

73



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

CAMPUS ARAGÓN

**“IMPACTO SOCIO-AMBIENTAL EN LA PLANEACIÓN, DISEÑO  
Y CONSTRUCCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTO VOLTAJE”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO MECÁNICO  
ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A:**

**FILIBERTO ZAMORA SÁNCHEZ**

**ASESOR**

**ING. ABEL VERDE CRUZ**

275164



---

Bosques de Aragón, Estado de México, a 3 de marzo del 2 000



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## **AGRADECIMIENTOS:**

**A mis padres que cuidaron unas huellas por el violento desierto.**

Sra. Teresa Sánchez Correa.  
Sr. José Patrocinio Zamora Anaya.

**A la personita que venía del planeta tierra y domesticó un zorro.**

Eva Miriam Nava García.

**A mi asesor de tesis por su tiempo y su disposición.**

Ing. Abel Verde Cruz.

**A mis amigos y compañeros de trabajo, que hicieron tangible esta tesis.**

Arq. Ana María Cortes Carmona.  
Ing. Claudio Aibar Sánchez.  
M.C. Jesús Rubén Ramírez Guzmán.  
Ing. Luciano Ruiz Guerrero.  
Lic. Luz María Sánchez Sánchez.  
M.C. Raymundo Flores Moreno.

**A mis amigos de generación, sin importar su colaboración y apoyo.**

Alberto Salas García.  
Jorge Bernabé Pérez Foster.  
Juan Manuel Moreno Calderón.  
Marcela Ivette López Castro.  
Rogelio Edgar Zaragoza Delgado  
Víctor Luna Pérez.



**Al Instituto de Investigaciones Eléctricas por apoyarme en su programa de tesis de Licenciatura.**

Las respuestas a las interrogativas a lo largo de la vida se satisfacen con los triunfos y las derrotas, con las verdades y las mentiras, con la elección de un camino u el otro, con el diario trajinar, con la caída del sol, con el amor a la vida y a las personas.

Las búsquedas deberían encaminarse a encontrar el rayo de luz que ilumine el alma del hombre.

**Filiberto Zamora Sánchez.**

## A manera de prólogo.

Cruzando el Atlántico, cuando solo era un joven ingeniero de minas, Herbert Hoover compartió en el comedor una mesa y mucha conversación con una culta dama inglesa "Nos acercábamos a la Bahía de Nueva York y nos sirvieron el desayuno de despedida" -escribió Hoover en sus memorias- cuando volviéndose hacia mí, dijo: "Perdone mi curiosidad pero me encantaría saber... cual es su profesión" Hoveer replico con la mayor sencillez que se dedicaba a la ingeniería. Horrorizada la dama sé hecho hacia atrás y exclamó ¡Como! ¡Lo había tomado por un caballero!

En los últimos 200 años, los ingenieros han inventado infinidad de máquinas y conceptos, que son la base de nuestra actual civilización tecnológica.

Paradójicamente, esta profesión es de hombres prácticos, visionarios que sueñan en modos mejores de hacer el trabajo; se usa el ingenio creador para establecer un sistema nuevo del todo, o se aplica un método viejo en una forma nueva y llena de imaginación.

A veces la solución es simple: Por ejemplo un tema de tesis cualquiera desdeñado como chapucería... aunque con frecuencia las chapucerías del ingeniero alcanzan niveles de inspiración.

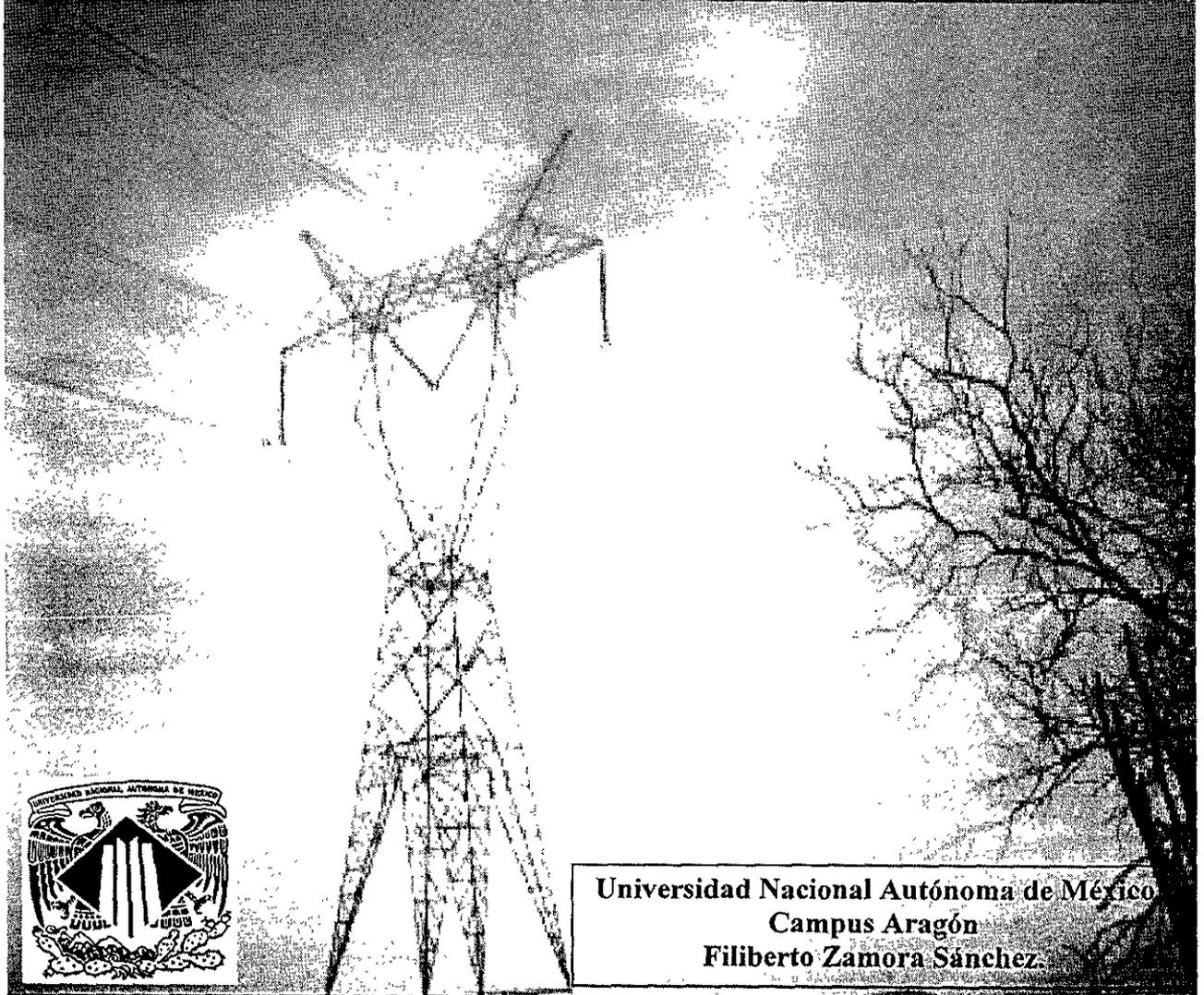
La elección de un tema de tesis es el reflejo académico y personal. Su elaboración es el inicio de la vida profesional y su presentación es la prueba de madurez analítica y pedagógica.

En lo particular, el creciente uso de la electricidad, que no obedece a ninguna de las viejas reglas de sentido común, fue el anuncio de la vieja ingeniería pragmática y precipitó la evolución del profesionista moderno, que no encaja en ningún molde absoluto: es científico, inventor, técnico, historiador, administrador, contador -y casi siempre especialista en una área-.

La presente investigación es un tema seleccionado por el papel tan importante que juega en nuestras vidas el sector eléctrico y muy en particular la conducción de energía desde los centros de generación hasta los centros de consumo a través de líneas de transmisión. Contemplando aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales. Por ende esta investigación es el resultado de combinar lo viejo y lo nuevo, la inventiva, la visión y la especialización en una área de la ingeniería eléctrica. Teniendo en cuenta el deseo de simplificar la información para que sirva como una fuente bibliográfica tanto de carácter técnico como social.

**Filiberto Zamora Sánchez.**

**IMPACTO SOCIO-AMBIENTAL EN LA  
PLANEACIÓN,  
DISEÑO Y  
CONSTRUCCIÓN  
DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTO VOLTAJE.**



**Universidad Nacional Autónoma de México  
Campus Aragón  
Filiberto Zamora Sánchez.**

**Índice de tablas** v

**Índice de figuras** vi

**Introducción** ix

**1 Conceptualización de las Líneas de Transmisión** 1

1.1 Planeación 5

1.2 Diseño 11

1.3 Construcción 20

Referencias 32

**2 Efectos Ambientales** 33

2.1 Derecho de vía 34

2.2 Campos electromagnéticos generados por líneas de transmisión  
61

2.3 Campo eléctrico 65

2.4 Campo magnético 73

2.5 Efectos sobre la salud de los campos electromagnéticos  
producidos por las líneas de transmisión 79

2.6 Ruido audible 90

Referencias 107

**CONTENIDO**

**3 Impacto Ambiental** 110

3.1 El sector eléctrico y la conceptualización ambiental 111

3.2 Políticas y acciones de protección ambiental 115

3.3 Antecedentes de los organismos reguladores en materia  
ambiental 117

3.4 Impacto ambiental 117

3.5 Procedimientos para la obtención de la autorización de impacto  
ambiental 119

3.6 Estudio de impacto ambiental 121

3.7 Estudio justificativo 124

3.8 Gestiones para obtener la autorización en materia de impacto  
ambiental 125

3.9 Resolución en materia de impacto ambiental 126

3.10 Costos ambientales 127

3.11 Evaluación del impacto ambiental en las etapas de un proyecto de  
líneas de transmisión 128

3.12 Alternativas técnicas en el diseño, construcción y mantenimiento  
de líneas de transmisión 131

Referencias 133

## ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | Título  |      |
|-------|---|------|
| 1.1   | Niveles de voltaje del sistema eléctrico nacional.  | 1    |
| 1.2   | Porcentajes de aseguramiento para materiales.   | 19   |
| 1.3   | Porcentajes de costos totales de los materiales en una línea de transmisión.                        | 27   |
| 1.4   | Principales características de los cables ASCR.   | 27   |
| 2.1   | Parámetros comúnmente empleados en la evaluación de la ruta potencial de una línea de transmisión.  | 38   |
| 2.2   | Separación horizontal mínima de conductores a edificios, construcciones y cualquier otro obstáculo. | 50   |
| 2.3   | Comparación de parámetros eléctricos y electromagnéticos.   | 65   |
| 2.4   | Rangos de los valores típicos de campos eléctrico y magnético.                                      | 82   |
| 2.5   | Valores medidos de campo eléctrico y magnético.   | 83   |
| 3.1   | Instancias internas de protección ambiental en el órgano encargado del sector eléctrico.            | 114  |
| 3.2   | Acciones de protección ambiental en proyectos eléctricos.   | 116. |

# ÍNDICE DE FIGURAS

| <b>Figura</b> | <b>Título</b>   |
|---------------|---|
| 1.1           | Sistema eléctrico de potencia. 2  |
| 1.2           | Línea de transmisión Aguascalientes Potencia – Calera II, torre de 400 kV, 1 circuito, 2 conductores por fase. 3  |
| 1.3           | Programa integral del proyecto de líneas de transmisión. 4  |
| 1.4           | Plano de localización general de trayectoria, línea de transmisión Lomas de Cocoyoc – Cuautla II, 115 kV, 2 circuitos, 1 conductor por fase. 8                                  |
| 1.5           | Plano de perfil y planta (levantamiento topografico), línea de transmisión Cañada entronque Aguascalientes Oriente – Calera II, 400 kV, 2 circuitos, 2 conductores por fase. 12 |
| 1.6           | Diseño electro-mecánico para líneas de transmisión (1.6a-1.6b). 14, 15  |
| 1.7           | Tipos de torres en la conducción de energía eléctrica. 16   |
| 1.8           | Línea de transmisión Hermosillo CC – Hermosillo IV, torre de transposición. 17  |
| 1.9           | Plantilla de localización de estructuras. 18  |
| 1.10          | Armado y nivelado del bottom panel. 22  |
| 1.11          | Armado del cuerpo superior de una torre de 115 kV, 1 circuito. 23   |
| 1.12          | Montaje pieza por pieza de una torre de suspensión de 115 kV, 1 circuito. 23  |
| 1.13          | Colocación de cadenas de aisladores. 24   |
| 1.14          | Tensado del cable de guarda. 26   |
| 1.15          | Maquinaria para el tendido de cables. 29  |
| 2.1           | Empleo de productos químicos para limpieza del derecho de vía, Terra Industries – Sioux city, Iowa, U.S.A.-. 35   |
| 2.2           | Derecho de vía. 41  |
| 2.3           | Silueta de la estructura 4M2. 43  |
| 2.4           | Ancho del derecho de vía. 51  |
| 2.5           | Consideraciones en la localización del derecho de vía, línea de transmisión Oaxaca Potencia – Oaxaca II. 51   |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 2.6  | Uso de postes para minimizar el impacto visual en líneas de transmisión, Thomas & Betts –Memphis, U.S.A.-. | 52  |
| 2.7  | Estructuras acondicionadas al terreno, Powerlink –Queensland’s, Australia-.                                | 54  |
| 2.8  | Manejo de la vegetación dentro del derecho de vía.   | 55  |
| 2.9  | Utilización de postes y uso adicional del derecho de vía.  | 60  |
| 2.10 | Campo eléctrico y magnético asociado a conductores de una línea de transmisión.                            | 61  |
| 2.11 | Sustitución del plano de tierra por un conductor ficticio.   | 69  |
| 2.12 | Sistema de n conductores sobre el suelo.   | 70  |
| 2.13 | Perfil lateral de campo eléctrico.   | 72  |
| 2.14 | Campo magnético en una línea de transmisión.   | 73  |
| 2.15 | Empleo de la profundidad de penetración compleja.  | 74  |
| 2.16 | Inducción electromagnética por líneas de transmisión.  | 79  |
| 2.17 | Fuentes de campos electromagnéticos.   | 81  |
| 2.18 | Campo eléctrico de una esfera cargada.   | 94  |
| 2.19 | Campo eléctrico de un alambre cargado.   | 94  |
| 2.20 | Dos conductores cilíndricos paralelos con cargas opuestas.   | 95  |
| 2.21 | Disposición de un solo conductor sobre tierra y su imagen.   | 96  |
| 2.22 | Distribución del gradiente de voltaje en la vecindad del conductor.  | 97  |
| 2.23 | Disposición de dos conductores sobre tierra y el efecto de sus imágenes.                                   | 98  |
| 2.24 | Disposición de dos conductores cilíndricos coaxiales.  | 98  |
| 2.25 | Distribución del gradiente para sistemas duales.   | 99  |
| 2.26 | Distribución del gradiente para el arreglo de dos conductores.   | 99  |
| 2.27 | Distribución del gradiente para un arreglo de dos conductores con $m = 1.2$ pulg.                          | 100 |
| 2.28 | Dos conductores paralelos aislados en el espacio libre.  | 100 |
| 2.29 | Carga lineal paralela al conductor.  | 103 |
| 2.30 | Representación de cargas concentradas en el interior de un conductor.                                      | 104 |

# INTRODUCCIÓN

Partiendo de la premisa de conducir energía eléctrica y de la importancia pretérita y contemporánea de los aspectos ambientales, sociales, técnicos y económicos en el sector eléctrico nacional y muy en específico en las líneas de transmisión de alto voltaje, la presente disertación escrita para la obtención del título de Ingeniero Mecánico Electricista esta sustentada en fuentes de primera mano y en la experiencia conjunta de los ingenieros del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE -Unidad de Líneas de Transmisión-) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE -Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación, CPTT-).

Con la necesidad de transmitir energía desde los centros de generación hasta los centros de consumo a través de líneas de transmisión, se encuentra implícita la labor de:

- Planear.
- Diseñar.
- Construir.

Estas etapas responden tanto al trabajo de gabinete como a la labor de campo, con una interpolación obligada. La planeación fija los alcances del proyecto; el diseño cumple con la función de la ingeniería de detalle, garantizando la perfectibilidad y funcionalidad del proyecto y la construcción se transforma en el elemento tangible de la conducción de energía. Todas estas etapas atienden a los aspectos ambientales, sociales y técnicos que rigen actualmente al sistema eléctrico nacional conceptualizándose así a las líneas de transmisión.

Se expondrán algunos de los efectos ambientales generados por las líneas de transmisión. Como por ejemplo del impacto ambiental y la importancia del derecho de vía en los proyectos de líneas de transmisión; de los campos eléctrico y magnético, su supuesta afectación a los seres vivos y las formulaciones matemáticas para su cálculo; de ruido audible producido por las líneas de transmisión se tratarán conceptos básicos y su formulación matemática.

Estos tópicos constituyen un tema selecto informativo referenciado a un estudio especializado, fundamentado en métodos numéricos y desarrollos matemáticos complejos.

Con lo que respecta al impacto ambiental en la década de los setenta empezaron a surgir las primeras normas ambientales en el mundo: con el paso de los años, estas se han vuelto más estrictas bajo el enfoque de la mejor tecnología. En México desde hace cinco años se está replanteando dicha orientación, destacando la implantación de políticas de prevención a largo plazo basadas en el cuidado de los ecosistemas, pero sin dejar a lado el uso de la tecnología. El objetivo de los estudios ambientales en líneas de transmisión es lograr la eficiencia de los instrumentos de regulación ambiental al menor costo económico, social y técnico. El tema ambiental persigue la vinculación de la capacidad de carga de los ecosistemas con las emisiones individuales de cada persona.

Hablar de impacto social es recapitular la transposición costumbrista del hombre ante la electrificación, desequilibrando las esferas económicas, tecnológicas y ambientales. La actuación de los individuos dentro de los lugares proyectados como óptimos para el paso de las líneas de transmisión son la raíz de ésta parte de la investigación.

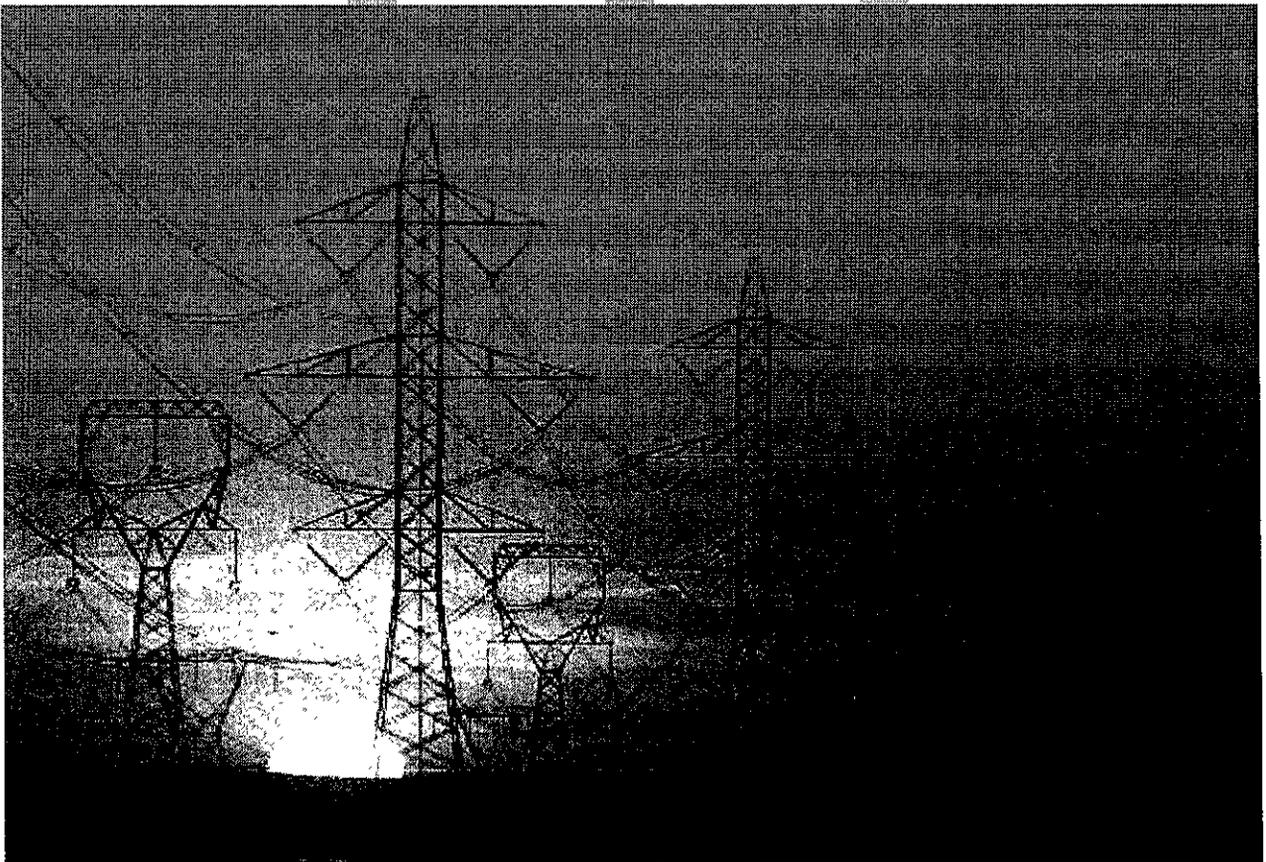
"La mayor parte de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas y, por regla general, pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos"

*Albert Einstein*

# CAPITULO 1

## Conceptualización de las Líneas de Transmisión

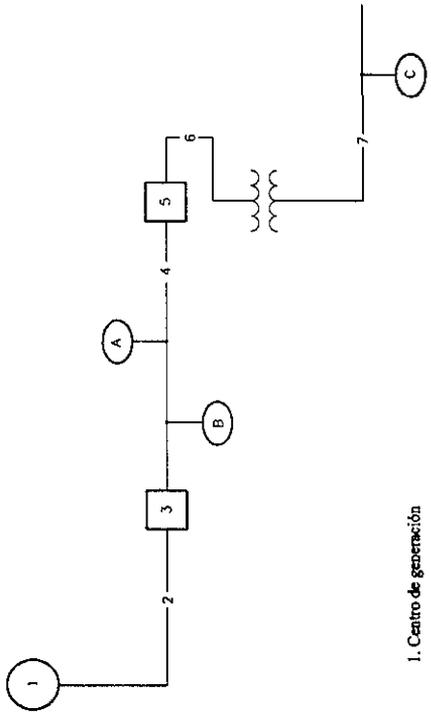
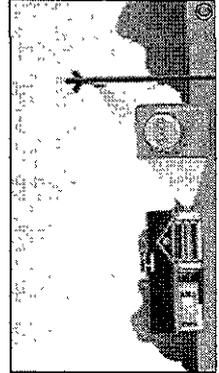
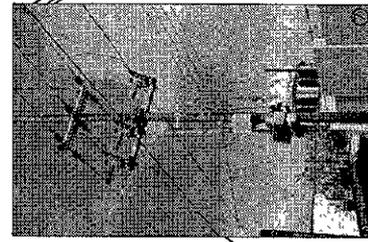
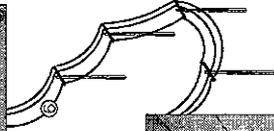
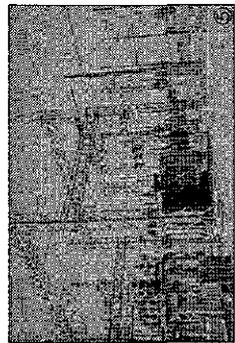
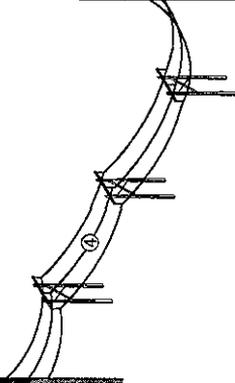
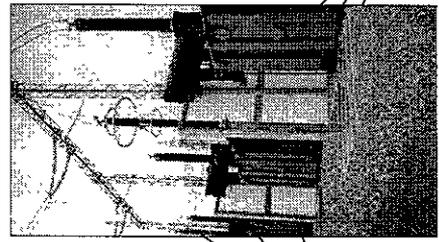
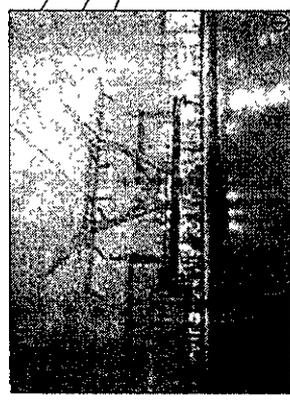
Las líneas de transmisión son parte de un sistema eléctrico de potencia, el cual es la interconexión de elementos eléctricos desde el centro de generación hasta los usuarios finales y su objetivo es el de suministrar continuamente la energía (figura 1.1).



