/°C	0.0036
19	Resistencia eléctrica en C.C. a 20° C	Ohm/Km	0.1810
20	Cableado		Concéntrico
	- Capa exterior		sentido derecho
	- Capas interiores		sentidos contrarios entre sí.
21	Norma de protección Grasa Neutra		

TABLA DE DATOS TECNICOS			
CONDUCTOR DE COBRE DESNUDO TEMPLE BLANDO 35 mm²			
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	
1	Fabricante		
2	Procedencia		
3	Norma de Fabricación		NTP 370.042 ASTM B8
4	Material		Cobre
5	Temple		Blando (recocido)
6	Pureza	%	99.9
7	Sección Nominal	mm ²	35
8	Número de Hilos		7
9	Diámetro de cada hilo	mm	2.53
10	Diámetro nominal exterior	mm	7.60
11	Peso	Kg/Km	317
12	Densidad a 20° C	gr/cm ³	8.89
13	Temperatura de Operación	°C	75
14	Coeficiente de Dilatación a 20°C	1/°C	17x10 ⁻⁶
15	Coeficiente de Temperatura a 20°C	1/°C	0.00393
16	Resistividad Eléctrica a 20° C	Ohm mm ² /Km	17.241
17	Resistencia Eléctrica en CC a 20°C	Ohm/Km	0.524
18	Cableado		concéntrico en sentido de la mano izquierda
19	Paso del Cableado	mm	

TABLA DE DATOS TECNICOS			
CONDUCTOR COPPERWELD DE 7x10 AWG			
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	
1	Fabricante		INTELLI
2	Procedencia		Brasil
3	Norma de Fabricación		ASTM B228
4	Material		COPPERWELD
5	Diámetro nominal	Pulg.	0.306
6	Número de Hilos		7
7	Diámetro de cada hilo	Pulg.	0.102
8	Conductividad		
9	Mínimo esfuerzo de rotura	Lb.	9,196
10	Cableado		Concéntrico en sentido de la mano izquierda
11	Referencia - Catalogo		Coppersteel

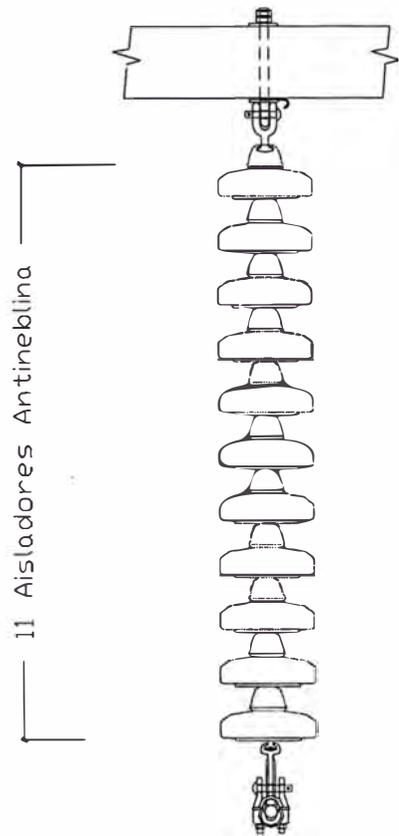
TABLA DE DATOS TECNICOS			
CABLE ALUMOWELD 7x9 AWG			
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	
1	Fabricante		IBRAP
2	Procedencia		Brasil
3	Norma de Fabricación		ASTM B-416
4	Material		ALUMOWELD
5	Diámetro nominal	mm (pulg.)	8.712 (0.343)
6	Número de Hilos		7
7	Diámetro de cada hilo	mm (pulg.)	2.896 (0.114)
8	Mínimo esfuerzo de rotura	Kg (Lb.)	5,740 (12,630)
9	Cableado		
10	Referencia - Catalogo		