Los niveles de voltaje en el sistema eléctrico de potencia en México son:

| Transmisión (kV) | Subtransmisión (kV) | Distribución (kV) |
|------------------|---------------------|-------------------|
| 400              | 85                  | 44                |
| 230              | 69                  | 34.5              |
| 161              |                     | 23                |
| 150              |                     | 13.8              |
| 138              |                     | 6                 |
| 115              |                     | 4.16              |
|                  |                     | 2.4               |

Tabla 1.1 Niveles de voltaje del sistema eléctrico nacional [1].



- 1. Centro de generación
- 2. Línea de transmisión
- 3. Subestación de transmisión
- 4. Línea de subtransmisión
- 5. Subestación de distribución
- 6. Línea de distribución
- 7. Sistema secundario de distribución
- A, B, C. Usuarios

|  |     |      |     |       |     |              |
|--|-----|------|-----|-------|-----|--------------|
| Conceptualización de las Líneas de Transmisión |     |      |     |       |     |              |
| Sistema eléctrico de potencia                  |     |      |     |       |     |              |
| FILIBERTO ZAMORA SÁNCHEZ                       |     |      |     |       |     |              |
| FIGURA No                                      | I.1 | ESC. | S/E | ACOT. | S/A | HOJA: 1 de 1 |

Las líneas de transmisión son los elementos de enlace entre las subestaciones eléctricas, su objetivo es el de transportar la energía eléctrica; se diseñan tomando en cuenta el volumen de energía a transmitir, la distancia entre sus extremos, el trazo geométrico, la naturaleza del terreno y el medio ambiente. Están constituidas básicamente, por estructuras que soportan a los conductores eléctricos, estas estructuras pueden ser de concreto o madera, postes troncoconicos o torres metálicas. Los conductores se sujetan mediante herrajes, aislados por cadenas de discos de porcelana, vidrio o materiales sintéticos; además, en la parte superior de la estructura, se instalan uno o dos cables de acero que comúnmente se denomina cable de guarda (sin o con fibra óptica)

que sirven como blindaje de protección contra descargas atmosféricas y en el caso de contar con fibra óptica como medio de comunicación.

Las fases para el proyecto de una línea de transmisión son:

- Planeación.
- Diseño.
- Construcción.

En estas fases la información es un compendio de formulismos técnicos aunados a la experiencia de ingenieros y técnicos del sector eléctrico en México.

La ejecución y la documentación de cada fase del proyecto siguen una normatividad dictaminada por los órganos pertinentes en materia de energía eléctrica, asuntos legales y por órganos encargados del medio ambiente.

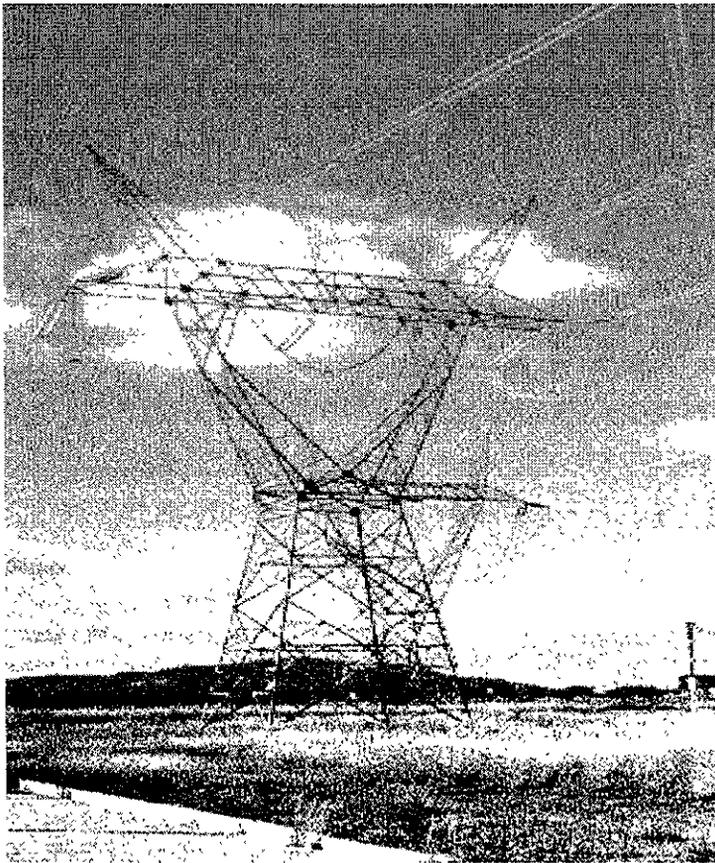


Figura 1.2 Línea de transmisión Aguascalientes Potencia – Calera II, torre de 400 kV, 1 circuito, 2 conductores por fase.

La fuente original de información para el proyecto de una línea de transmisión es el programa de obra e inversión del sector eléctrico (POISE), éste indica:

- La subestación de origen de la línea de transmisión.
- La subestación de destino.
- El voltaje de operación.
- Número de circuitos.
- Longitud aproximada.
- El cable conductor.
- Tipo de estructuras, y
- La fecha en que se requiere que esté lista para entrar en operación.

A partir de estos datos se elabora el programa integral del proyecto de líneas de transmisión (figura 1.3).

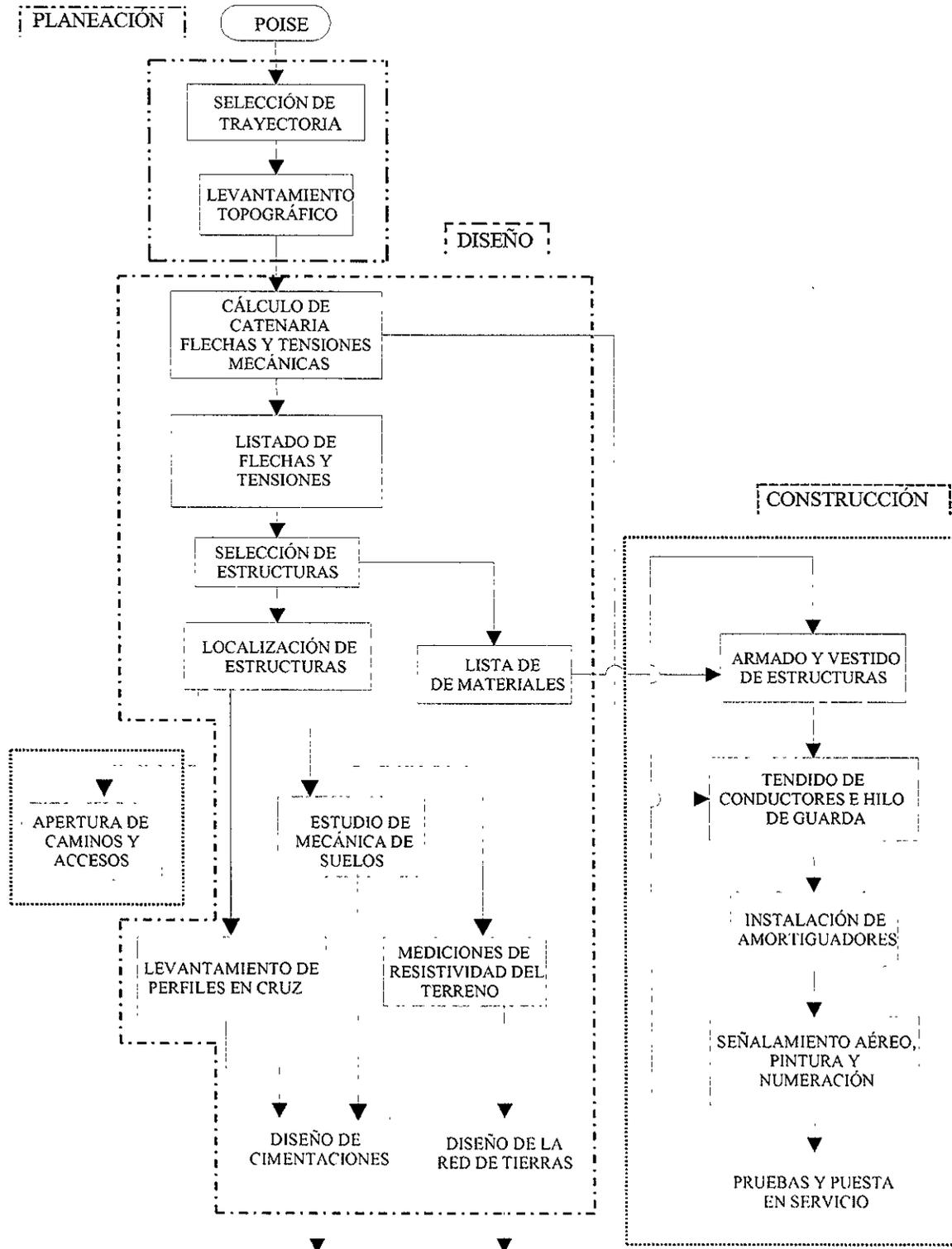


Figura 1. 3 Programa integral del proyecto de líneas de transmisión.

## 1.1 Planeación

Planear es formar una obra a través del estudio y la evaluación técnica, económica y socio-ambiental.

Las actividades que competen ha esta etapa son:

- Selección de trayectoria.
- Levantamiento topográfico.
  - Trazo de planta y configuración del perfil del terreno.

### 1.1.1 Selección de trayectoria

La selección de la ruta para la línea de transmisión es de suma importancia, puesto que es la base de un buen diseño; de la adecuada selección de trayectoria, depende la economía fundamental del proyecto y construcción, así como la operación confiable y el mínimo impacto ambiental.

Los criterios básicos para la evaluación de la ruta, dependen y varían de acuerdo a factores como:

- La tensión de la línea; menores de 230, 230 y 400 KV.
- La topografía predominante, considerando el tipo de terreno (plano, lomerío o montañoso).
- Las condiciones meteorológicas; precipitaciones pluviales, descargas atmosféricas, tormentas, tornados, masas de aire, ciclones.
- El uso de suelo; agrícola, pecuario, forestal, industrial, urbano, turístico.
- La vialidad de apoyo; autopistas, carreteras pavimentadas, terracerías, brechas.
- El tipo de asentamientos humanos y su probable expansión; ciudades, poblados rancherías, caserío aislado y asentamientos irregulares.
- El tipo de vegetación; desértica, pastizales, bosque, selva, manglar, palmares, cultivos, huertos.
- La factibilidad para adquirir el permiso de paso, y la protección ambiental; apeándose a la reglamentación en materia ecológica y ambiental (Ley General del Equilibrio Ecológico y la protección al Ambiente, asimismo a su Reglamento).

A su vez para la selección de la ruta se deben de considerar algunos preceptos como:

- La mejor longitud posible, basandonos en el principio geométrico de que la distancia más cercana entre dos puntos es la línea recta.
- El menor número de puntos de inflexión.
- Evitar el menor número de cruzamientos con líneas de transmisión, vías de ferrocarril, carreteras y ríos. Facilidad de construcción.
- Cercanía a carreteras y caminos de terracería para facilitar la construcción, revisión y mantenimiento, evitando con esto la creación de nuevos accesos que pudieran afectar la estabilidad de ecosistemas.
- Evitar el paso por bosques, huertas, zonas selváticas y agrícolas.

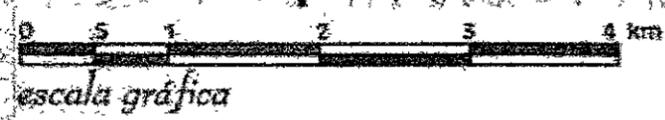
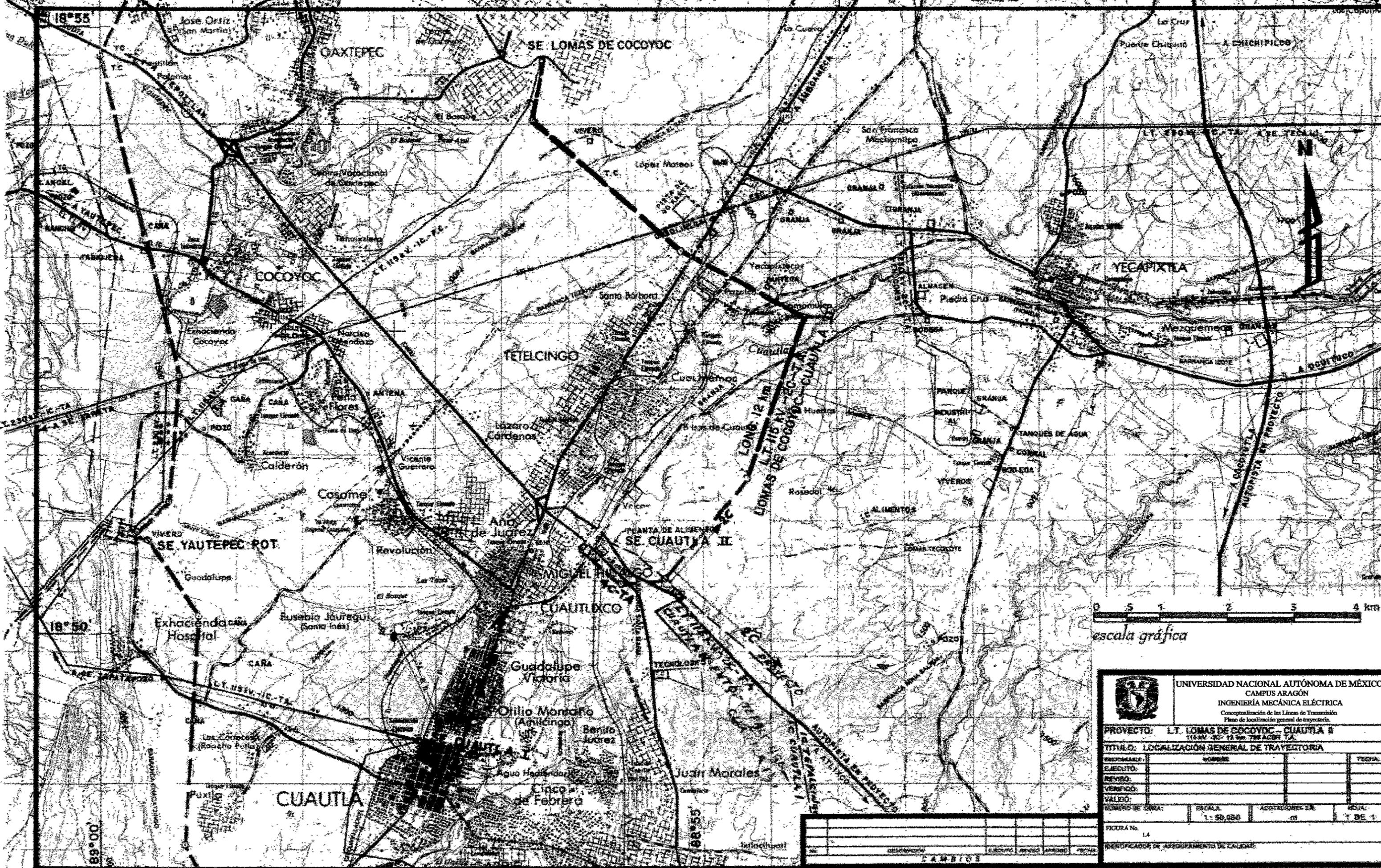
- Evitar lagunas, esteros, pantanos, ríos, zonas inundables y playas.
- Alejarse de la contaminación marina e industrial así como de terrenos erosionados o agresivos.
- Evitar pasar cerca de zonas turísticas, arqueológicas o de valor histórico y áreas naturales protegidas.
- Pasar lo más razonablemente alejado de núcleos de población.
- Y cumplir con todas las leyes, reglamentos y recomendaciones del Instituto nacional de Ecología, de la Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca en materia de protección ambiental, así como de los demás organismos Públicos, Federales, Estatales o Municipales; del mismo modo con el acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos, para la selección y preparación de sitios y trayectorias, construcción, operación y mantenimiento de líneas de transmisión.

Conjuntamente se realiza una inspección de campo para determinar la factibilidad de la trayectoria apoyandoce en la siguiente información:

- Cartas topográficas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).
- Planos de desarrollo urbano y planes directores.
- Reconocimiento de lugares estratégicos, estados, ciudades, poblados, rancherías, caseríos, etc.
- Posición física de las instalaciones eléctricas, en operación y futuras.
- Carreteras, vías de FF.CC., aeropuertos, presas, etc., operando y en proyecto.
- Desarrollos industriales, habitacionales y turísticos.
- Zonas de bosque, selva, pastizales, manglares , sembradíos de alto valor, etc.
- Areas naturales protegidas, como parques nacionales, reservas de la Biosfera, reservas especiales de la Biosfera, zonas arqueológicas, zonas de interés histórico.
- Zonas de contaminación marina, industrial o agrícola como la quema de caña.
- Zonas inundables o propensas a inundación.
- Vientos dominantes y algunos datos meteorológicos.
- Formación del plano general de trabajo y trazo de rutas opcionales, con base a la información obtenida.

El plano general de trabajo es la información recabada y registrada tanto en las actividades de gabinete como de campo. Dentro del plano general de trabajo es importante:

- Actualización en campo del plano de trabajo, registrando en él todas las nuevas obras de infraestructura y asentamientos humanos e industriales, así mismo las instalaciones eléctricas más importantes, realizando un levantamiento de todas las subestaciones eléctricas de la zona.
- Reconocimiento terrestre, en forma detallada, de todas las opciones de ruta consideradas y de las que surjan como factibles durante esta fase de estudio.
- Reconocimiento aéreo de las opciones de ruta, ya afinadas después del recorrido terrestre, principalmente cuando por las características físicas del terreno no sea posible el acceso terrestre.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 CAMPUS ARAGÓN  
 INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA  
 Conceptualización de las Líneas de Transmisión  
 Plano de localización general de trayectoria

PROYECTO: L.T. LOMAS DE COCOYOC - CUAUTLA II  
 115 KV - 20 - 12 km - 785 ACB T.A.

TÍTULO: LOCALIZACIÓN GENERAL DE TRAYECTORIA

| RESPONSABLE: | NOMBRE | FECHA: |
|--------------|--------|--------|
| EJECUTO:     |        |        |
| REVISÓ:      |        |        |
| VERIFICÓ:    |        |        |
| VALIÓ:       |        |        |

| NÚMERO DE COTAS: | ESCALA:  | ADJUSTADOR EN: | HOJA:  |
|------------------|----------|----------------|--------|
|                  | 1:50,000 | ms             | 1 DE 1 |

FIGURA No. 14

IDENTIFICADOR DE ASESORAMIENTO DE CALIDAD:

| AL: | ESTADÍSTICA: | ELABORADO: | REVISADO: | APROBADO: | FECHA: |
|-----|--------------|------------|-----------|-----------|--------|
|     |              |            |           |           |        |

Se levantará y dibujará cualquier elemento aunque no se cruce con la línea de transmisión, que este dentro de una franja de 50 m a cada lado del eje de la línea de transmisión.

Propiamente, el trazo se inicia con el reconocimiento preliminar del terreno.

En este recorrido se estudiarán:

- Los accesos a la línea de transmisión.
- Se fijaran los puntos de inflexión (PI), los puntos obligados, los puntos sobre tangente (PST).
- Los puntos de partida (0+000) y destino, que será el centro de los marcos de la estructura de subestaciones, en su defecto el centro del terreno o el punto más cercano al sitio probable de la subestación.
- Los cruzamientos con vías de comunicación, con líneas de transmisión, líneas de telégrafos, etc., los diversos tipos de vegetación las posibles fuentes de contaminación., etc.

En este reconocimiento generalmente surgen las primeras dudas y dificultades, que serán resueltas con algunas de las recomendaciones generales que a continuación se citan, en inteligencia de que ya fueron tomadas en cuenta en el estudio y evaluación de la trayectoria seleccionada, pero que pudiera ser útil para afinar la localización definitiva en el campo o por algún problema no previsto o que haya surgido después del estudio y que obligue a efectuar un cambio parcial de trayectoria.

Se deberá evitar que el trazo pase, hasta donde sea posible, por:

- Núcleos de población o construcciones, a menos de 50 m, salvo casos particulares como las áreas urbanas.
- Zonas con vestigios arqueológicos.
- Minas, bancos de material en explotación, polvorines.
- Terrenos agresivos o visiblemente erosionados o expuestos a corrientes fluviales.
- Desiertos, zonas de dunas o arenales fluviales.
- Bosques, selvas, huertas, zonas de contaminación natural o industrial.
- Zonas inundables o pantanosas.
- Pendientes del terreno excesivas y laderas deslizantes con terreno suelto.
- Siembras de alto costo.
- Cabeceras de aereopistas.

Los puntos de inflexión (PI) se harán en terreno sensiblemente plano o razonablemente alto, nunca en zonas bajas o cúspides de cerros, ni laderas muy pronunciadas.

Las tangentes serán lo más largo posible, siendo éstas lo más apropiadas para cruzar barrancas de gran claro.

El ángulo respecto al marco de la bahía de la subestación de origen, de ser posible, será de 90°, en ningún caso será menor de 75°. La estructura o torre de remate se proyecta entre 40 y 60 m, que puede ser un punto sobre tangente o bien un punto de inflexión, nunca mayor de 15°. La primera inflexión de cualquier grado, no será localiza a menos de 300 m en caso de torres de ser estructuras de madera o concreto esa distancia se recomienda entre 200 m y de 100 m en el caso de postes tubulares. El marco de la bahía de la subestación de destino, será el punto final de la línea debiéndose observar las mismas restricciones que en la subestación de origen.

Los cruzamientos con carreteras, ferrocarriles, canales, acueductos o ductos de Pemex se harán lo más cercano a los  $90^\circ$  y nunca menos a  $30^\circ$ .

Para los cruzamientos con líneas de transmisión existentes, como regla general debe considerarse que las líneas de mayor voltaje pasen sobre las de menor voltaje, considerando los siguientes lineamientos:

- Cuando la línea existente es de mayor voltaje, la línea de menor voltaje debe pasar por debajo, acercándose lo más posible a una torre del circuito de mayor voltaje.
- Cuando la línea existente es de menor voltaje, la línea de mayor voltaje debe pasar por arriba, procurando el paso por donde la flecha del conductor de menor voltaje es mayor.
- Cuando la líneas existente es del mismo voltaje, es preferible que por maniobras de construcción, la línea pase por debajo de la existente.

El ángulo de cruce ideal es  $90^\circ$ , no recomendándose uno menor de  $45^\circ$ .

No se localizarán puntos de inflexión a menos de 20 m fuera del límite del derecho de vía de carreteras, caminos de terracería, vías de FF.CC., canales, ductos de Pemex, etc.

Se levantan y registran en planos, además de los datos necesarios para poder dibujar la planta y el perfil del eje de la línea los siguiente puntos:

- Linderos de terrenos y su tipo.
- Ríos, arroyos, escurrimientos fluviales, canales.
- Lagunas, presas, zonas inundables, pantanos.
- Tipo y altura de construcciones.
- Tipos de vegetación, sembradíos, huertas, arboledas y sus alturas en el momento y máximas de crecimiento.
- Tipo y uso de terreno.

La localización definitiva del trazo, no podrá diferir de la trayectoria marcada en el plano general mas de 50 m hacia cualquier lado, con lo que será posible salvar los obstáculos no indicados en el plano, así como para llevar a cabo recomendaciones generales sobre posicionamientos de puntos de inflexión y tangentes.

Cuando el terreno presente una pendiente transversal al eje del trazo, en el sentido ascendente, será necesario que se levante con precisión y se registre en los planos de planta y perfil, un perfil lateral (paralelo). Tal caso se presenta comúnmente cuando la línea se traza por calles o pasa cerca de construcciones aisladas o también cerca de una arboleda.

Todos los datos observados y medidos para realizar el levantamiento topográfico deberán registrarse.

Los registros contienen todos los datos necesarios, claros y precisos, para que elaborar los planos de perfil y planta.

El registro se hará por línea de transmisión, anotando sus características. Estos registros normalmente se entregarán conjuntamente con los planos de perfil y planta, ya que ellos serán el apoyo numérico de la revisión que deberá efectuarse a dichos planos.

### 1.1.2.1 Trazo de planta y configuración del perfil del terreno

La planta general o de conjunto del perfil topográfico levantado, se dibujará, con exactitud, en el plano de localización general de trayectoria, mismo sobre el que se marca la trayectoria preliminar de la línea.

La poligonal que representa la planta del perfil topográfico de la línea de transmisión está relacionada con las subestaciones de origen y destino y con todos los accidentes naturales u obras de infraestructura existentes, *adicionando todas aquellas que no hayan estado marcadas en el plano.*

Los puntos de inflexión de la poligonal se les denominará con el número progresivo correspondiente, incluyendo los datos principales de esos puntos, resumidos en un cuadro de datos.

Los planos de perfil y planta (figura 1.5) son el resultado del levantamiento topográfico elaborados en un formato de 1.20 x .90 m de material resistente e indeformable con cuadrícula milimétrica.

El rumbo astronómico de cada deflexión deberá aparecer en cada una de las hojas del plano de perfil y planta.

Al dibujar el perfil, se tendrá en cuenta que sobre éste se proyectará las estructuras, postes o torres incluyendo al conductor más bajo que las une; por lo tanto, el espacio libre que deberá haber entre el punto más prominente del perfil y la parte inferior de la planta, será como mínimo de 25 m según la escala vertical que se utilice.

Los propios planos de perfil, contendrán el dibujo en planta, a una escala que sea objetiva, se incluirán croquis de salida y llegada de las líneas de transmisión a las subestaciones, en los que también se indican:

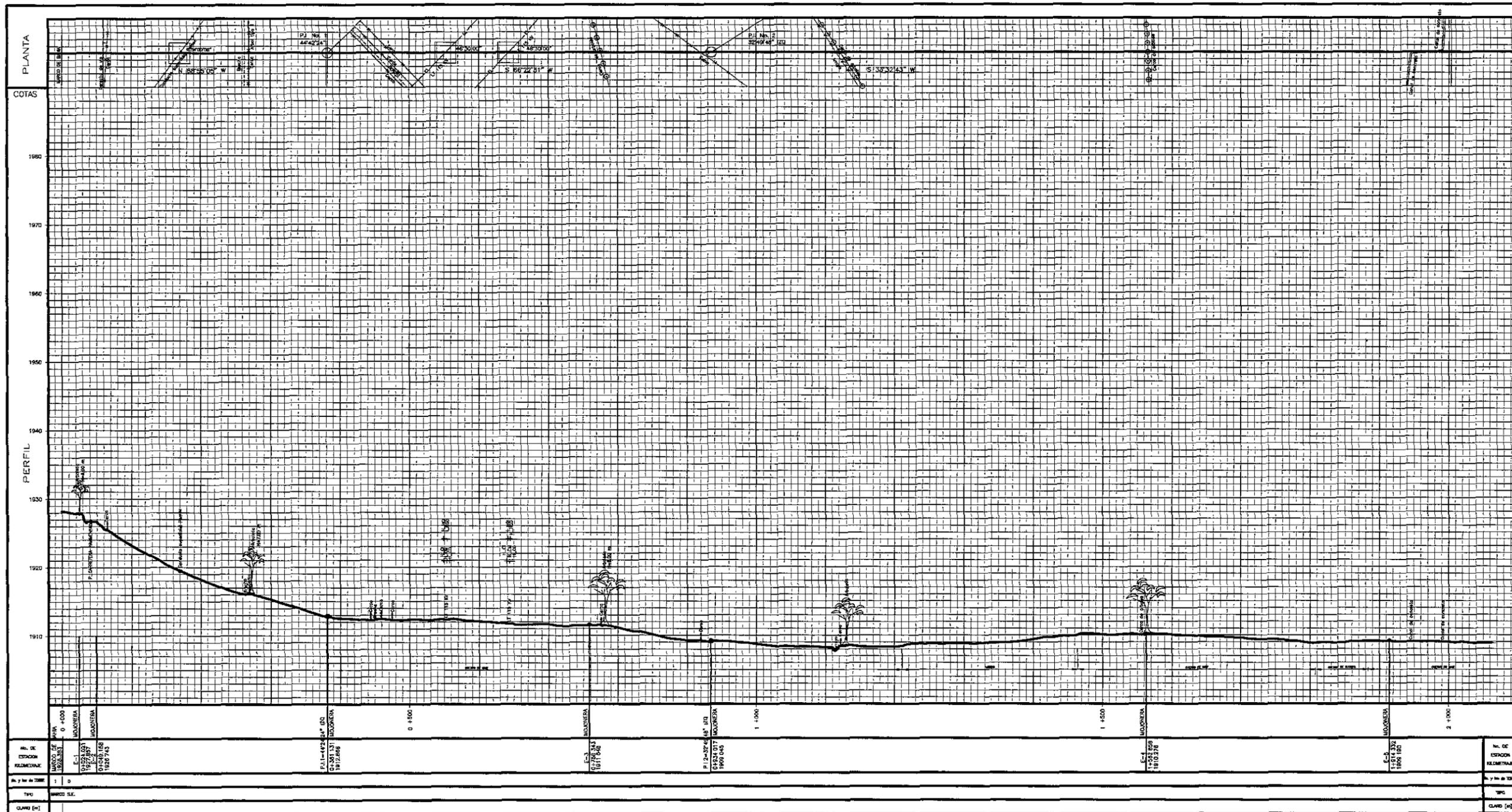
- Linderos del predio de las subestaciones y cercas aledañas.
- Estructuras principales de las subestaciones dentro de las cuales se encuentra el marco de salida o llegada de la línea en proceso de trazo.
- Postes, estructuras o torres de remate de las líneas de energía eléctrica que salgan o lleguen a las subestaciones.
- Carreteras, caminos, vías de ferrocarril y ductos adjuntos a las subestaciones, con sus respectivos destinos.

En caso de que durante el levantamiento topográfico se presente algún problema no previsto en el estudio o que haya surgido después de éste, y que obligue a un cambio sustancial en la trayectoria, será necesario que el responsable del trazo levante el obstáculo y / o informe del problema, presentando alternativas para que sean analizadas y evaluadas.

## 1.2 Diseño

En esta fase a partir del plano de localización general de trayectoria y del los planos de planta y perfil se analiza y se estructura el proyecto.

Para el diseño de una línea de transmisión es necesario contar con información de entrada. El voltaje de la línea de transmisión, su altitud sobre el nivel del mar, las velocidades de viento a



ESCALAS:  
 VERTICAL 1:200  
 HORIZONTAL 1:2000

PERFIL LATERAL A 25 m

- SIMBOLOGIA**
- CARRETERA PAVIMENTADA
  - CAMINO DE TERRACERA
  - BRECHA
  - CERCAS, BARRAS Y DIVISIONES
  - VIA DE FERROCARRIL
  - LINEA DE TRANSMISION
  - LINEA DE DISTRIBUCION
  - LINEA DE TELEGRAFOS
  - LINEA DE TELEFONOS
  - CONDUCTO SUPERFICIAL
  - CONDUCTO SUBTERRANEO
  - ARROYO PERMANENTE
  - ARROYO INTERMITENTE
  - MSD HILO DE GUARDA DERECHA
  - MIZ HILO DE GUARDA IZQUIERDA
  - CD CONDUCTOR DERECHO
  - CM CONDUCTOR MEDIO
  - CI CONDUCTOR IZQUIERDO

|   |                    |                                 |                          |
|---|--------------------|---------------------------------|--------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO               | CAMPUS AERONAUTICA | INGENIERIA MECANICA ELECTRONICA | FILIBERTO ZAMORA SANCHEZ |
| Conceptualización de las Líneas de Transmisión        |                    |                                 |                          |
| Plano de perfil y planta (levantamiento topográfico). |                    |                                 |                          |
| LT. CANCHA ENTRONQUE AZUL ORIENTE - CANCHA B          |                    |                                 |                          |
| 400 M. - 20 - 8400000 N - 1113 0000 E - T.M. C.T.     |                    |                                 |                          |
| TITULO TOPOGRAFIA                                     |                    |                                 |                          |
| ESTADO  | CIUDAD             | FECHA                           | HOJA                     |
|   |                    |                                 |                          |
| TITULO: PLANTA Y PERFIL                               |                    |                                 |                          |
| ESTADO  | CIUDAD             | FECHA                           | HOJA                     |
|   |                    |                                 |                          |
| TITULO: PROYECTO                                      |                    |                                 |                          |
| ESTADO  | CIUDAD             | FECHA                           | HOJA                     |
|   |                    |                                 |                          |
| ESTADO DE OBRAS                                       | ESCALA             | PROYECTADO EN METROS            | HOJA 1 DE 4              |
|   |                    |                                 |                          |
| ESCALA 1:5  |                    |                                 |                          |
| REPRODUCIR DE ACUERDO A LA OBRAS                      |                    |                                 |                          |

considerar en el diseño electromecánico, tanto para determinar el uso de las estructuras como las condiciones de trabajo de los cables, estas velocidades usualmente corresponden a periodos de retorno de 10 y 50 años, aunque también se utilizan velocidades con retorno de 100 y 200 años. Se obtienen datos de temperatura dominantes máximas y mínimas, así como de los días de lluvia y la presencia de hielo, información necesaria para determinar las condiciones de trabajo de cables conductores y estructuras. Así mismo se obtienen datos de densidad de rayos a tierra sobre la trayectoria de la línea e información sobre el nivel y tipo de contaminación en el ambiente de la trayectoria. La información sobre densidad de rayos y contaminación son necesarios para efectuar los estudios de coordinación de aislamiento que permiten determinar el tipo de estructuras en cuanto a su dimensionamiento y el tipo de aislamiento que se usará en la línea.

Con la información del voltaje de operación, con la lista de estructuras normalizadas la altitud de la línea y el estudio de coordinación de aislamiento, se determina cuales son los tipos de estructuras básicas que se utilizarán en el proyecto.

Los datos del cable a emplear se obtienen del catálogo del fabricante, mismos que se requieren para efectuar los cálculos de los parámetros y de las catenarias que se usarán durante el proceso de localización de estructuras y posteriormente en el cálculo de flechas y tensiones mecánicas para el tendido y tensado de cables conductores y cable de guarda sin o con fibra óptica.

Entre los datos más importantes de los cables que se requieren para el proyecto de la línea de transmisión están los siguientes:

- Tensión mecánica máxima de ruptura.
- Diámetro en mm.
- Área:
  - Total en mm<sup>2</sup>.
  - De aluminio en mm<sup>2</sup>.
- Masa en kg.
- Módulo de elasticidad lineal:
  - Inicial en kg/mm<sup>2</sup>.
  - Final en kg/mm<sup>2</sup>.
- Coeficiente de dilatación:
  - Inicial °C.
  - Final °C.

Estos mismos datos también se requieren para el cable de guarda.

En la parte del diseño se mencionan las actividades eléctricas y mecánicas (figuras 1.6a y 1.6b) de las líneas de transmisión, sin haber tocado el aspecto matemático de éstas, por considerar que correspondería a un análisis más profundo.

Por ejemplo al seleccionarse los conductores para la línea, se deben de tomar en consideración las propiedades eléctricas y mecánicas del conductor, incluyendo su resistencia a la ruptura, peso, construcción, método de instalación, fatiga mecánica, pérdida de potencia, caída de voltaje, efecto corona, radio-interferencia y costo.

El diseño comprende a la ingeniería de detalle del proyecto, que con una buena selección de las condiciones ambientales y técnicas son la base de una línea de transmisión de comportamiento confiable.

La información de entrada obtenida se emplea para efectuar los trabajos iniciales de diseño:

- Selección de estructuras.
- Localización de estructuras.
- Listado de material y equipo.
- Listado de flechas y tensiones.
- Determinación de extensiones.
- Sistema de tierras y protección.

### DISEÑO MECÁNICO BÁSICO

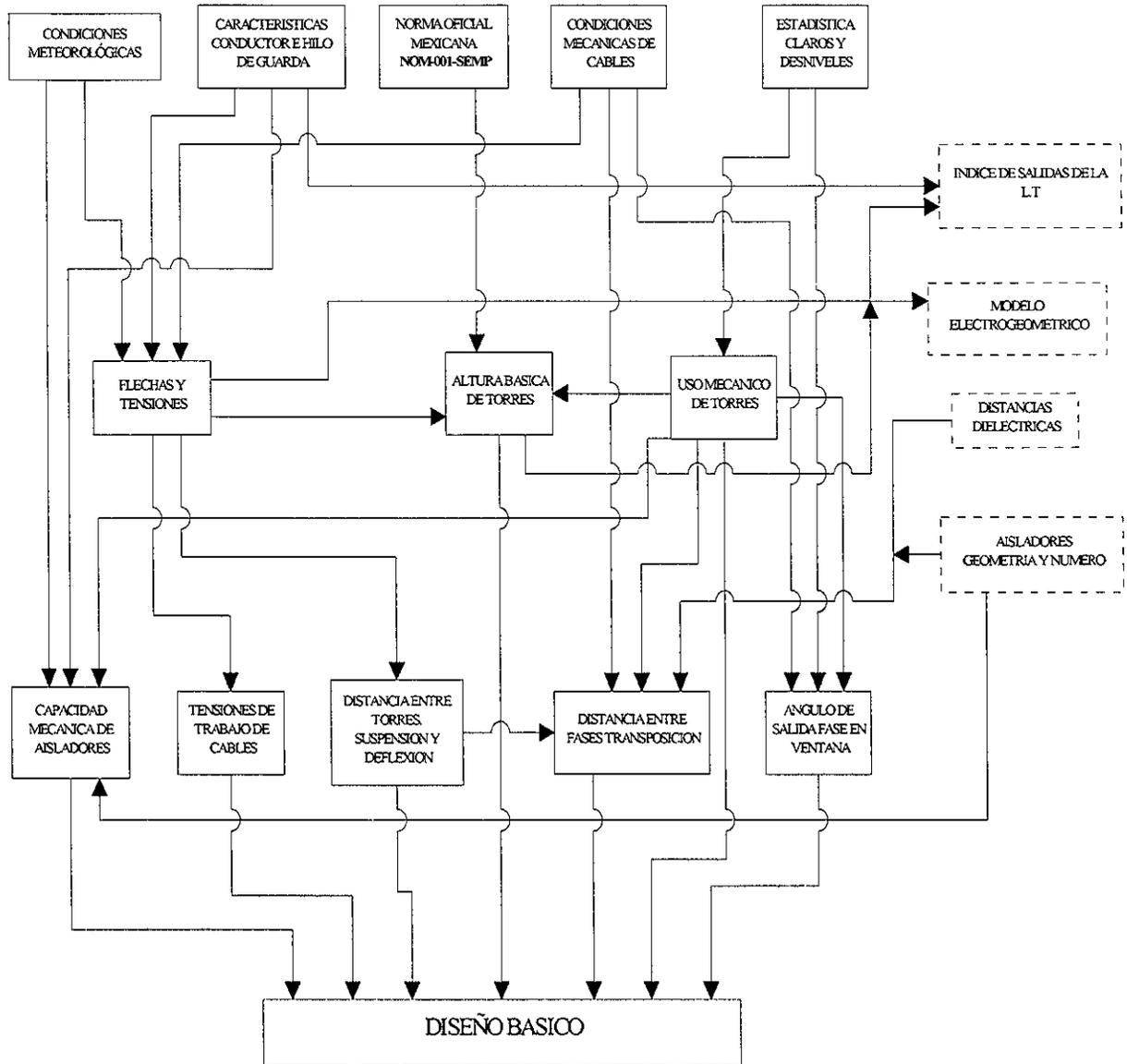


Figura 1.6a Diseño mecánico básico

Hoy en día el diseño de líneas de transmisión se efectúa a través de software capaz de:

- Localizar estructuras.
- Generar reportes.
- Proporcionar planos de perfil y planta.

Además de la optimización de los recursos del proyecto.

### DISEÑO ELECTRICO BASICO

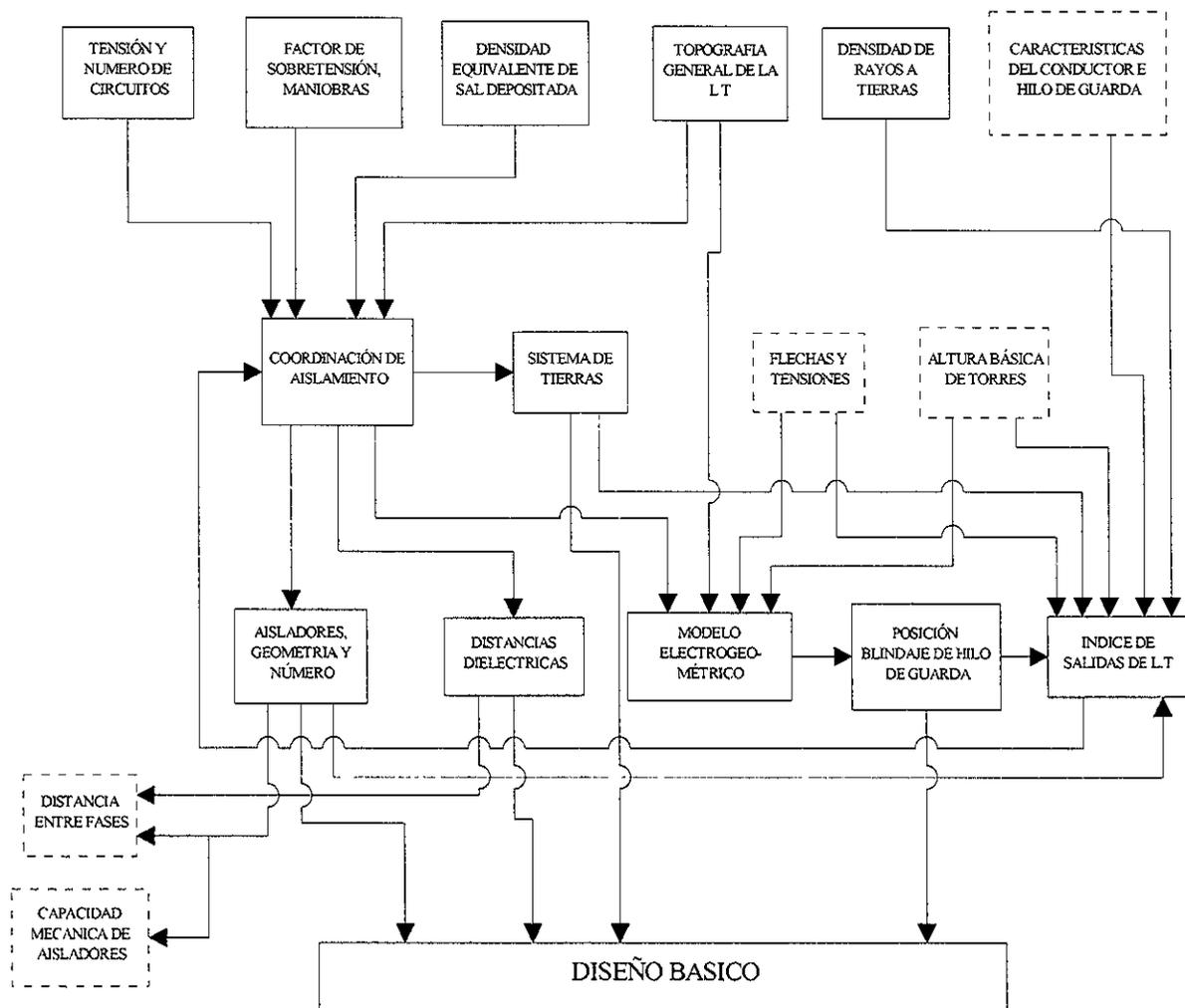


Figura 1.6b Diseño eléctrico básico

Figura 1.6 Diseño electro-mecánico para líneas de transmisión (1.6a -1.6b).