ANEXO D

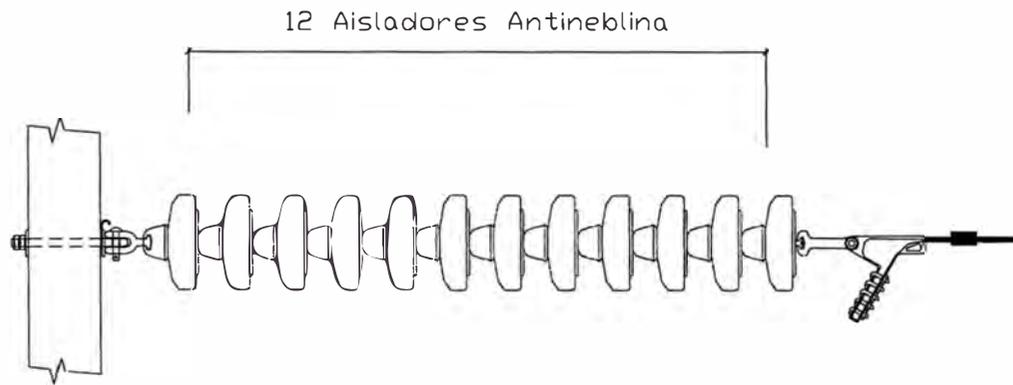
CARACTERISTICAS TECNICAS DEL AISLADOR ANTINEBLINA

TABLA DE DATOS TECNICOS			
AISLADOR ANTINEBLINA			
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	
1	Fabricante		Santana DI43C35 –ZN
2	Procedencia		Brasil
3	Norma de Fabricación		ANSI C29.2 IEC - 383 IEC - 120
4	Material aislante		Porcelana
5	Peso	Kg.	7.80
6	Altura	mm	146
7	Diámetro mínimo	mm	254
8	Distancia de fuga mínima	mm	432
9	Ruptura electromecánica combinada	KN	120
HERRAJES			
10	Material de los Herrajes		Acero Nodular
11	Norma de Galvanizado		ASTM-A153
12	Espesor mínimo de Galvanizado	µm	150
13	Tipo de ensamble		Casquillo - Bola
14	Material del Ánodo de sacrificio sobre el vástago		Zinc
CARACTERISTICAS ELECTRICAS			
15	Impulso critico positivo	KV	150
16	Impulso critico negativo	KV	160
17	Flameo a baja frecuencia - seco	KV	100
18	Flameo a baja frecuencia - humedo	KV	60
19	Perforación a baja frecuencia	KV	130

CADENA DE AISLADORES



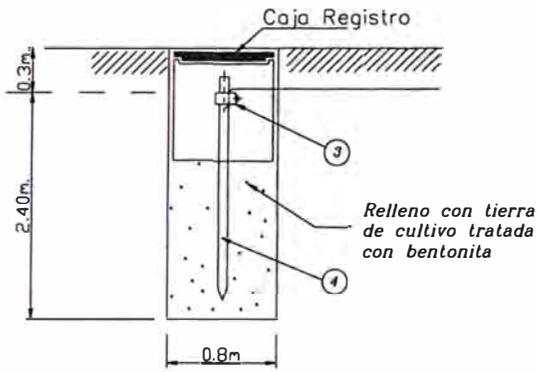
CADENA DE AISLADORES - TIPO SUSPENSION



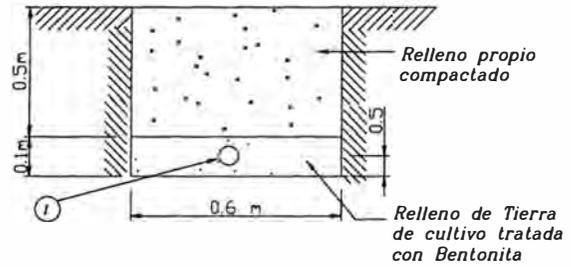
CADENA DE AISLADORES - TIPO ANCLAJE

ANEXO E

PUESTA A TIERRA

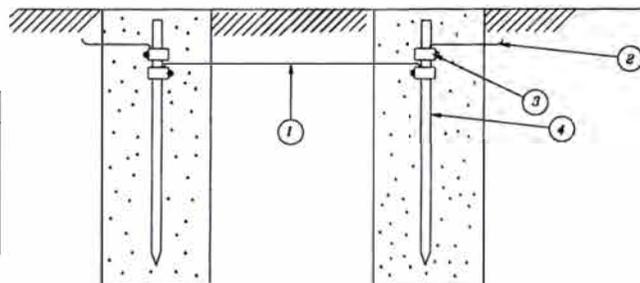


POZO DE TIERRA



INSTALACION DE CONTRAPESO

POS	CANT.	DESCRIPCION
4		Varilla tipo copperweld
3		Conector tipo AB
2		Conductor tipo copperweld
1		Conductor de Cu de 35 mm ²



CONEXION ENTRE VARILLAS

APLICACIONES Y MATERIALES DE CONFIGURACION DE PUESTA A TIERRA

Configuración	Aplicación	Conductor Cu.	Cond. Copperweld	Conector AB	Varilla
E7-1V	Terreno de cultivo	10m	(a)	-	1
E5-1V		16m		-	
E7-2V	Terreno Arenoso	16m	(a)	2	2
E5-2V		21.6m		2	
E7-4V	Arenal	40m	(a)	8	4
E5-4V		50m		8	
E1-4V		40m		8	

NOTA :

El conductor de bajada de línea de tierra del poste, se conecta directamente a la varilla mediante soldadura Cadweld.