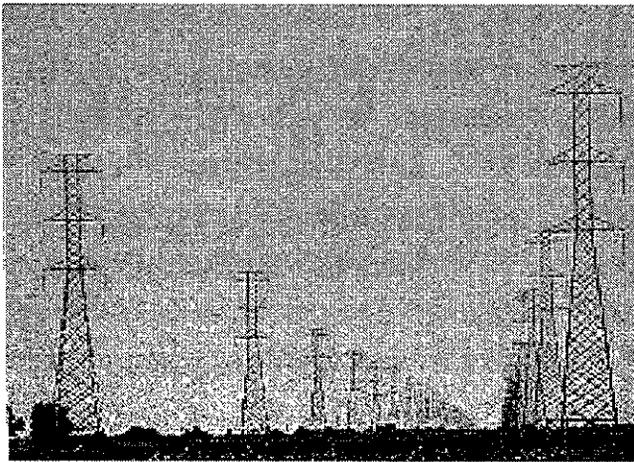
### 1.2.1 Selección de estructuras

A partir de la información estadística de claros horizontales, verticales y deflexiones del proyecto de la línea de transmisión en cuestión, es posible definir los rangos de uso de los diferentes tipos de estructuras.

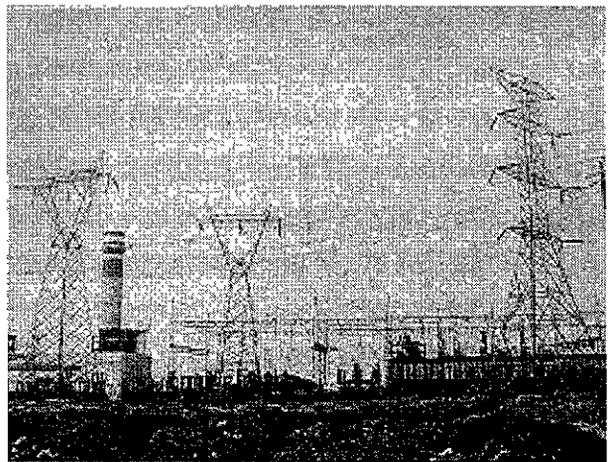
Esto sin embargo presenta aspectos fundamentales de carácter económico, ya que por una parte decidir una gran variedad de tipos de torres que cubra diversas solicitaciones conduce a optimizar el tonelaje de éstas y el volumen de cimentaciones, pero por otra parte, eleva los costos de pruebas prototipo, tiempos de fabricación, áreas de almacenaje y complica el control de los materiales.

Por el contrario, un reducido número de tipos de estructuras conduce a obtener torres y cimentaciones más robustas, que inciden en el incremento de los costos de materiales, su transporte y montaje.

Los cuatro tipos de estructuras básicas para la conducción de alto voltaje en todo el territorio nacional son las de suspensión, deflexión, remate y transposición.



Torres de suspensión, Cerro Prieto, Baja California.



Torres de remate, Central Termoeléctrica, Benito Juárez, Rosarito.

Figura 1.7 Tipos de torres en la conducción de energía eléctrica [2].

Las torres de suspensión son de las más comunes. Se puede identificar porque las cadenas de aisladores están en posición vertical y únicamente tienen la función de sostener los cables de alta voltaje.

Las torres de deflexión sirven para cambiar el ángulo de la línea de transmisión. Para su diseño y cimentación se calculan los esfuerzos transversales, horizontales y verticales de los conductores, más los originados por el viento, elasticidad, dilatación o rotura del cable, así como los grados de deflexión. Las cadenas de aisladores se encuentran en posición horizontal.

Las torres de remate se pueden distinguir por tener las cadenas de aisladores en posición horizontal. Se encuentran al inicio y al final de línea de transmisión; su finalidad es resistir la carga y el tirón de los cables. En algunas ocasiones después de un determinado número de torres de suspensión se instala otra de remate (torres de tensión o de amarre), con el propósito de tener puntos fijos que absorban toda la tensión mecánica y el peso acumulado de los conductores o rotura de los mismos.

Las torres de transposición se instalan en líneas mayores a 100 km, a un  $1/6$ ,  $1/2$  y  $5/6$  de la longitud total de la línea de transmisión. Son usadas para cambiar la posición de las fases del circuito, con el propósito de aminorar las pérdidas de voltaje a causa de fenómenos eléctricos que se presentan en las líneas de transmisión.

### 1.2.2 Localización de estructuras

Esta es la etapa del diseño que más influye en el costo de la línea de transmisión. Al realizar esta actividad es necesario lograr la ubicación óptima de las estructuras en el levantamiento topográfico, procurando:

- Lograr las mayores distancias interpostales con las estructuras más ligeras.
- Evitar accidentes del terreno que dificulten la construcción.
- En las zonas de cultivo, bosques, selvas, reservas ecológicas, etc., instalar el menor número de estructuras posibles y dejar libramiento suficiente para evitar dañar estos lugares. Se debe obtener información como altura de la estructura, claro de viento, claro de peso y ángulo de deflexión.

Con la información obtenida se procede al llenado de las hojas de distribución de estructuras, las cuales forman un documento de consulta rápida tanto para el ingeniero proyectista como para el constructor.

La localización de estructuras se auxilia de una plantilla, la cual es instrumento que utiliza el ingeniero proyectista para localizar las estructuras en el plano de planta y perfil resultado del levantamiento topográfico de la línea de transmisión.

La plantilla esta formada por una serie de curvas que obedecen a la ecuación de la catenaria (figura 1.9) Las curvas son una serie de paralelas calculadas, considerando:

- La curva caliente, esta calculada considerando la tensión mecánica del cable a  $50^{\circ}$  C.
- La curva que antecede a la curva caliente representa el libramiento reglamentario.
- La curva de fría representa el comportamiento del cable bajo la tensión mecánica que se tendrá bajo las condiciones mas críticas de trabajo y se utiliza durante el diseño para comprobar que no se presente el fenómeno de levantamiento en alguna estructura y comprobación de claros verticales.
- Las demás curvas representan distintas alturas de estructuras.

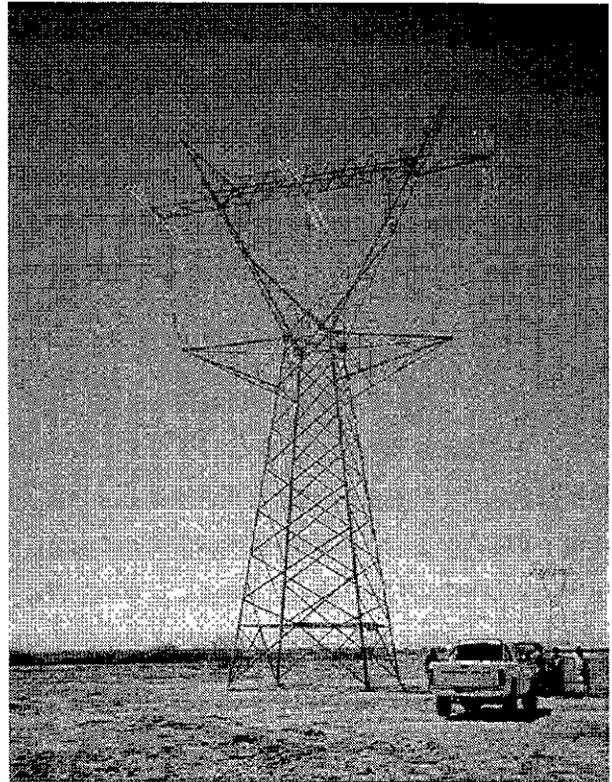
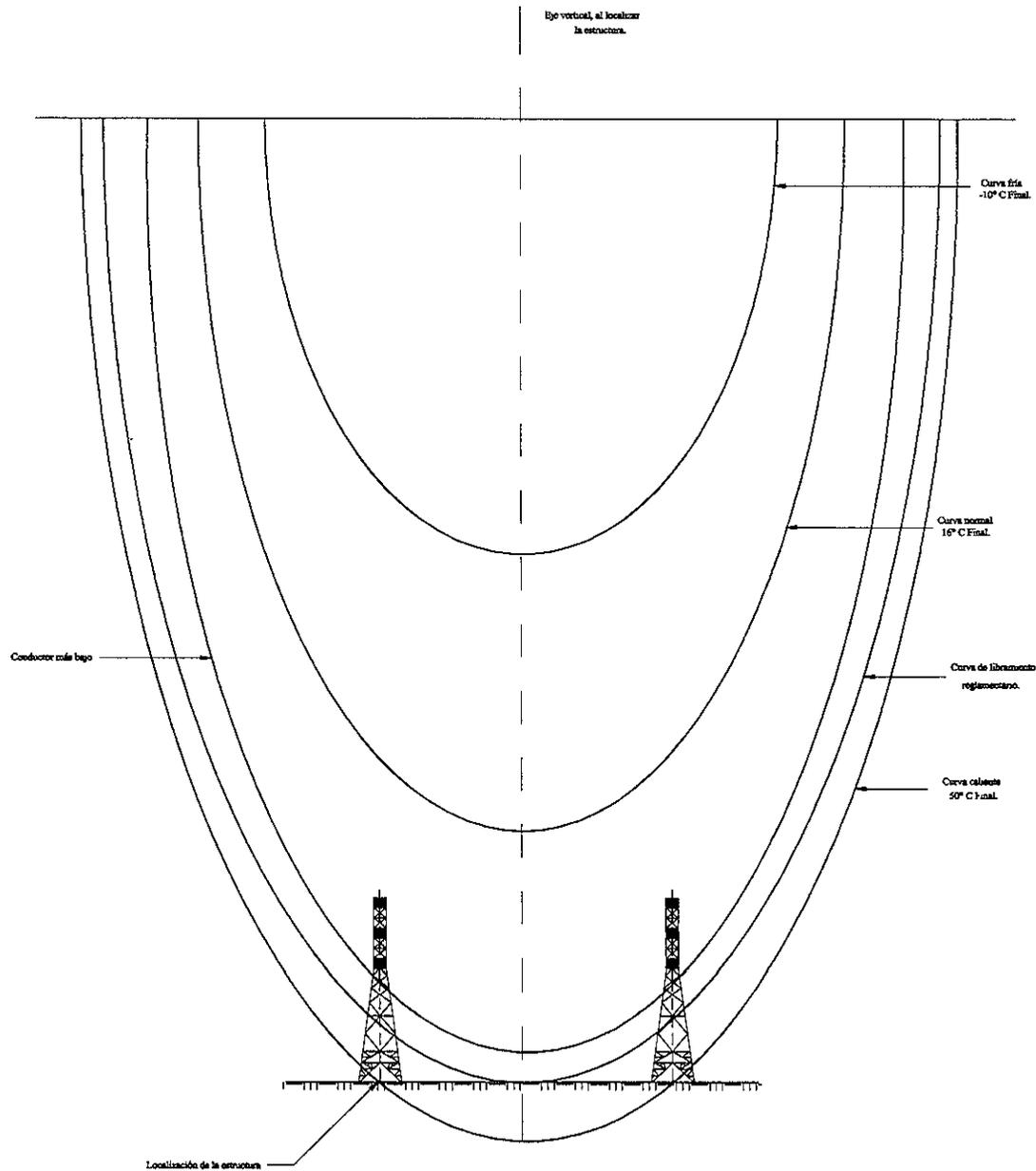


Figura 1.8 Línea de transmisión Hermosillo CC – Hermosillo IV, torre de transposición.



|  |     |            |              |
|--|-----|------------|--------------|
| Conceptualización de las Líneas de Transmisión |     |            |              |
| Plantilla de localización de estructuras       |     |            |              |
| FILIBERTO ZAMORA SÁNCHEZ                       |     |            |              |
| FIGURA No.                                     | 1.9 | TSC<br>S/E | ACOT.<br>S/A |
| HOJA:  |     |            | 1 de 1       |

### 1.2.3 Lista de materiales y equipo

Conociendo la longitud real de la línea de transmisión y la relación de todas las estructuras que se obtuvieron en el trabajo de localización, es posible determinar la cantidad de materiales y equipos de instalación permanente que se requieren para la fase de construcción.

Los materiales a considerar son cable conductor, cable de guarda, aisladores, herrajes, amortiguadores y tornillería

Las cantidades obtenidas se les adiciona un porcentaje que permite prever desperdicios y pérdidas (Punteo y catenaria para los dos primeros conceptos) durante la construcción. En términos generales los porcentajes son los siguientes:

| Concepto         | % |
|------------------|---|
| Aisladores.      | 3 |
| Amortiguadores.  | 3 |
| Cable conductor. | 5 |
| Cable de guarda. | 5 |
| Herrajes.        | 0 |
| Torres de acero. | 0 |
| Tornillos.       | 3 |

Tabla 1 2 Porcentajes de aseguramiento para materiales [3].

### 1.2.4 Listado de flechas y tensiones

Con los datos de tensiones en cables utilizados en la determinación de las plantillas de localización de estructuras y las características de los cables conductores y de guarda se calculan las flechas (punto más bajo de la catenaria) y tensiones mecánicas de cable conductor y de guarda para cada claro interpostal y para cada temperatura que pueda presentarse en el proceso de tendido y tensado de cables durante la construcción.

Los factores que intervienen en este cálculo son:

- Claro interpostal.
- Desnivel entre apoyos de cables en estructuras adyacentes.
- Número de claros entre dos estructuras de anclaje.
- Peso del cable.
- Tensión mecánica del cable a las condiciones de diseño.
- Velocidad del viento.
- Temperatura máxima y mínima.
- Posibilidad de formación de hielo.
- Módulo de elasticidad del cable.
- Coeficiente de dilatación térmica del cable.

### 1.2.5 Determinación de extensiones

Cuando el proyecto de la línea de transmisión determina que ésta se construirá con estructuras de acero es necesario, para absorber desniveles del terreno, instalar módulos de distancia longitudinal en cada una de las patas de la estructura.

Estos módulos llamados extensiones permiten lograr el empotramiento necesario en cada una de las cimentaciones, sin afectar la altura de la estructura.

Para determinar las extensiones de cada estructura es necesario que sobre el terreno, topógrafos las ubiquen según se indicó en los planos de localización general de trayectoria y obtengan los levantamientos de perfiles en cruz.

Con este plano y una plantilla de la pendiente de las diagonales de la estructuras, elaborada a la misma escala se obtienen las extensiones que deben instalarse.

El dato de cada estructura se registra en las hojas de distribución de estructuras.

### 1.2.6 Sistema de tierras y protección

Paralelamente a la construcción de las cimentaciones para las torres, se tiene que realizar el sistema de tierras de cada una de estas a fin de contar con un elemento que nos permita un aterrizaje adecuado en cada estructura para poder disipar una descarga eléctrica por efecto atmosférico o de corto circuito en la misma línea.

El estudio del sistema de tierras y la protección catódica se efectúa a partir del levantamiento de la resistividad del terreno y se lleva a cabo para lograr que todas las estructuras sean un camino fácil para drenar en el terreno las corrientes anormales o extraordinarias, producto de sobrevoltajes en la línea de transmisión.

## 1.3 Construcción

En la construcción de las líneas de transmisión, la supervisión y la ejecución se debe de realizar acorde con los diseños, recursos, tiempo y costos programados, así como lo estipulado en las especificaciones de construcción para este tipo de obras, a las normas de calidad establecidas y a los lineamientos en materia de impacto ambiental lográndose obtener el mejor resultado en las mismas.

Es una actividad que requiere de labor social para lograr obtener los permisos de paso respectivos, en los terrenos de propiedad de tipo ejidal ó privado por donde se llevara a cabo la construcción del proyecto.

Las actividades previas a la mera forma Homo faber, son consideradas como preliminares para la ejecución del proyecto.

De carácter ambiental:

- Resolución en materia de impacto ambiental.

De carácter social:

- Indemnizaciones.

- Tramites de anuencia.
- Expropiación.
- Pago de afectaciones.

Para el uso de equipo y materiales:

- Selección de sitios para almacenes.
- Acomodo y protección de materiales.
- Establecimiento de campamentos.

Al inicio de toda construcción de una línea de transmisión, la primera actividad que se debe de realizar es la verificación del perfil topográfico con la ubicación de las estructuras, mediante la cual se determina si existe necesidad de efectuar modificaciones a la trayectoria, así como también obtener el tipo de extensiones que requiere cada estructura y en su defecto re proyectarse de existir errores de bastante consideración. Inmediatamente después se procede a la ejecución de la obra electromecánica.

### **1.3.1 Verificación del perfil**

Esta verificación del perfil topográfico es de cabal importancia realizarlo, ya que con ello se tiene conocimiento del tipo de terreno donde se efectuará la construcción, así como la dificultad que se presentará para ello, tanto para el acceso de cada estructura como para determinar que su ubicación es apropiada.

En la localización de las estructuras se verifican los desniveles existentes en el sitio de éstas para poder determinar si las extensiones proyectadas están acordes a éste.

#### **1.3.1.1 Modificación al trazo original**

En ocasiones al realizar la verificación del perfil topográfico, se detecta algún problema, ya sea del tipo indemnizatorio, de diseño, de omisión al realizar el levantamiento, que provocará realizar modificaciones a la trayectoria original, por tanto es necesario efectuar un estudio en el terreno para poder determinar la nueva trayectoria con la cual se tenga los menores impactos en el tipo de estructuras a utilizar, en los costos, en el ambiente y en tiempo.

Las modificaciones al proyecto original se pueden evitar si desde la realización del estudio topográfico del perfil del terreno se tiene una adecuada supervisión de los trabajos, así como una buena gestión en la obtención de los permisos previos y durante la ejecución del proyecto.

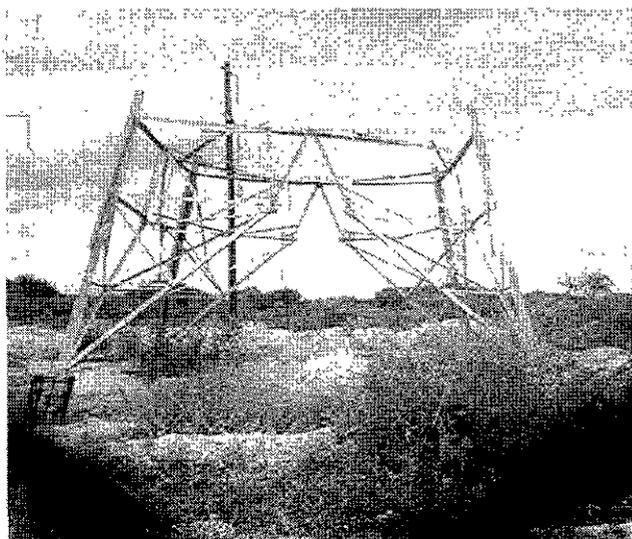
### **1.3.2 Obra electromecánica**

#### **1.3.2.1 Armado y nivelado de la base de la estructura**

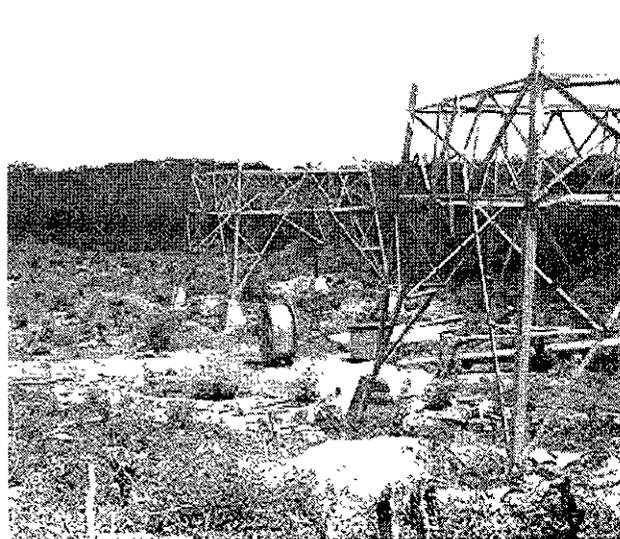
El armado de la base o bottom panel, es la unión de piezas por medio de tornillos, tomando como base los planos de montaje y deberá hacerse en el sitio de su instalación y bajarlas al fondo

de la excavación con las precauciones necesarias, para no flexionar sus miembros; una vez armado se baja la cimentación dentro de la excavación, posteriormente se continua armando la extensión con sus diagonales y por último, los cierres.

El nivelado de la base es de suma importancia, ya que es la base de la estructura. Para comenzar a nivelar es necesario revisar que la base esté completa de sus piezas principales para evitar problemas posteriores; el nivelado básicamente consiste en el ajuste de la estructura en sus distancias diagonales, su alineamiento longitudinal y su nivel. Por los que es necesario contar con los datos según el tipo de torre y nivel de que se trate.



Subestación San Luis Potosí II, S.L.P. Bottom panel.



Bottom panel, listo para recibir el cuerpo superior de la torre.

Figura 1.10 Armado y nivelado del bottom panel.

### 1.3.2.2 Montaje de estructuras

Las condiciones de diseño para la fabricación de cada torre ha originado establecer diferentes formas para realizar el montaje de éstas. Es importante el aplicar métodos preestablecidos para el izaje de cada una de las partes que conforman la torre, considerándolas a partir de la cimentación y extenciones para lograr que los cuerpos superiores se acoplen adecuadamente para no aplicar esfuerzos diferentes para las cuales no fueron diseñadas.

#### Prearmado de cuerpo superior.

El prearmado se realiza después de que se ha terminado el nivelado, el relleno y apisonado, con el fin de dejar un área despejada para colocar el fierro estructural lo más cerca de la base de la estructura, en esta fase es necesario:

- Seleccionar el fierro estructural por cuerpos es decir, los aumentos, horquilla, trabe, crucetas del cable conductor e hilo de guarda.

- Colocación del fierro estructural en el lugar donde se realizarán las maniobras para el montaje.
- Selección de la tornillería que llevarán las uniones entre montantes y celosías.

A partir de esto se procede a atornillar las piezas ya seleccionadas.

### Montaje de cuerpo superior.

El montaje del cuerpo superior, es la elevación y colocación de las partes prearmadas en secciones que quedarán en su posición definitiva.

Dentro del montaje de las estructuras se tiene la aplicación del uso de pluma flotante, grúa hidráulica, helicóptero y pieza por pieza, la determinación de la utilización de estos métodos está asociada a las condiciones de accesibilidad y topografía de la zona donde se construirá la línea de transmisión.

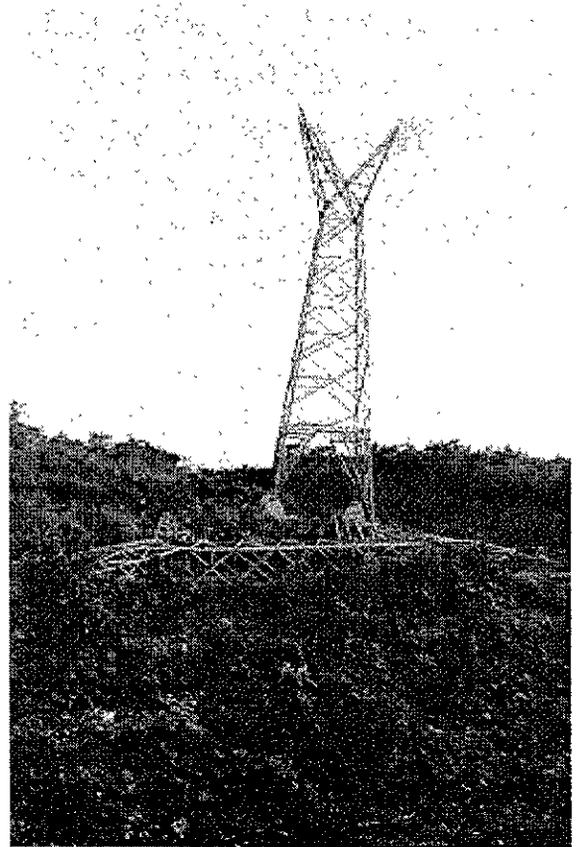


Figura 1.11 Armado del cuerpo superior de una torre de 115 kV, 1 circuito.

Dependiendo de las condiciones del terreno, el izaje de una torre tarda de cinco a quince días.

- Montaje pieza por pieza.

Este método se usa en lugares inaccesibles o donde los caminos están muy retirados del sitio de la torre y consiste en ir elevando pieza por pieza para formar la estructura, se usan plumas improvisadas de tubo galvanizado de 4 y 6 metros de largo, el cual se le acopla una polea.

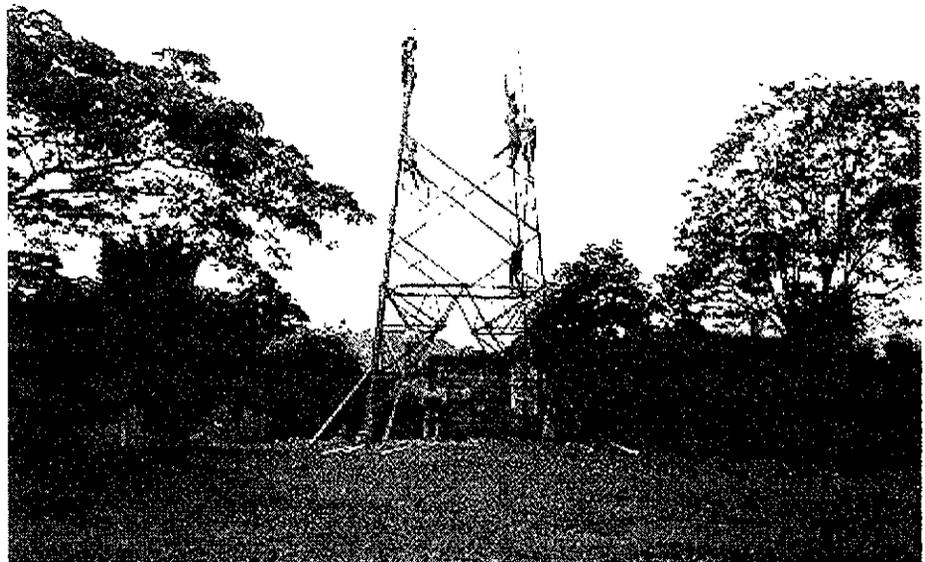


Figura 1.12 Montaje pieza por pieza de una torre de suspensión de 115 kV, 1 circuito.

- Montaje con pluma flotante

Este método es el más usado, el “Winch” se acopla a un camión de 8 toneladas, que también se usa para el transporte del equipo. El Winch enreda un cable de acero de aproximadamente 400 metros de largo y de 1/2” de diámetro, que se acopla a la pluma por medio de poleas y así poder subir los cuerpos.

- Montaje con grúa hidráulica.

Este método es usado donde el terreno es plano, el cual no presenta problemas para tener la grúa cerca de la torre, cuando se usa este método, el prearmado se hace completo.

### 1.3.2.3 Vestido de estructuras

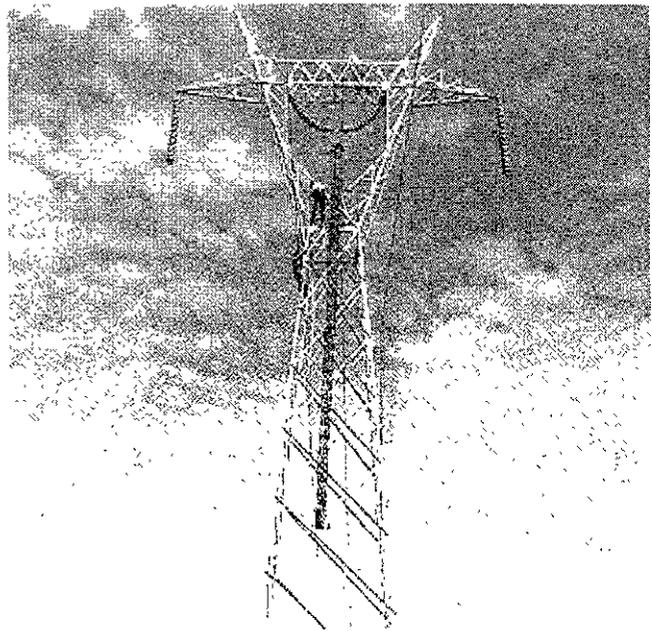
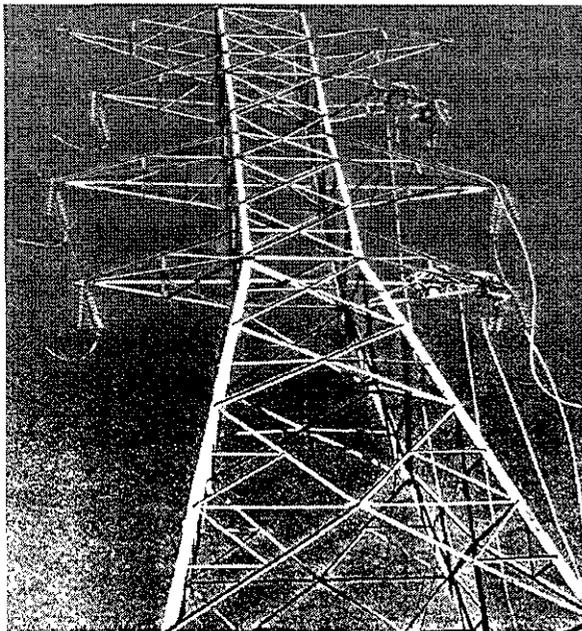


Figura 1.13 Colocación de cadenas de aisladores.

El vestido de estructuras consiste en colocar en sus lugares respectivos los herrajes, aisladores y accesorios de acuerdo a los planos de herraje, incluyendo las placas de peligro y de numeración de estructuras.

El vestido de estructuras lo efectúa una cuadrilla de personal especializado, que van subiendo las cadenas de aisladores una vez armados en el piso, auxiliados por poleas y cable de polipropileno, para hacer más fácil la tarea de colocación. Una vez que se encuentran fijadas las cadenas de aisladores y los herrajes, se instalan las poleas que son las que servirán para el tendido de los cables, conductor y guarda.

La cantidad de aisladores que se instalarán va a depender de la tensión de la Línea y en si, del estudio de coordinación de aislamiento.

### 1.3.2.4 Tendido y tensado del hilo de guarda sin fibra óptica y con fibra óptica

El cable empleado como hilo de guarda en las líneas de transmisión de alto voltaje es de acero galvanizado con aleación de aluminio calibre 3/8" (9.5 mm) y cable de acero con aleación de aluminio, calibre 7#8 (Alumoweld), (sin fibra óptica) este último se usaba exclusivamente en zonas costeras, o en zonas de alta contaminación ambiental, más sin embargo actualmente se ha generalizado su uso debido a su bajo mantenimiento y a solicitud de las áreas de operación del órgano encargado del sector eléctrico. En el caso de tener fibra óptica se emplea cable de guarda con fibra óptica (12 fibras ópticas integradas).

#### Tendido del hilo de guarda sin fibra óptica y con fibra óptica

Para el tendido de cable sin fibra óptica se utilizarán poleas de fierro, si se instala cable de acero de 3/8" tipo Siemens Martín, en caso de instalar cable Alumoweld, las poleas para el tendido serán de aluminio u otro material suave que no maltrate el cable.

El tendido se puede efectuar, ya sea colocando la bobina en un portacarrete "en tierra", ó colocándola sobre la plataforma de un camión, si la bobina se coloca en tierra, el tendido se logra jalando el cable, por medio de un camión, tractor o con personal. Si es colocada en un camión, al desplazarse éste irá depositando el cable en tierra, para posteriormente montarlo en las crucetas de guarda, sosteniéndolo provisionalmente ha base de poleas para facilitar las maniobras de tendido y tensado. Este proceso se efectúa manualmente.

En cualquier método que se utilice para tender el cable de guarda, se cuida que el cable no se dañe. Se debe de evitar que el cable tenga contacto directo con el terreno natural, por lo que el constructor deberá usar madera entre el cable y el suelo.

Cada bobina contiene una longitud aproximada de 2 000 metros de cable de guarda, por lo que es necesario empalmar tramos de cable para que su longitud sea lo suficiente para abarcar las dos torres de tensión donde se rematará. La unión de las dos puntas de los cables se efectúan mediante un empalme a compresión.

En los cruzamientos de las líneas de transmisión y vías de comunicación, no se colocan empalmes en el claro de cruce o claros adyacentes.

Para el tendido del hilo de guarda con fibra óptica se aplican todas las consideraciones del tendido del cable de guarda sin fibra óptica. Y debido a la existencia del cable que contiene las fibras ópticas, debe tenerse un cuidado especial.

Es de suma importancia tener presente que:

- Los carretes que contengan el cable de guarda con fibra óptica deberán ser transportados y manejados siempre en posición vertical.
- Los extremos del cable deben estar siempre sellados.
- El cable piloto deberá estar unido al cable óptico mediante un dispositivo giratorio y una camisa de tendido.
- Se debe de evitar el doblez del cable, así como su compresión.
- La guía de las poleas debe estar protegida por neopreno u otro material similar.
- El radio mínimo de curvatura durante la instalación deber ser de 1 metro.
- Una vez efectuado el tendido del cable de guarda, este no debe permanecer sobre las poleas por más de 48 horas.

Para el hilo de guarda con fibra óptica debe de realizarse una ingeniería de distribución en donde se planeará la ubicación de los empalmes ópticos, los cuales se deben hacerse en las estructuras, nunca en el claro.

### Tensado del hilo de guarda sin fibra óptica y con fibra óptica.

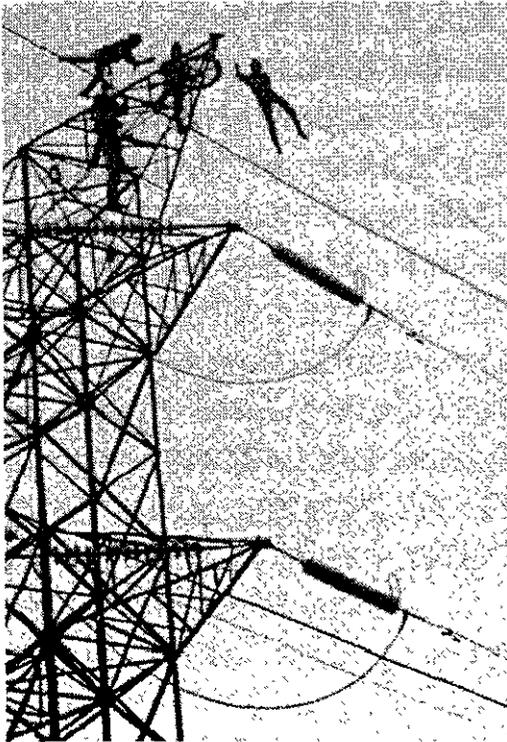


Figura 1.14 Tensado del cable de guarda.

Para efectuar el tensado del cable de guarda sin fibra óptica, es necesario contar con la tabla de flechas y tensiones, misma que nos muestra la flecha para cada claro, y la tensión que debe existir entre dos estructuras de deflexión, remate, suspensión o transposición, para determinado rango de temperaturas.

El tensado se realiza con tractor o cualquier medio de tracción pero también se cuenta con un dinamómetro para verificar el valor de la tensión mecánica correspondiente.

La comprobación de una flecha se logra escogiendo un claro “determinado” y marcando en sus torres adyacentes el valor de la flecha que le corresponda, a partir del punto de la cruceta hacia abajo, enseguida se coloca un teodolito en una de las marcas para ver la marca de la torre consecuente observando si efectivamente la parte mas baja del cable se encuentra a ese nivel.

Después de que se ha tensado el cable de guarda se deja reposar 24 horas sobre las poleas para después quitarlas y dejar suspendido el cable con clemas que sirven para sujetar dicho cable en forma definitiva.

Con relación al tensado del cable de guarda con fibra óptica además de la metodología anterior es necesario que:

- En las maniobras de tensado del cable de guarda con fibra óptica para el flechado del mismo se usan clemas de tensión temporal, las cuales deben de ser del tipo cuña.
- El corte del cable de guarda con fibra óptica no debe de hacerse con herramientas que causen deformación del tubo que contiene a las fibras ópticas.
- Mientras no se realice el empalme, las puntas de los cables deberán enrollarse cuidadosamente en espiras de diámetro no menor a un metro y fijarse a la estructura.

### 1.3.2.5 Tendido y tensado del cable conductor

Todos los elementos primarios que conforman las líneas de transmisión como son cimentaciones, estructuras, herrajes y cables conductores son indispensables para su estabilidad y cumplimiento de la función de transmitir energía eléctrica; sin embargo tienen una relevancia especial los cables conductores porque a través de ellos se realiza la transmisión de energía.

Un aspecto que le da importancia a los cables conductores en línea de transmisión es su costo, (ver tabla 1.3) como se observa en el porcentaje de participación del costo total de los materiales de instalación permanente.

| Voltaje (kV) | Cable Conductor | Estructuras | Aisladores y Herrajes | Cable de Guarda |
|--------------|-----------------|-------------|-----------------------|-----------------|
| 400 1 C      | 54 %            | 35 %        | 8.5 %                 | 2.5 %           |
| 230 2 C      | 52 %            | 37 %        | 8.5 %                 | 2.5 %           |
| 230 1 C      | 47 %            | 40 %        | 8.5 %                 | 4.5 %           |
| 115 2 C      | 57 %            | 30 %        | 9.5 %                 | 3.5 %           |
| 115 1 C      | 49 %            | 37 %        | 8.5 %                 | 5.5 %           |

Tabla 1.3 Porcentajes de costos totales de los materiales en una línea de transmisión.

En una línea de transmisión durante el proceso de construcción se efectúa supervisión de la calidad en todas las actividades y el cumplimiento de las especificaciones del proyecto, verificándose por personal de operación durante la inspección final para la entrega-recepción.

Posteriormente durante la operación de la obra es posible dar mantenimiento con línea energizada a las cimentaciones, sistemas de tierra, estructuras, aisladores y herrajes, no así al cable conductor y sus empalmes, de lo que se deduce la gran importancia que tiene para la confiabilidad y vida útil de la línea el asegurar que el cable y sus empalmes han sido colocados adecuadamente en los lugares de sujeción definitiva.

En las líneas de transmisión el cable que normalmente se instala es el ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced), conductor desnudo de aluminio reforzado con acero, esta formado por alambres de aluminio duro colocados en capas concéntricas sobre un núcleo de alambres de acero galvanizado (alma de acero).

Entre las ventajas del cable conductor ACSR, se tienen:

- Se obtiene claros interpostales mayores que para cables de cobre y aluminio debido al refuerzo de acero.
- Alta resistencia a la tensión mecánica.
- Facilidad para el tendido e instalación.

A continuación se muestran las principales características de los cables normalizados tipo ACSR en uso por el organismo encargado del sector eléctrico.

| Calibre KCM | Número de Alambres (Al/Ac) | Diámetro mm. | Peso kg/km. |
|-------------|----------------------------|--------------|-------------|
| 477         | 26/7                       | 21.8/8.0     | 975         |
| 795         | 26/7                       | 28.1/10.4    | 1629        |
| 900         | 54/7                       | 29.5/9.8     | 1723        |
| 1113        | 45/7                       | 32.0/8.0     | 1867        |

Tabla 1.4 Principales características de los cables ACSR.

Los cables tipo ACSR normalmente se usan en líneas donde la contaminación ambiental es mínima. En las zonas cercanas al mar o costeras la contaminación es mayor, por lo cual se recomienda el uso de los conductores ACSR/AS ya estandarizados siguientes: calibre 496, 827, 929 y 1132 KCM: éstos poseen mayor resistencia a la corrosión, ya que el núcleo de los mismos está compuesta de acero con un recubrimiento de aluminio (Alumoweld).

### **Tendido del cable conductor**

Para el tendido del cable conductor es de suma importancia tener en consideración la información que a continuación se señala.

- Conocimiento a detalle de la trayectoria de la línea, ubicación de acuerdo al kilómetro de la línea de obstáculos indicando su altura, cruzamiento con vías de comunicación; así como la ubicación de las estructuras de deflexión y remate.
- Inspección en almacén de los herrajes, conjuntos de suspensión y de tensión, estado de los carretes de cable y de verificación de los números de identificación, peso y longitud de los conductores.
- Con los datos anteriores se elabora el programa de tendido, que básicamente consiste en dar ubicación en la línea al cable de cada uno de los carretes, ordenando longitudes iguales en las fases con el objeto de tener los puntos de empalme en lugares predeterminados que sean accesibles y adecuados a efecto de evitar desperdicios de cable para facilitar y optimizar las maniobras.
- Se obtienen las longitudes de los tramos para tender de acuerdo a la capacidad del equipo de tendido, la fecha de ejecución del tendido y tensado tomando en cuenta la producción promedio que permita la optimización del equipo y accesorios de tendido.

Existen accesorios especializados para realizar el tendido de cables, varían en sus características y tamaño con relación al diámetro del conductor, número de conductores por fase y tensión de trabajo del cable; sin embargo de una manera general se pueden señalar los siguientes:

- Poleas con garganta recubierta de neopreno.
- Yugo para tendido de conductores múltiples.
- Tensor tipo malla.
- Conector destorcedor.
- Tensor tipo quijada.
- Tensor tipo tornillo.
- Guillotinas.
- Radios de comunicación portátiles.
- Portacarretes.
- Empalmadoras (compresora, cabezal y dados).

La maquinaria para tendido está integrada generalmente por frenador y malacates accionados por sistemas hidráulicos y éstos a su vez por motores de combustión, instalados en remolques o sobre vehículos.

Las características del equipo, como potencia, velocidad, manejabilidad son variables y deben elegirse de acuerdo al tipo de cable, número de conductores a tender y tipo de terreno donde se ubica la línea de transmisión.

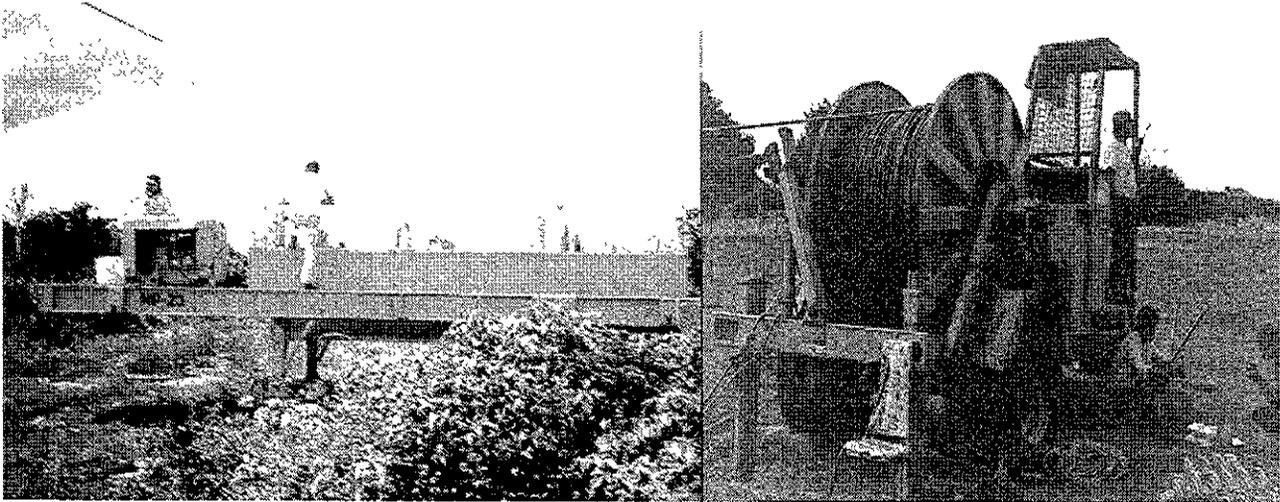


Figura 1.15 Maquinaria para el tendido de cables.