(a) Variable con longitud de poste.

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

ESTRUC TURA N°	TIPO	CANT. VARILLAS	Resistencia (OHMS)
1	ZA	-	11,00
2	ZA	-	14,00
3	E5	2	5,70
4	E1	4	6,90
5	E7	2	18,00
6	E7	3	3,96
7	E7	3	8,90
8	E7	1	12,60
9	E7	1	13,80
10	E7	1	9,80
11	E7	1	12,12
12	E7	1	7,40
13	E6	2	9,50
14	E7	1	8,25
15	E5	2	3,20
16	E7	1	15,00
17	E7	1	8,80
18	E7	1	10,20
19	E7	1	8,90
20	E7	1	17,45
21	E7	1	15,22
22	E7	1	13,80
23	E7	4	6,60
24	E7	4	16,22
25	E7	4	10,22
26	E7	4	11,11
27	E5	4	11,31
28	E7	4	10,02
29	E7	4	8,35
30	E7	4	17,72
31	E7	4	15,68
32	E7	4	15,47
33	E7	4	9,02
34	E7	4	8,54
35	E7	4	9,50
36	E7	4	14,00
37	E7	4	13,04
38	E5	4	7,50
39	E7	4	9,78
40	E7	4	9,59
41	E7	4	9,50
42	E7	4	12,66
43	E7	4	8,48

ESTRUC TURA N°	TIPO	CANT. VARILLAS	Resistencia (OHMS)
44	E7	4	6,96
45	E7	4	7,37
46	E7	4	10,77
47	E7	4	12,06
48	E7	4	9,60
49	E7	4	11,00
50	E7	4	11,40
51	E7	4	15,41
52	E7	4	11,00
53	E7	4	14,20
54	E5	4	8,50
55	E7	4	8,70
56	E7	4	13,90
57	E7	4	12,40
58	E7	4	12,86
59	E7	4	18,00
60	E7	4	9,30
61	E7	4	15,00
62	E7	4	13,60
63	E7	4	14,45
64	E7	4	8,15
65	E7	4	7,68
66	E7	4	7,20
67	E7	2	6,05
68	E7	2	1,78
69	E5	2	1,25
70	E7	1	2,94
71	E7	1	1,62
72	E7	1	1,50
73	E7	1	2,73
74	E7	1	5,45
75	E7	1	2,15
76	E7	1	7,10
77	E7	1	2,28
78	E5	1	14,50
79	E7	1	2,58
80	E7	1	3,12
81	E7	1	2,48
82	E7	1	2,39
83	E7	1	1,47
84	E7	1	1,69
85	E5	1	9,91
Pórtico	-		

BIBLIOGRAFÍA

1. **Jacinto Viqueira Landa**, “Redes Eléctricas en Régimen Equilibrado”, Ed. Alfaomega S.A. de C.V. Mexico D.F., 1993.
2. **Luis Maria Checa**, “Líneas de Transporte de Energía”, Alfaomega Grupo Editor S.A., México 2000.
3. **Enríquez Harper Gilberto**, “Líneas de Transmisión y Redes de Distribución de Potencia Eléctrica”, Editorial Limusa, México 1986.
4. **Stevenson W. D.**, “Elements of Power System Analysis”, Mc Graw-Hill Book Company, 1982.
5. **H. Cotton**, “The Ttransmission and Distribution of Electrical Energy”, The English Universities Press Ltd, London 1963.
6. **George V. Mueller**, “Introduction to Electrical Engineering”, Third edition Mc Graw-Hill Book Company, INC. 1957.
7. **Electroporcelana Gamma S.A.**, “Aisladores de Distribución y Transmisión”, Catalogo C-913.1 versión 6, Sabaneta Colombia 1997.
8. **Indeco**, “INDECO El Valor de la Calidad”, CD Catálogo General, Lima - Perú 2004.