Los elementos principales para el tendido se describen a continuación.

- Porta carretes.

Estos equipos pueden ser fijos o con remolques y su función es soportar los carretes de cable durante el proceso de devanado o tendido, además contarán con un freno regulador de la tensión del cable.

- Devanadora.

Esta máquina desarrolla la función de oponer una resistencia al cable conductor a la salida del carrete o detener el proceso de tendido, frenando completamente la salida del conductor.

- Reembobinador de cable prepiloto.

El prepiloto es un cable muy ligero diseñado para tenderse con personal o vehículos. La función del reembobinador es recuperar con tracción el prepiloto que a su vez transportará el cable piloto de acero o cable auxiliar por las poleas de la traccionadora hacia el punto donde se encuentra el conductor (devanadora), para iniciar el tendido. El reembobinador puede ser triple, esto es, con tres tambores para alojar los prepilotos de tres fases en forma independiente o sencillo con un solo tambor de mayor capacidad donde se embobinan las tres fases.

- **Traccionadora.**

Esta máquina tiene como función principal transportar sobre poleas el cable conductor recuperando el cable piloto de acero tendido previamente.

El movimiento del cable sobre las poleas se genera con la diferencia de tensión que se presenta entre la devanadora y la traccionadora.

Un equipo convencional consta de traccionadora, devanadora, reembobinador de prepiloto y 4 portacarretes.

El tendido de cable conductor en líneas de transmisión debe realizarse siempre bajo el procedimiento de tensión mecánica controlada, entendiéndose como tal procedimiento, en el cual el cable conductor no tenga contacto con el suelo, siendo necesario la utilización de los equipos y herramientas especiales descritos anteriormente.

El cable piloto es puesto en tensión y en seguida se conecta al cable conductor por medio de un cople especial, luego será jalado a una velocidad mínima. Cuando la tensión del cable piloto llega al punto en que el operador de la máquina traccionadora considere que el conductor ha sido levantado del piso, se pone en marcha la máquina de freno o devanadora para dar el cable velocidad lineal igual al de la traccionadora y poco a poco con un mando único, las dos máquinas aumentan la velocidad hasta mantener el cable a 3 ó 4 metros del piso.

Después de tender el cable conductor éste se ancla mediante pilones o sobre la última torre que es de deflexión o de remate.

### **Tensado del cable conductor**

El tensado del cable conductor se realiza en forma similar al tensado del cable de guarda, con la diferencia de que en este caso la tensión es mayor.

El tensado se realiza usando el método de medición directa de flechas, verificando con dinamómetro los datos de acuerdo a la tabla de flechas y tensiones.

Especificaciones que se deben respetar en el tensado:

- Normalmente no se deberán tensar tramos mayores de 3 000 metros, salvo en casos especiales.
- En el tramo que se tense deberán comprobarse las flechas cuando menos en 3 claros.
- Se deberá cuidar que el cable conductor no permanezca tendido sobre las poleas sin enclamar más de 72 horas.
- En ningún caso los empalmes quedarán a menos de 20 metros de las estructuras.
- La distancia entre empalmes no será menor de 450 metros y no se permitirá más de un empalme en el mismo conductor por claro.
- No se instalarán empalmes o mangos de reparación en los cruzamientos con carreteras principales, ferrocarriles y líneas mayores de 115 kV.
- Antes de engrapar o sujetar en forma permanente los conductores se verificarán los libramientos a tierra.

Una vez cumplidas las especificaciones se procederá al enclenado, que consiste en quitar las poleas de las crucetas y colocar los conjuntos de suspensión y así dejar sujeto el cable conductor en forma definitiva en cada una de las fases correspondientes.

## **Empalmes de conductores**

Los empalmes usados para unir los extremos de los cables conductores son a compresión.

Estos empalmes se fijan con una prensa especial llamada empalmadora. El juego de empalmes consta de una sección de acero (núcleo), que será comprimido abrazando los hilos de acero de los cables por unir mediante unos dados de forma hexagonal y una sección de aluminio que sujeta la parte externa de los cables.

### **1.3.2.6 Separadores y amortiguadores**

#### **Colocación de separadores**

En líneas de transmisión de conductores múltiples por fase, se requiere de unos dispositivos especiales a fin de mantener los conductores a cierta distancia mínima uno del otro, dichos dispositivos se conocen con el nombre de “separadores”.

Para la instalación de los separadores es necesario el uso de canastillas, las cuales se deslizan por el cable a través de unas ruedas de hule para no dañar el cable conductor, estas canastillas son movidas desde el piso por medio de un cable de propileno, las canastillas son provistas de tacómetro para medir la longitud recorrida sobre el conductor.

Un separador se instalará aproximadamente a 20 metros de cada torre y los subsecuentes entre centros de 75 metros o menos, colocándose en forma simétrica a partir del centro del claro hacia las torres.

Se recomienda que la distancia entre separadores nunca exceda de 75 metros y que se instalen por lo menos dos separadores por claro, independientemente de la longitud del mismo.

#### **Colocación de amortiguadores**

La instalación de estos dispositivos son indispensables para la protección de las vibraciones producidas por el viento.

La instalación de amortiguadores se realizará a la distancia indicada por los estudios de ingeniería de amortiguamiento (vibraciones a las que son sometidos los cables por la acción del viento).

El número de amortiguadores esta también en función de la ingeniería de amortiguamiento y regularmente se colocan en cada extremo del claro.

## REFERENCIAS

- [1] Comisión Federal de Electricidad.  
<http://www.cfe.gob.mx/git/transmi0.html>
- [2] Comisión Federal de Electricidad, Unidad de comunicación social, Organo de Comunicación Interna de la Comisión Federal de Electricidad. **Las torres en la conducción de energía eléctrica.** Conexión, año 4, num. 1-3, enero-marzo de 1998, pags. 43-47.
- [3] Comisión Federal de Electricidad, Subdirección de Construcción, Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación. Sistema de calidad. **Instrucción de trabajo: lista de materiales para líneas de transmisión N1705.** México 1997.

## CAPITULO 2

### Efectos Ambientales

En el pasado, las empresas generadoras de energía eléctrica diseñaban sus instalaciones, solamente con base en aspectos técnicos y económicos. Sin embargo, en la actualidad se ha generalizado la inquietud muy en particular por minimizar los efectos que provocan sobre el medio ambiente los sistemas eléctricos.

Como se sabe, en la construcción, operación y mantenimiento de las instalaciones eléctricas involucra aspectos de tipo social y ambiental. Por lo tanto, para lograr un equilibrio entre ellos, es necesario hacer una evaluación del impacto que producen sobre el medio ambiente y el ecosistema que los rodea. Resulta claro que para evaluar el impacto de las instalaciones eléctricas sobre el ambiente, se debe de llevar a cabo un análisis amplio y detallado de los efectos ambientales que éstas producen. Aunque muchos de los efectos adversos pueden reducirse a través de diversas técnicas de ingeniería, construcción y planeación de paisajes, la mayoría de los impactos sociales y ambientales se disminuyen con una cuidadosa selección de los sitios factibles. Por esta razón, en el proceso de planeación de una instalación propuesta, es importante determinar exactamente el emplazamiento que propicie el menor impacto sobre el medio ambiente que lo rodea.

La intensidad del campo eléctrico en la vecindad de los conductores de los sistemas de transmisión es una magnitud tal que da origen a la generación descargas tipo corona bajo condiciones meteorológicas adversas (humedad elevada y lluvia). El proceso de ionización produce campos electromagnéticos de alta frecuencia alrededor de la superficie de los conductores, los que dependiendo de la intensidad de las señales pueden interferir la recepción de radio y televisión.

Igualmente, la ionización del aire en la cercanía de los conductores da lugar a variaciones de la presión del aire en la banda de frecuencia de 100 a 12 000 Hz. El sonido producido por estas variaciones de presión se conoce como ruido audible y en condiciones climatológicas adversas puede alcanzar niveles inaceptables.

Las instalaciones eléctricas en operación se encuentran inmersas en un ambiente electromagnético, el cual puede considerarse para la frecuencia de operación integrada por campos eléctrico y magnético independientes uno del otro. Estos campos se caracterizan mediante sus magnitudes de intensidad. A la frecuencia fundamental del sistema, la intensidad del campo eléctrico es directamente proporcional a la tensión del sistema, y el campo magnético a la magnitud de la corriente que transporta la línea. Ambos dependen en forma compleja de la disposición geométrica de los conductores y de su posición respecto a tierra.

La intensidad de los campos eléctrico y magnético afectan a cualquier elemento que se encuentre en la cercanía de las líneas de transmisión. El efecto más importante es la presencia de

fuerzas sobre cargas eléctricas. El caso práctico más importante se presenta cuando un objeto metálico que se encuentra aislado de tierra es tocado por una persona que presenta una trayectoria conductora a tierra. La persona experimenta la circulación de una corriente cuya magnitud dependerá de la intensidad del campo eléctrico, del tamaño del objeto metálico y del valor del aislamiento a tierra. El valor de la magnitud máxima de la intensidad del campo eléctrico permisible bajo una línea de transmisión se determina considerando que la magnitud de la corriente que circulará por la persona no deberá de exceder el límite fijado por las corrientes de electrocución.

El efecto de la intensidad del campo magnético desde el punto de vista biológico se ha convertido en un debate, el cual no ha sido posible aclarar debido a las incertidumbres que existen sobre los posibles efectos en la salud de los seres vivos expuestos en forma prolongada a la exposición de los campos magnéticos.

El presente capítulo, se presenta como un tema selecto de información relevante sobre los diversos aspectos, que se consideran importantes en la actualidad, para la evaluación del impacto ambiental de los sistemas de transmisión de alto voltaje.

## 2.1 Derecho de vía

Como parte fundamental entre las líneas de transmisión y la relación con los efectos ambientales, el estudio, la evaluación y la definición de la ruta es de relevante importancia, puesto que es la base de un buen diseño, de una construcción económica y por ende, de una operación confiable. Si a esto se le agrega la previsión de los problemas de tipo social e indemnizaciones, evidentes y potenciales, así como la consideración de diversas medidas encaminadas el impacto ambiental, se puede concluir que de la adecuada selección de la trayectoria depende la economía fundamental del proyecto y la construcción de la línea de transmisión.

A nivel mundial, los métodos para la selección de trayectorias de líneas de transmisión involucran diversos aspectos, entre los que destacan los factores ecológicos, sociales, ambientales, estéticos, económicos y de ingeniería. En México tradicionalmente los criterios para la selección de rutas de líneas de transmisión, hacían énfasis en los aspectos sociales, económicos y de ingeniería, hoy en día se han incorporado criterios relacionados con los aspectos ambientales, ecológicos y estéticos; además de considerar restricciones como las que se indican a continuación:

- Evitar las área protegidas.
- Evitar zonas turísticas actuales y futuras.
- Incrementar diseños de estructuras e instalaciones que minimicen sus impactos sobre el medio ambiente y el paisaje.
- Evitar las áreas agrícolas altamente productivas.

En la fase de construcción y mantenimiento de los derechos de vía, se deberá observar lo siguiente:

- La limpieza del sitio deberá restringirse exclusivamente al área necesaria para la obra.

- La preparación del sitio debe planificarse adecuadamente con el fin de conservar la vegetación y los árboles para que sirvan como barrera natural entre la instalación y el ecosistema adyacente.
- La afectación a las áreas naturales deberá minimizarse a través de programas de restauración.

Aunado a esto, en la limpieza y mantenimiento de las trayectorias de líneas de transmisión, se deberá observar, entre otras recomendaciones, lo siguiente:

- Evitar el uso de productos químicos y de fuego.
- Para no causar daño a los ecosistemas, los residuos distintos a los generados por el desmonte se deberán depositar en sitios apropiados.

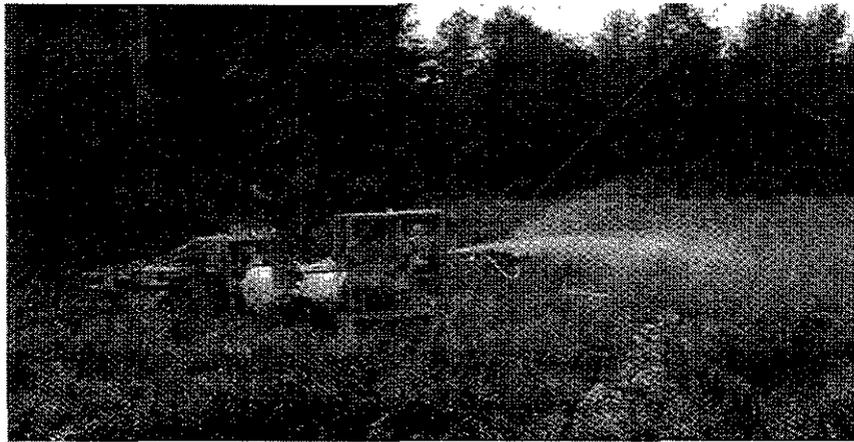


Figura 2.1 Empleo de productos químicos para limpieza del derecho de vía, Terra Industries – Sioux city, Iowa, U.S.A -

Ante el problema mundial de la degradación ecológica producida por muy diversos aspectos, las diferentes disciplinas de la ingeniería concurren en su valiosa aportación para prevenir y controlar, mediante el estudio y la acción, aquellos fenómenos y situaciones casuales que alteran el medio ambiente.

A raíz de la publicación del acta de política ambiental nacional, las evaluaciones ambientales se han convertido en un asunto importante para cada estado de la Unión Americana. Estos últimos han dictado diversas reglamentaciones a través de guías de impacto ambiental, las cuales se han seguido en forma modificada por las oficinas reguladoras de cada estado.

En nuestro país, debido al desarrollo de las concentraciones industriales y los grandes núcleos de población, existe la profunda inquietud del daño al hombre y a sus bienes y en paralelo, en los principales países del mundo se han iniciado programas e investigaciones para minimizar o controlar los impactos producidos por el acelerado crecimiento industrial, sobre el medio ambiente que nos rodea. Esto ha sido posible, gracias a la unión de recursos brindados por la tecnología para aplicarla dentro de una legislación específica, considerando de que si el hombre ha sido capaz de un desarrollo en su continua evolución, podrá ser también capaz de controlar los daños surgidos de esta evolución.

Con la participación de nuestro país en los foros internacionales de discusión y estudio, como han sido las reuniones llevadas en Estocolmo en junio de 1972 en el primer periodo de sesiones del consejo de administración del programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y

segundo período que tuvo lugar en Nairobi, en marzo de 1974, México ha entrado en la inquietud mundial recibiendo y aportando experiencias de una nueva problemática internacional.

Y así, el 1° de marzo de 1988 entra en vigor la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, publicada en el Diario Oficial de la Federación del 28 de enero de 1988, que entre otros objetivos define los instrumentos para su aplicación en México. Y con base en los artículos 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 43, el 29 de marzo de 1989 se publica en el Diario Oficial de la Federación un acuerdo en el que se autoriza la publicación de normas técnicas ecológicas, acuerdos, órdenes, notificaciones y en general, todos aquellos comunicados que en materia de ecología emita la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, así como los órganos descentralizados y encargados del medio ambiente.

Como se sabe, la construcción, operación y mantenimiento de las instalaciones eléctricas involucra aspectos de tipo técnico económico, social y ambiental. Por tanto, para lograr un equilibrio entre ellos, es necesario hacer una evaluación del impacto que producen sobre el medio ambiente y del ecosistema que las rodea.

En nuestro país se ha tenido como objetivo principal para el diseño de líneas de transmisión, la economía en la selección de conductores y la configuración de la línea, para posteriormente optimizar el diseño de las estructuras de soporte. Prácticamente poco se había considerado el impacto del derecho de vía de las líneas de transmisión sobre el medio ambiente. Sin embargo, a últimas fechas se ha considerado la necesidad de evaluar las condiciones de operaciones de las líneas con el enfoque de su impacto sobre los ecosistemas adyacentes, al mismo tiempo se ha planteado la necesidad de actualizar los procedimientos de cálculo del derecho de vía y selección de trayectorias.

Actualmente el órgano encargado del sector eléctrico a través de sus documentos de normas sobre derecho de vía y criterios para la selección de trayectorias de líneas de transmisión, dispone de prácticas que procuran la afectación mínima al medio ambiente, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales. Es conveniente considerar que se incorporaran aspectos estéticos.

Desde el punto de vista ingenieril, el problema de la selección de trayectorias para líneas de transmisión, se pueden clasificar como un problema de decisión, donde se deben de considerar diversos aspectos como:

- Aspectos técnicos.
- Aspectos económicos.
- Aspectos sociales.
- Aspectos ambientales.

Cabe aclarar que a nivel mundial el proceso de selección del derecho de vía involucra la participación de muchos grupos profesionales.

Ahora bien, en muchos países las guías desarrolladas por las dependencias federales deben de tomarse en cuenta en el desarrollo de una ruta para que las líneas de transmisión sean compatibles con el medio ambiente. En general los objetivos compatibles con esta filosofía son los siguientes:

- a) Minimizar el daño a los sistemas naturales.
- b) Evitar conflictos con el uso del suelo.
- c) Obtener el máximo potencial para compartir el derecho de vía.
- d) Reducir el impacto sobre las características culturas o históricas más significativas.

---

e) Mejorar el impacto ambiental.

Actualmente, los métodos utilizados para la selección de las rutas para las líneas de transmisión son más versátiles y completos; de esta manera la dificultad de encontrar trayectorias que sean técnicamente adecuadas, ambientalmente compatibles y políticamente aceptadas, disminuye.

Se puede observar que hoy en día los efectos causados por la construcción, operación y mantenimiento de las líneas eléctricas, se pueden minimizar a través de técnicas de ingeniería, aplicación de diversas metodologías y criterios de impacto ambiental y por supuesto de una adecuada planeación de los sistemas eléctricos, cuyo objetivo final es el de producir el menor daño a la sociedad, a la flora y la fauna del lugar donde se edifiquen las futuras instalaciones eléctricas.

Tal como se muestra en la tabla 2.1, la evaluación del impacto ambiental de las líneas de transmisión requiere la consideración de varios factores, tales como ecológicos, eléctricos, estéticos y socio-económicos.

Resulta claro que para evaluar el impacto de las instalaciones eléctricas sobre el ambiente, se debe llevar a cabo un análisis amplio y detallado de los efectos ambientales que éstas producen. Aunque muchos de los efectos adversos pueden reducirse a través de diversas técnicas de ingeniería, construcción y planeación de paisajes, la mayoría de los impactos humanos y ambientales se disminuyen mejor realizando una cuidadosa selección de los sitios factibles. Por esta razón, en el proceso de planeación de una instalación propuesta, es importante determinar exactamente el emplazamiento que propicie el menor impacto sobre el ecosistema y medio ambiente que la rodea.

Según las estadísticas, la demanda actual de electricidad se duplica cada 10 años y la capacidad de transmisión ha crecido aún más; por consiguiente, las líneas deben de ser de mayor longitud y deben de operar a voltajes más altos para satisfacer el incremento en la demanda de energía eléctrica. Hoy en día, la existencia de los efectos sociales, estéticos y ambientales son el resultado del incremento en el número de líneas. Por esta razón, la necesidad de una mejor selección de trayectorias y diseños más en armonía con el medio ambiente son imperativos.

Uno de los impactos asociados al transporte de energía eléctrica es la radiación electromagnética, cuyo impacto puede llegar a producir los siguientes efectos sobre las áreas que atraviesan:

- Degradación de la calidad de la recepción de señales de radio y televisión, debido al efecto corona.
- Contaminación por ruido debido a la emisión de ruido audible por zumbido y crepitación.
- Deterioro de la seguridad pública y de la comodidad, debido a la inducción electromagnética y electrostática.

Al respecto, se ha observado que la tendencia actual de muchos países, no es diseñar líneas de transmisión eliminando totalmente el efecto corona, la interferencia de radio y televisión, el ruido audible y la inducción electromagnética o electrostática ya que el costo es muy alto; sino minimizar sus efectos sobre el medio ambiente con base en:

| Variables Ambientales   | Variables Eléctricas   | Variables estéticas  | Factores y Beneficios Sociales   |
|---|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetación: bosques, tierras productivas.</li> <li>• Hábitat de vida salvaje.</li> <li>• Areas protegidas.</li> <li>• Zonas de especies raras o en peligro de extinción.</li> <li>• Areas de reproducción animal.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Torres de TV, microondas, radio, etc., existentes o futuras.</li> <li>• Líneas de transmisión aéreas y subterráneas, existentes o futuras.</li> <li>• Existencia o futura construcción de vías de comunicación.</li> <li>• Existencia o futura construcción de tuberías.</li> <li>• Uso actual del suelo: áreas residenciales, hospitales y tierras de cultivo.</li> <li>• Niveles de ruido audible.</li> <li>• Niveles existentes de ozono.</li> <li>• Datos meteorológicos: humedad, velocidad de viento, precipitación pluvial, temperatura, densidad de rayos sobre tierra, etc.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Visuales: tipo y extensión de parques, áreas de recreación, vistas escénicas, carreteras, sitios históricos, parques nacionales, sitios arqueológicos.</li> <li>• Hidrológicos: lagunas, ríos, esteros, pantanos y reservas de agua.</li> <li>• Suelos: formaciones geológicas, topografía, daños potenciales por la erosión, etc.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Existencia y/o uso potencial de la tierra: comercial, residencial, industrial, recreación, instituciones públicas y agricultura.</li> <li>• Aumento poblacional.</li> <li>• Crecimiento industrial.</li> <li>• Datos económicos.</li> <li>• Estilo de vida actual.</li> </ul> |

Tabla 2.1 Parámetros comúnmente empleados en la evaluación de la ruta potencial de una línea de transmisión.

- La selección de un adecuado diseño de la línea y de la configuración de las torres, empleando consideraciones económicas y técnicas para satisfacer criterios eléctricos ambientales especificados.
- La selección del centro de la línea y del ancho del derecho de vía dentro de cada una de la alternativas de trayectorias, de tal manera que se produzca el menor impacto en las actividades diarias que se desarrollan dentro del derecho de vía y áreas adyacentes.

Por otro lado, los intensos esfuerzos realizados para desarrollar y diseñar rutas óptimas para líneas de transmisión, se pueden ver comprometidos si no se diseña un programa bien concebido de administración de derecho de vía, antes, durante y después de la construcción de la línea. Este programa, consiste en desarrollar guías y procedimientos de control para ser seguidos a todo lo largo de la vida útil de la línea de transmisión, para minimizar el impacto de las actividades de construcción, mantenimiento y planeación de su acceso.

#### **Actividades de construcción.**

Ya que las líneas de transmisión de alta tensión requieren de derechos de vía más anchos, el impacto ambiental que representa el construir estas líneas, puede ser mucho mayor si no se toman las debidas precauciones durante la construcción. Esto se puede lograr a través de un estudio detallado de las condiciones ambientales existentes e implantación de procedimientos para el desmonte del derecho de vía.

#### **Actividades de mantenimiento.**

Las actividades de mantenimiento relacionadas con los derechos de vía de líneas de transmisión, se requieren aún después de que la línea se ha construido debido a los requerimientos de seguridad y confiabilidad y a la re-erección de torres y retencionado de conductores en el caso de daño provocado por causas naturales imprevistas o por vandalismo.

#### **Planeación del acceso.**

La planeación del acceso para las actividades de construcción y mantenimiento depende del tipo de terreno, la disponibilidad de caminos y la magnitud de la necesidad de construcción de un nuevo derecho de vía.

La construcción de caminos de acceso dentro del derecho de vía varía en sus dimensiones, dependiendo del diseño de las torres y del tipo de equipo de construcción utilizado. Según la experiencia internacional en este sentido, los caminos de acceso se pueden diseñar para:

- Seguir los contornos del terreno.
- Conservar la vegetación deseable.
- Permitir el paso de gran equipo y materiales.

### 2.1.1 Planeación y selección del derecho de vía

Ya que la localización de la ruta de las líneas de transmisión es esencialmente un problema de estudio de áreas geográficas, los métodos de análisis espacial son herramientas fundamentales en el proceso de planeación. Estas técnicas analizan la localización, distribución y asociación de las características ambientales sobre las cuales las líneas tienen impacto.

Para lograr el equilibrio entre las líneas de transmisión y el medio ambiente, las guías desarrolladas por diversas organizaciones tienen como objetivos la contemplación de los factores ambientales, estéticos y socioeconómicos en el proceso de selección de la ruta; tratando especialmente de:

- Minimizar el daño a los sistemas naturales.
- Reducir al mínimo los conflictos con el uso actual y potencial del suelo.
- En la medida de lo posible, compartir los derechos de vía.
- Minimizar el impacto sobre las características culturales más significativas, y
- Reducir al mínimo el impacto visual.

Por lo tanto, para determinar una ruta óptima, es importante que los objetivos anteriores sean ponderados con criterio, ya que cada uno de ellos dará lugar a una ruta diferente. Por ejemplo, si únicamente se considera el punto de vista de los ecologistas, el derecho de vía, no cruzará a través de zonas boscosas, vías fluviales, zonas con especies animales salvajes, etc. por otro lado, si existe conflicto con el uso actual de suelo, especialmente con la agricultura, entonces la ruta de la línea de transmisión pasará a través de tierras boscosas y zonas con vida salvaje, para evitar dentro de lo posible, las zonas agrícolas altamente productivas.

La selección del derecho de vía implica cumplir con los requerimientos técnicos y ambientales que se adopten.

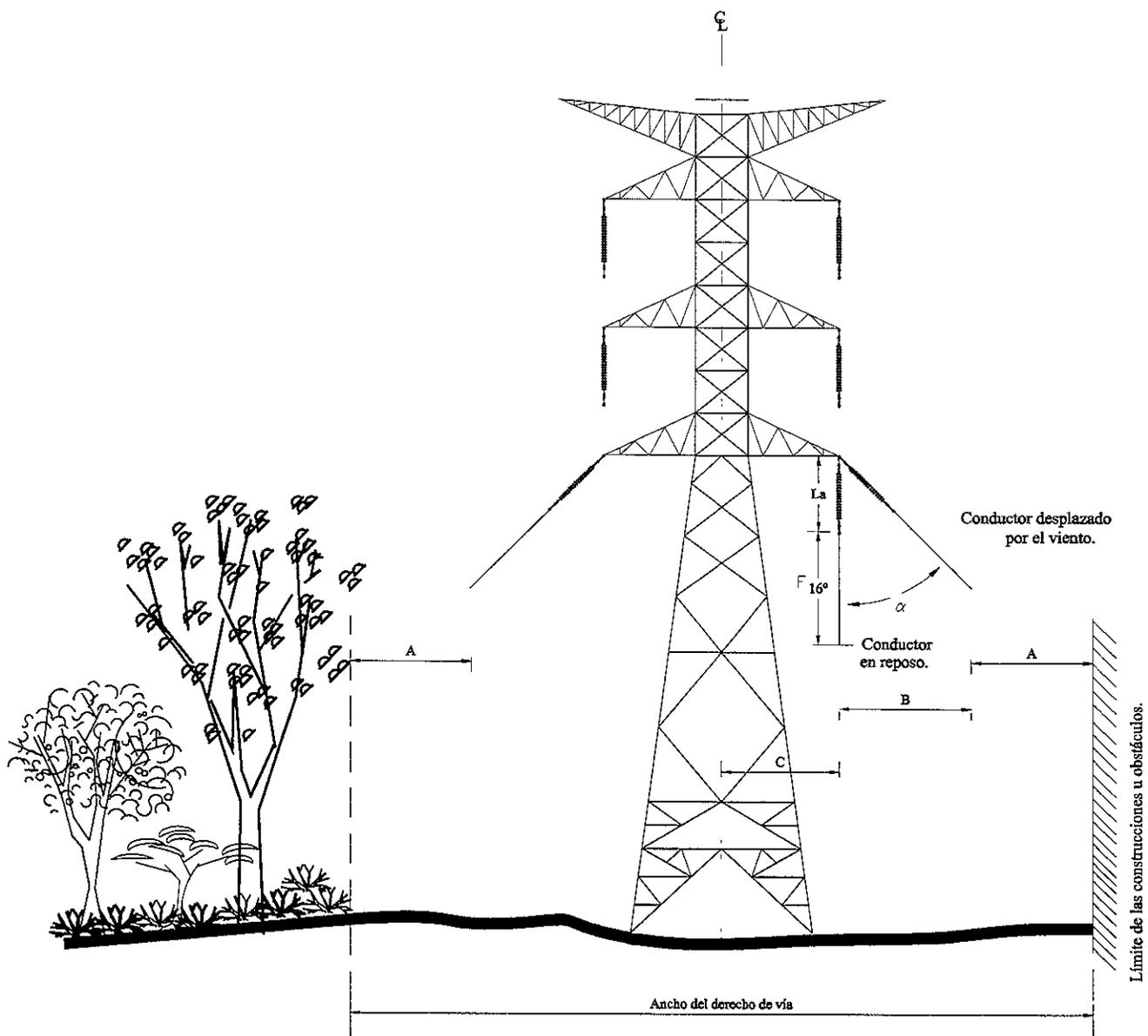
### 2.1.2 Objetivo del derecho de Vía

De manera general, los objetivos del derecho de vía son: disponer del área bajo las líneas, que permita su adecuada operación con máxima confiabilidad y el menor índice de salidas, en beneficio del servicio público eléctrico; facilitar su inspección y mantenimiento con las mínimas interferencias; proporcionar la seguridad necesaria a los residentes que se ubiquen en la vecindad de los conductores, para evitar la posibilidad de accidentes, debido a contacto directo o por el fenómeno de inducción (figura 2.2).

Los requisitos que deben cumplirse para que el derecho de vía sea funcional es que dentro del área que ocupa el derecho de vía, no deben de existir obstáculos ni construcciones de ninguna naturaleza, ni deben cultivarse dichos terrenos sin el consentimiento expreso del órgano regulador de la energía eléctrica.

De lo anterior se exceptúan los obstáculos en zonas urbanas, que son necesarios para la prestación de los servicios públicos, como instalaciones de alumbrado, líneas e comunicación, de señalización, etc., las cuales de cualquier manera deben cumplir con las distancias de seguridad y demás requisitos técnicos y legales vigentes.

Existen parámetros que influyen en la determinación del ancho de vía. Desde el punto de vista técnico, está integrado por el doble de la suma de las siguientes distancias



$$\text{Ancho del Derecho de Vía} = 2 [ A + ( L_a + F_{16^\circ} ) \text{Sen } \alpha + C ]$$

- A Separación horizontal mínima de seguridad.
- B Proyección (horizontal de la flecha mas la cadena de aisladores).
- C Distancia del eje de la estructura al conductor extremo en reposo.
- La Longitud oscilante de la cadena de aisladores.

|                          |     |      |       |        |
|--------------------------|-----|------|-------|--------|
| Efectos Ambientales      |     |      |       |        |
| Derecho de vía           |     |      |       |        |
| FILIBERTO ZAMORA SÁNCHEZ |     |      |       |        |
| FIGURA No.               | 2.2 | ESC. | ACOT. | HOJA.  |
|                          |     | S/E  | S/A   | 1 de 1 |

1. Separación eléctrica de seguridad.
2. Proyección horizontal de la flecha del conductor y de la longitud de la cadena de aisladores en suspensión (en su caso), según el ángulo de oscilación que produce la presión del viento.
3. Distancia del eje de la estructura al conductor extremo en reposo.

Estos parámetros varían de acuerdo con:

- La Tensión eléctrica nominal.
- El calibre del conductor.
- La magnitud de la presión del viento.
- El tipo de estructura.
- La zona donde se localice la línea.
- La altitud respecto al mar.

### 2.1.3 Cálculo del derecho de vía

Así por ejemplo para una línea de transmisión de 400 kV, dos circuitos y dos conductores por fase se tiene que:

A partir de la selección de la torre; tipo 4M2 d4, 400 kV Dos circuitos, 0° / 450 / 500 m de 0 a 2 200 msnm. Se procede al calculo mecánico para un conductor ASCR.

Cálculo mecánico de un conductor ASCR.

Características del conductor 1 113 KCM “Blue Jay”  
donde:

|            |  |                       |
|------------|--|-----------------------|
| A          | Área total de la sección transversal.      | [mm <sup>2</sup> ]    |
| Ø          | Diámetro externo total.                    | [mm]                  |
| T.R.       | Tensión de Ruptura.                        | [kg]                  |
| $\omega_c$ | Peso Aproximado.                           | [kg/m]                |
| $E_i$      | Módulo de elasticidad inicial.             | [kg/mm <sup>2</sup> ] |
| $E_f$      | Módulo de elasticidad final.               | [kg/mm <sup>2</sup> ] |
| $\alpha_i$ | Coefficiente de dilatación lineal inicial. | [1/°C]                |
| $\alpha_f$ | Coefficiente de dilatación lineal final.   | [1/°C]                |

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| A              | 602.967 mm <sup>2</sup>       |
| ∅              | 32 mm                         |
| ω <sub>c</sub> | 1.867 kg / m                  |
| T.R.           | 14043.030 kg                  |
| E <sub>i</sub> | 5483.40 kg / mm <sup>2</sup>  |
| E <sub>f</sub> | 6587.11 kg / mm <sup>2</sup>  |
| α <sub>i</sub> | 20.53 x 10 <sup>-6</sup> 1/°C |
| α <sub>f</sub> | 20.80 x 10 <sup>-6</sup> 1/°C |

Silueta de la estructura, que soportara a los cables conductores e hilos de guarda.

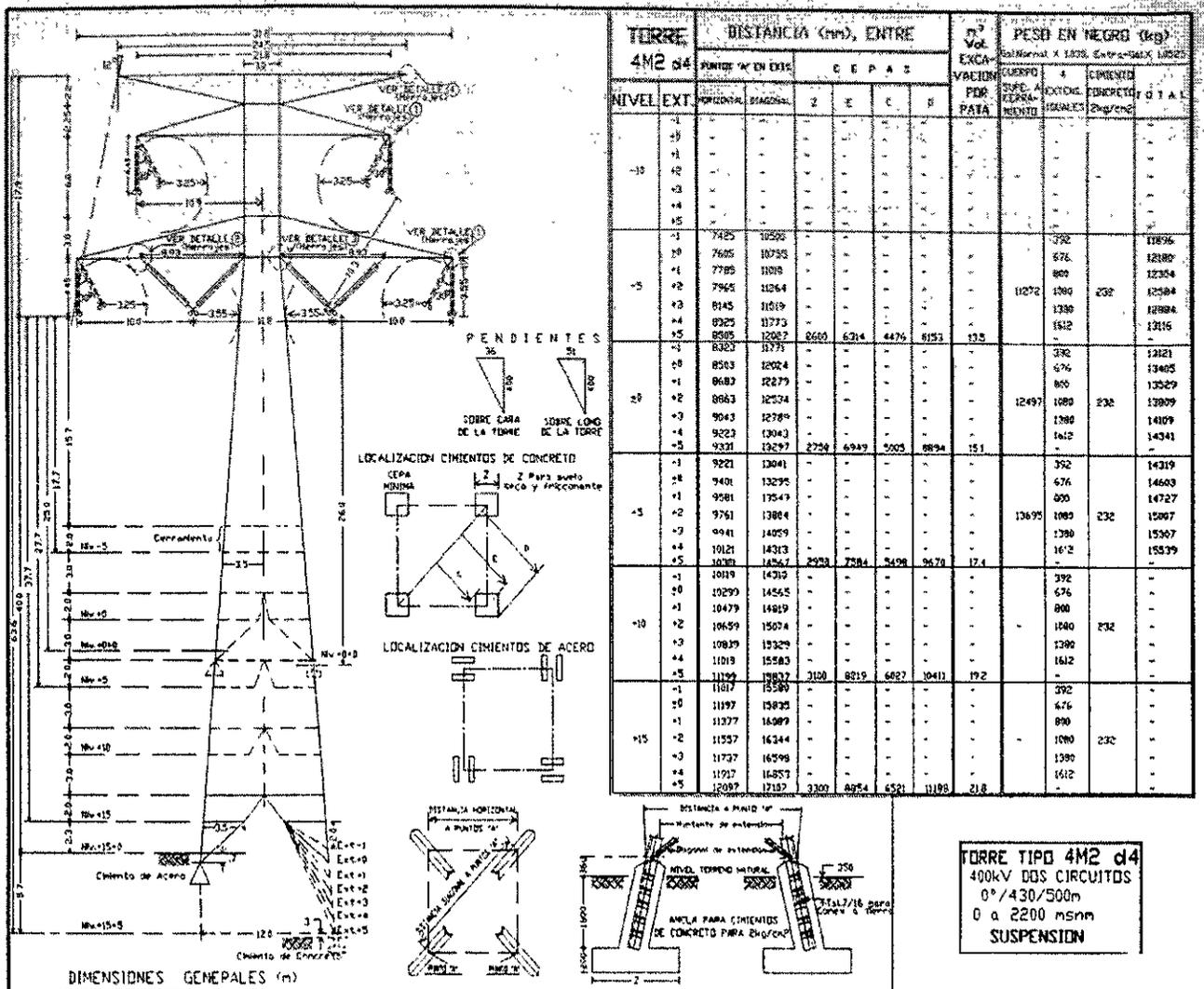


Figura 2.3 Silueta de la estructura 4M2 [3].

Para el calculo de las flechas y tensiones [1], [2] se hace uso de las siguientes ecuaciones:

La ecuación de cambio que representa el comportamiento de los conductores de una línea de transmisión y está dada por:

$$t_2^2 \left[ t_2 + \frac{\omega^2 a^2 m_1^2 E}{24 t_1^2} + \alpha E (\theta_2 - \theta_1) - t_1 \right] = \frac{\omega^2 E m_2^2 a^2}{24} \quad \dots\dots\dots(1)$$

donde:

|            |   |                         |
|------------|---|-------------------------|
| $t_1$      | Esfuerzo en el cable en condiciones iniciales.                        | [kg/mm <sup>2</sup> ]   |
| $t_2$      | Esfuerzo en el cable en condiciones finales.                          | [kg/mm <sup>2</sup> ]   |
| $\omega$   | Peso específico del cable.  | [kg/m-mm <sup>2</sup> ] |
| $m_1$      | Coefficiente de sobrecarga en el cable en condiciones iniciales.      | Adimensional            |
| $m_2$      | Coefficiente de sobrecarga en el cable en condiciones finales         | Adimensional            |
| $a$        | Claro base.   | [m]                     |
| $\theta_1$ | Temperatura de control inicial.                                       | [°C]                    |
| $\theta_2$ | Temperatura de control final.   | [°C]                    |
| $\alpha$   | Coefficiente de dilatación lineal del cable por grado de temperatura. | [1/°C]                  |
| $E$        | Módulo de elasticidad del cable.                                      | [kg/mm <sup>2</sup> ]   |
| $T_1$      | Tensión del cable en condiciones iniciales.                           | [kg]                    |
| $T_2$      | Tensión del cable en condiciones finales.                             | [kg]                    |

Las ecuaciones que complementan el cálculo de flechas y tensiones son las siguientes:

Tensión en condiciones iniciales.

$$T_1 = \frac{\omega \epsilon a^2}{8 f_1} \quad \dots\dots\dots(2)$$

donde:

|            |   |        |
|------------|---|--------|
| $T_1$      | Tensión del cable en condiciones iniciales. | [kg]   |
| a          | Claro base.                                 | [m]    |
| $\omega_c$ | Peso del conductor por unidad lineal .      | [kg/m] |
| $f_1$      | Flecha del cable en condiciones iniciales.  | [m]    |

Componente horizontal del esfuerzo en condiciones iniciales.

$$t_1 = \frac{T_1}{A} \quad \dots\dots\dots(3)$$

donde:

|       |  |                       |
|-------|--|-----------------------|
| $t_1$ | Esfuerzo en el cable en condiciones iniciales. | [kg/mm <sup>2</sup> ] |
| $T_1$ | Tensión del cable en condiciones iniciales.    | [kg]                  |
| A     | Área total del conductor.                      | [mm <sup>2</sup> ]    |

Tensión buscada en condiciones finales.

$$T_2 = t_2 A \quad \dots\dots\dots(4)$$

|       |  |                       |
|-------|--|-----------------------|
| $T_2$ | Tensión del cable en condiciones finales.  | [kg]                  |
| $t_2$ | Esfuerzo del cable en condiciones finales. | [kg/mm <sup>2</sup> ] |
| A     | Área total del conductor.                  | [mm <sup>2</sup> ]    |

Flecha máxima del cable (+50 °C).

$$f_{\text{máx}} = \text{Distancia del enganche del conductor al piso} - \text{Longitud total de cadena de suspensión} \quad \dots\dots\dots(5)$$

Flecha del cable en condiciones finales.

$$f_2 = \frac{\omega_c a^2}{8T_2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

donde:

|            |                                       |        |
|------------|---------------------------------------|--------|
| $f_2$      | Flecha en condiciones finales.        | [m]    |
| $\omega_c$ | Peso del conductor por unidad lineal. | [kg/m] |
| $a$        | Claro base.                           | [m]    |
| $T_2$      | Tensión en condiciones finales.       | [kg]   |

Peso específico del cable.

$$\omega = \frac{\omega_c}{A} \quad \dots\dots\dots(7)$$

donde:

|            |                                       |                         |
|------------|---------------------------------------|-------------------------|
| $\omega$   | Peso específico del cable.            | [kg/m-mm <sup>2</sup> ] |
| $A$        | Área total del conductor.             | [mm <sup>2</sup> ]      |
| $\omega_c$ | Peso del conductor por unidad lineal. | [kg/m]                  |

El cálculo se efectuara a la condición ambiental e 16 ° C.

A partir de una hipótesis donde bajo la condición inicial de una temperatura a + 50 °C y considerando el 18.5 % de la tensión de ruptura del cable (T.R.).

Sí T.R. = 14 043 kg                      18.5 % de la T.R. = 2 597.96 kg

$T_1 = 2 597.96$  kg

El claro base se obtiene despejando  $a$  de la ecuación (2).

$$a = \sqrt{\frac{8(2597.960\text{kg})(13.80\text{m})}{1.867\text{kg/m}}} = 391.948\text{m}$$

La flecha máxima a  $+50^\circ\text{C}$  está dada por la ecuación (5).

$$f_{\text{máx}} = 26.00\text{ m} - 12.20\text{ m} = 13.80\text{ m}$$

El peso específico aplicando la ecuación (7).

$$\omega = \frac{1.867\text{kg/m}}{391.948\text{mm}^2} = 4.80 \times 10^{-3}\text{kg/m-mm}^2$$

El esfuerzo en el cable en condiciones iniciales, según la ecuación (3).

$$t_1 = \frac{2597.960\text{kg}}{391.948\text{mm}^2} = 6.628\text{kg/mm}^2$$

$m_2$  valdrá la unidad, debido a que no existen sobrecargas.

Calculo de las tensiones a  $+16^\circ\text{C}$ , aplicando la ecuación de cambio de estado (1).

$$t_1 = 6.628\text{ kg/mm}^2$$

$$\theta_1 = +50^\circ\text{C}$$

$$t_2 = ?$$

$$\theta_2 = +16^\circ\text{C}$$

$$m_1 = 1$$

$$m_2 = 1$$

$$\alpha = 20.80 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = ?$$

$$E_f = 6587.11\text{ kg/mm}^2$$

$$f_2 = ?$$

$$t_2^2 \left[ t_2 + \frac{\left(4.80 \times 10^{-3}\text{kg/m-mm}^2\right)^2 \left(6587.11\text{kg/mm}^2\right) (391.948\text{m})^2}{24 \left(6.628\text{kg/mm}^2\right)^2} \right]$$

$$+ \left( 20.80 \times 10^{-6} 1/^{\circ}C \right) \left( 6587.11 \text{ kg/mm}^2 \right) \left( t_2 - 50^{\circ}C \right) - 6.628 \text{ kg/mm}^2 \left. \right]$$

$$= \frac{\left( 4.80 \times 10^{-3} \text{ kg/m-mm}^2 \right)^2 \left( 6587.11 \text{ kg/mm}^2 \right) \left( 391.948 \text{ m} \right)^2}{24}$$

$$t_2^2 \left[ t_2 + 22.113 \text{ kg/mm}^2 + \left( 0.140 \text{ kg/mm}^2 \cdot ^{\circ}C \right) \left( 16^{\circ}C - 50^{\circ}C \right) - 6.628 \text{ kg/mm}^2 \right] = 971.455 \text{ kg}^3 / \text{mm}^6$$

$$t_2^2 \left[ t_2 + 10.827 \text{ kg/mm}^2 \right] = 971.455 \text{ kg}^3 / \text{mm}^6$$

El valor del esfuerzo en el cable en condiciones finales es igual a:

$$t_2 = 7.313 \text{ kg/mm}^2$$

Tensión buscada en condiciones finales:

$$T_2 = \left( 7.317 \text{ kg/mm}^2 \right) \left( 391.948 \text{ mm}^2 \right) = 2867.833 \text{ kg} \quad 20.4\% \text{ de la T.R.}$$

La flecha en condiciones finales está dada por

$$f_2 = \frac{(1.867 \text{ kg/m})(391.948 \text{ m})^2}{8(2867.8835 \text{ kg})} = 12.50 \text{ m}$$

Determinación del ancho del derecho de vía [4] según la especificación del órgano encargado del sector eléctrico:

La información de entrada:

|                             |                      |
|-----------------------------|----------------------|
| Tipo estructura             | 4M2                  |
| 2 conductores ASCR por fase | 1 113 KCM "Blue Jay" |
| $F_{16^{\circ}C}$           | 12.50 m              |

Considerando un ángulo máximo de desplazamiento de la cadena de aisladores igual a  $\alpha = 30^{\circ}$ .

$$\text{Ancho del derecho de vía} = 2[A + (L_a + F_{16^{\circ}C})\text{sen } \alpha + C]$$

Igual a:

$$\text{Ancho del derecho de vía} = 2[A + B + C]$$

donde:

A = Separación mínima de seguridad.

B =  $[(L_a + F_{16^{\circ}C})\text{Sen } \alpha]$  Proyección (horizontal de la flecha mas la cadena de aisladores).

C = Distancia del eje de la estructura al conductor extremo en reposo.

Ver figura 2.2.

Calculando A:

De la tabla 2.2 se obtiene la separación horizontal mínima de conductores a edificios, construcciones y cualquier otro obstáculo:

$$A = (\text{Porcentaje de separación mínima}) (\text{Separación mínima}) \quad [\text{m}]$$

donde:

El porcentaje de separación mínima es debido a que las distancias indicadas en la tabla 2.2 de dicha especificación, se incrementarán 1 % por cada 100 m de altitud que rebase los 1 000 msnm.

Para el caso en particular se usará la altitud máxima sobre el nivel de mar de diseño de la estructura 4M2 (d4), igual a 2 200 msnm.

| Voltaje nominal entre fases (V) | Distancia horizontal mínima (m) |
|---------------------------------|---------------------------------|
| De 150 a 600                    | 1.0                             |
| hasta 6 600                     | 1.20                            |
| 13 800                          | 1.35                            |
| 23 000                          | 1.40                            |
| 34 500                          | 1.45                            |
| 69 000                          | 1.80                            |
| 85 000                          | 2.00                            |
| 115 000                         | 2.30                            |
| 138 000                         | 2.40                            |
| 150 000                         | 2.40                            |
| 161 000                         | 2.90                            |
| 230 000                         | 3.20                            |
| 400 000                         | 4.00                            |

Tabla 2.2 Separación horizontal mínima de conductores a edificios construcciones y cualquier otro obstáculo [4].

$$(1.12) (4.00 \text{ m}) = 4.48 \text{ m}$$

$$A = 4.48 \text{ m}$$

Calculando B:

$$B = [(Longitud \text{ máxima de la cadena de aisladores} + Flecha \text{ a } 16^\circ \text{ C})(\text{Sen } \alpha)] \quad [\text{m}]$$

$$(4.20 \text{ m} + 12.50 \text{ m}) \text{ Sen } \alpha(30^\circ) = 8.35 \text{ m}$$

$$B = 8.35 \text{ m}$$

Calculando C:

De la silueta de la torre se obtiene la distancia C [m]; del eje de la estructura al conductor extremo en reposo.

$$C = 15.9 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$\text{Ancho del derecho de vía} = 2[A + B + C]$$

$$\text{Ancho del derecho de vía} = 2 [4.48 \text{ m} + 8.35 \text{ m} + 15.9 \text{ m}]$$

$$\text{Ancho del derecho de vía} = 57.460 \text{ m}$$

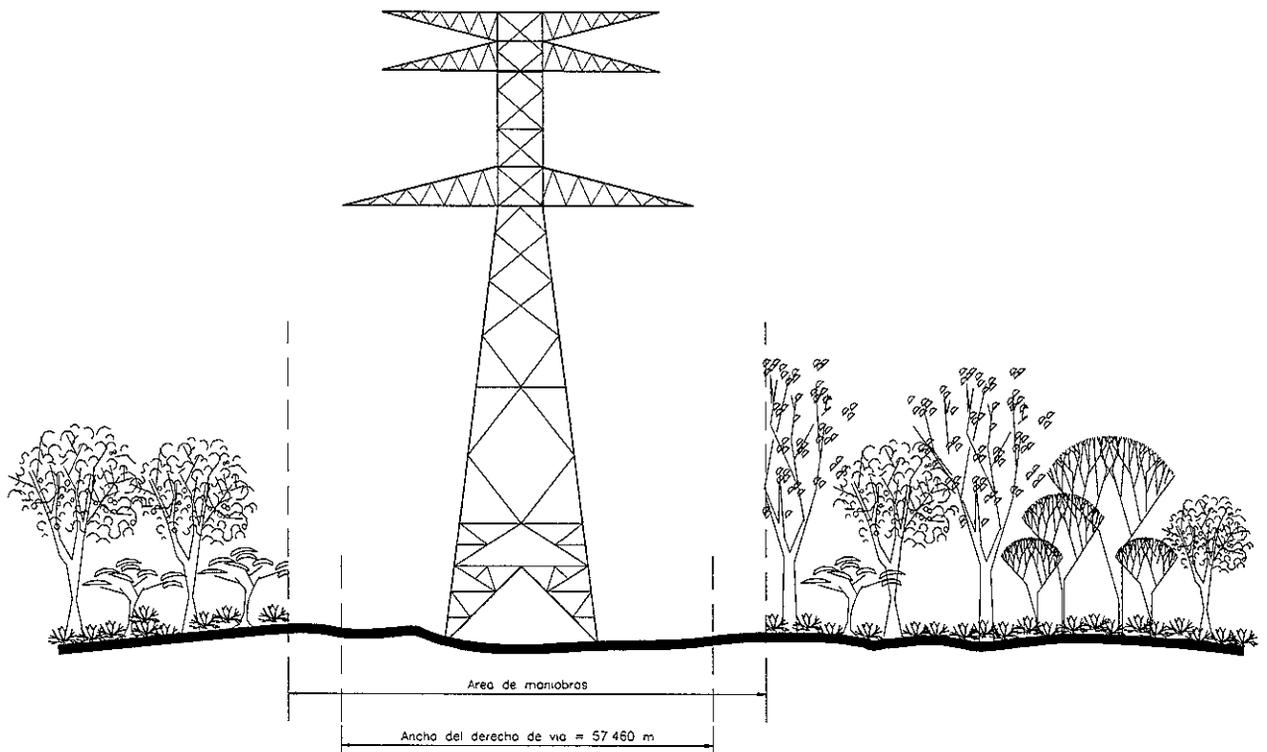


Figura 2.4 Ancho del derecho de vía.

### 2.1.4 Localización del derecho de vía

Las recomendaciones orientadas a la localización del derecho de vía buscan minimizar los impactos que pudieran ocasionar la línea de transmisión al cruzar bosques, carreteras, pendientes, zonas urbanas, tierras de cultivo, sembradíos de alto valor, áreas naturales y escénicas, reservas ecológicas,



Figura 2.5 Consideraciones en la localización del derecho de vía, línea de transmisión Oaxaca Potencia – Oaxaca II.

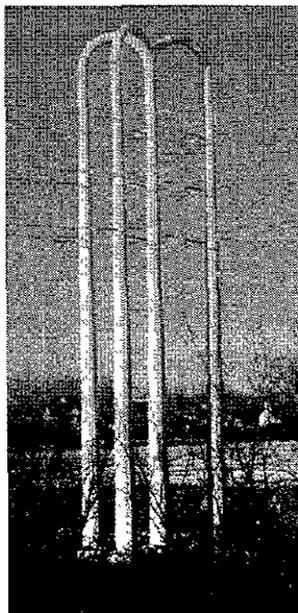
reservas de la biosfera y zonas arqueológicas y turísticas, sin embargo, si la ubicación resulta inevitable en estas áreas, se proporcionan diversas recomendaciones que disminuyen el efecto visual, estético y social de la línea de transmisión.

Las recomendaciones asociadas con la localización del Derecho de Vía son las siguientes:

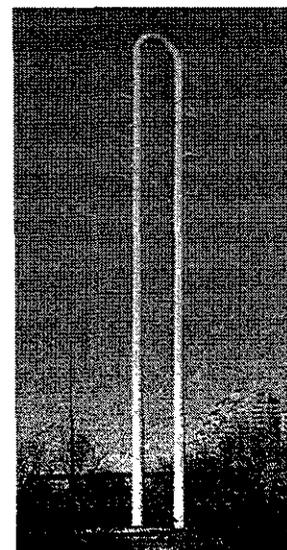
- Cumplir con todas las leyes y reglamentos de los órganos en materia de protección ambiental, así como los demás organismos públicos Federales, Estatales o Municipales.
- A través del cumplimiento de las leyes, disposiciones y acuerdos emitidos por la SEMARNAP, las trayectorias podrán minimizar sus efectos adversos al ecosistema y paisaje.
- La ruta del derecho de vía debe de evitar lagunas, esteros, pantanos, zonas inundables, playas, áreas protegidas, etc.
- Para armonizar la línea con el medio ambiente, se debe de considerar el uso de postes tubulares, de mejor estética, cuando por la función propia de la línea de transmisión se tenga



765 kV –Un Circuito



115 kV -Triple Circuito



115 kV –Triple Circuito

Figura 2.6 Uso de postes para minimizar el impacto visual en líneas de transmisión , Thomas & Betts –Memphis U.S.A-

que pasar por zonas turísticas en función o evidentemente potenciales, así como en zonas arqueológicas o de valor histórico. Asimismo, pasar lo más razonablemente alejado de núcleos de población. Esto reducirá el impacto visual y el derecho de vía respectivo.

- De acuerdo con las zonas protegidas, evitar áreas de concentración de animales silvestres, rutas migratorias, zonas donde existan especies endémicas, amenazadas o en peligro de extinción.
- Se debe tener en cuenta el uso compartido del derecho de vía de diferentes clases de servicios, considerando que para cuidar el impacto visual, deberán compartirse lo menos posible las carreteras con las líneas de transmisión en zonas escénicas.
- En áreas escénicas y al cruzar carreteras, se recomienda que la trayectoria de la línea se desvíe ocasionalmente para evitar que se simule un túnel y se observe el corredor del derecho de vía.

- Donde sea posible, las líneas deberán localizarse con un fondo topográfico de pantalla natural, de tal forma que se oculte a la vista.
- Buscar que la trayectoria seleccionada para las nuevas líneas de transmisión, presenten el menor número de cruzamientos con líneas de transmisión en servicio, vías de ferrocarril, carreteras y ríos.
- Para minimizar los impactos económicos, tratar que la trayectoria seleccionada para las nuevas líneas de transmisión, presenten el menor número de puntos de inflexión, la menor longitud posible, así como facilidad de acceso y construcción.
- Alejarse de la contaminación marina e industrial así como de terrenos erosionados o agresivos.
- Reconocimiento terrestre en forma detallada de todas las opciones de la ruta consideradas y de las que surjan como factibles.
- De ser posible y conveniente, efectuar un reconocimiento aéreo de las opciones de la ruta, ya afinadas después del recorrido.
- La localización del derecho de vía debe buscar la cercanía a carreteras y caminos de terracería para facilidad de construcción, revisión y mantenimiento. Sin embargo, se recomienda evitar el cruce de carreteras perpendicularmente, partes bajas de cañones y valles; si el cruce es inevitable, cruzar diagonalmente en forma no pronunciada.
- En el cruce de carreteras con zonas boscosas, se pueden dejar pantallas en el borde de la carretera para evitar la vista del derecho de vía.
- En la medida de lo posible deberán evitarse las vistas largas de líneas de transmisión paralelas a las vías de comunicación (carreteras, vías de ferrocarril).
- Cuando la carretera siga la trayectoria de un cañón, se recomienda que la línea cruce la carretera por la parte alta del cañón.
- Pasar el corredor de la línea de transmisión lo más razonablemente alejado de núcleos de población.
- Cuando las líneas de transmisión crucen cañones localizados en zonas boscosas, se pueden emplear torres de gran claro, para mantener las líneas por arriba de los árboles y así limpiar menos la vegetación.
- Para minimizar daños a los ecosistemas y medio ambiente, evitar bosques, huertas, sembradíos de alto valor y preferentemente no cruzar por zonas selváticas y agrícolas.

### **2.1.5 Selección del derecho de vía**

Esta etapa tiene por objeto tanto definir la ruta que une los puntos extremos de la línea, como la realización de las acciones que dejen preparado el terreno para la colocación de la línea, es decir, el manejo de vegetación dentro del derecho de vía de la zona.

Una vez realizado el cálculo del ancho de vía y determinadas las distancias óptimas para el voltaje considerado, deberán incorporarse las diversas recomendaciones y criterios para minimizar el impacto ambiental, social, estético y económico que pudiera, producir la trayectoria seleccionada para la línea de transmisión, con base a lo descrito anteriormente.

Con objeto de facilitar la selección del ancho del derecho de vía para líneas aéreas con estructuras normalizadas, cuyas características de diseño son las más usuales en el organismo encargado del sector eléctrico, la norma sobre derechos de vía incluye tablas específicas que muestran los valores normalizados para el ancho del derecho de vía, así como las principales características de identificación que sirvieron de base para la elaboración de dichas tablas. En

dichas tablas, se dan los valores del ancho del derecho de vía, para líneas de transmisión con estructuras tipo rural y urbanas.

Las recomendaciones para reducir el ancho del derecho de vía en zonas costosas o conflictivas, como por ejemplo en áreas con cultivos como café, árboles frutales, etc., o bien terrenos urbanos con serios problemas para la obtención del derecho de vía, es factible aplicar, previo estudio técnico-económico una o más de las siguientes medidas, con objeto de disminuir el ancho necesario para el paso de la línea:

- Limitar en alguna otra forma la oscilación transversal de los conductores (cadenas de aisladores en "V", aisladores tipo poste, etc.).
- Utilizar la disposición vertical de los conductores.
- Reducir la flecha (incrementando la tensión mecánica de los conductores) y la longitud de los claros.



2.7 Estructuras acondicionadas al terreno, Powerlink -Queensland's, Australia-[5].

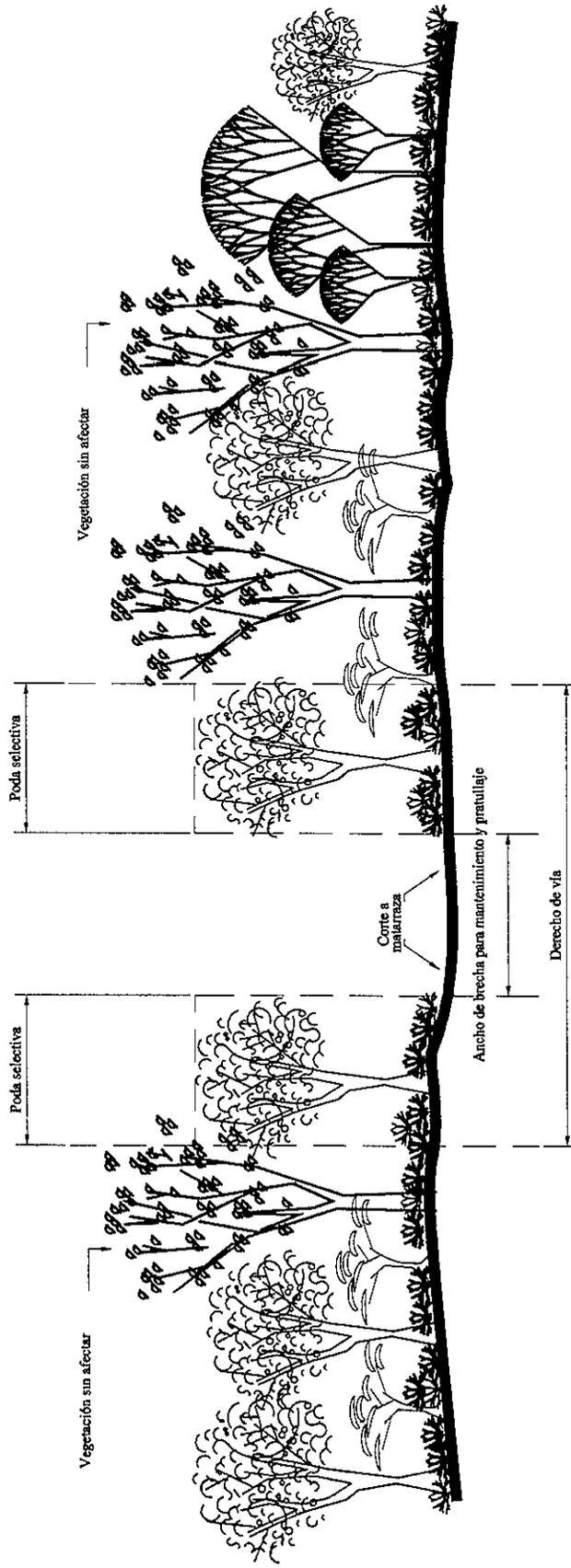
Cuando exista la necesidad de instalar una línea en zonas urbanas densa o en una zona rural con cultivos costosos, en las que no es posible obtener el derecho de vía, es factible incrementar el libramiento de los conductores al piso, en cuyo caso sólo debe gestionarse la obtención del área necesaria para la base de las estructuras y el acceso a las mismas. Con esta solución obviamente tampoco deberán existir construcciones bajo la línea, debiendo mantenerse las distancias eléctricas mínimas de seguridad, lo que evitará el peligro a las personas y garantizará la continuidad del servicio.

### 2.1.6 Manejo de vegetación dentro del derecho de vía del derecho de vía

Para mitigar los daños ocasionados a la flora, fauna y suelo del área seleccionada para la construcción del derecho de vía, el procedimiento para llevar a cabo estas acciones es conocido como manejo de vegetación dentro del derecho de vía (figuras 2.8). Es recomendable:

El tiempo y método de manejo de vegetación dentro del derecho de vía deberá tomar en consideración, para cada sitio, la estabilidad de la tierra, la protección de la vegetación natural, y la protección de recursos adyacentes, así como la protección del hábitat natural de la vida silvestre.

- Los árboles que interfieran con el derecho de vía deberán ser cortados y removidos en forma selectiva a través de métodos de corte efectivos (sin desgajar las ramas).



Efectos Ambientales

Manejo de la vegetación dentro del derecho de vía

FILIBERTO ZAMORA SÁNCHEZ

FIGURA No.

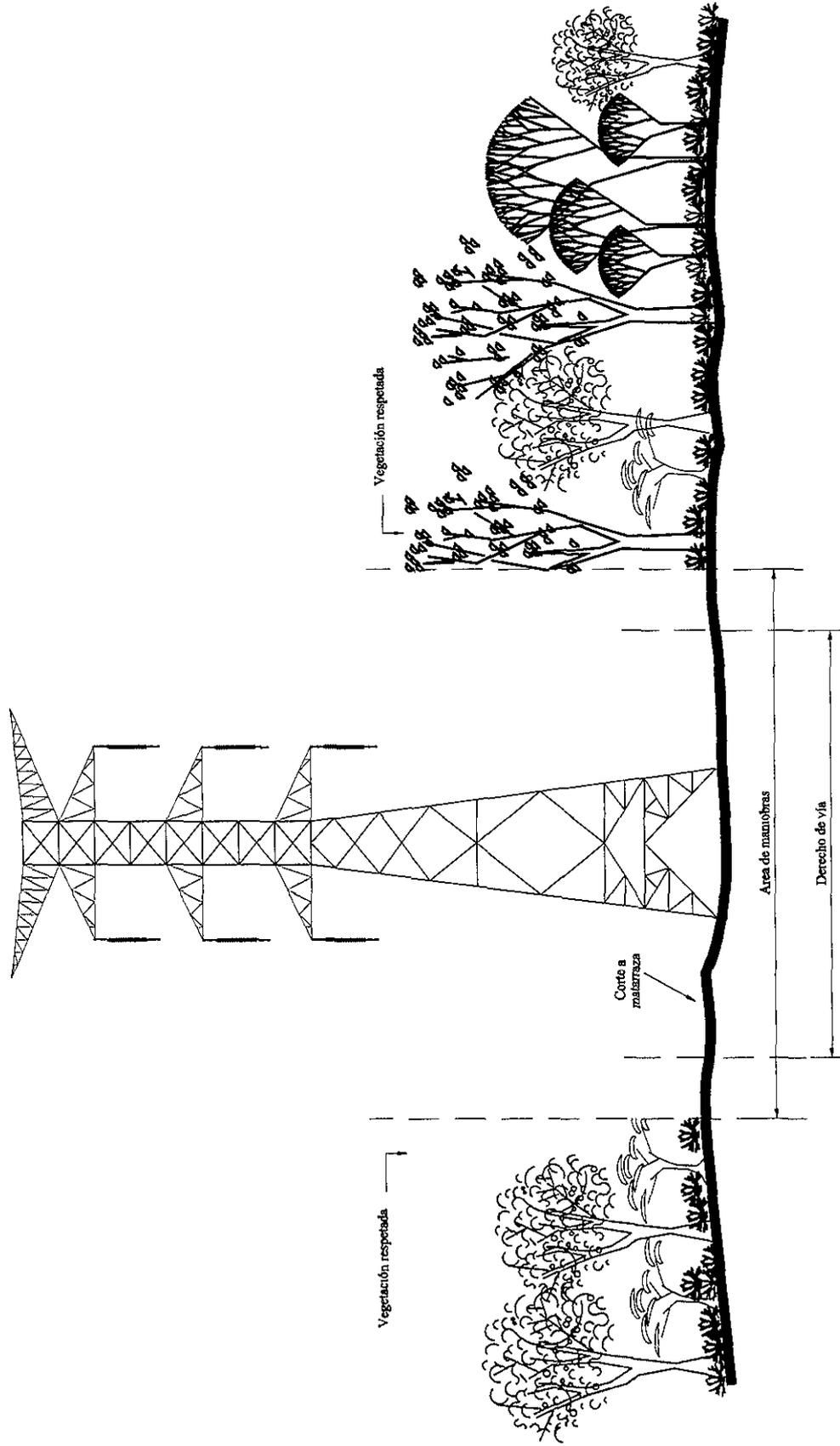
2.8

ESC. S/E

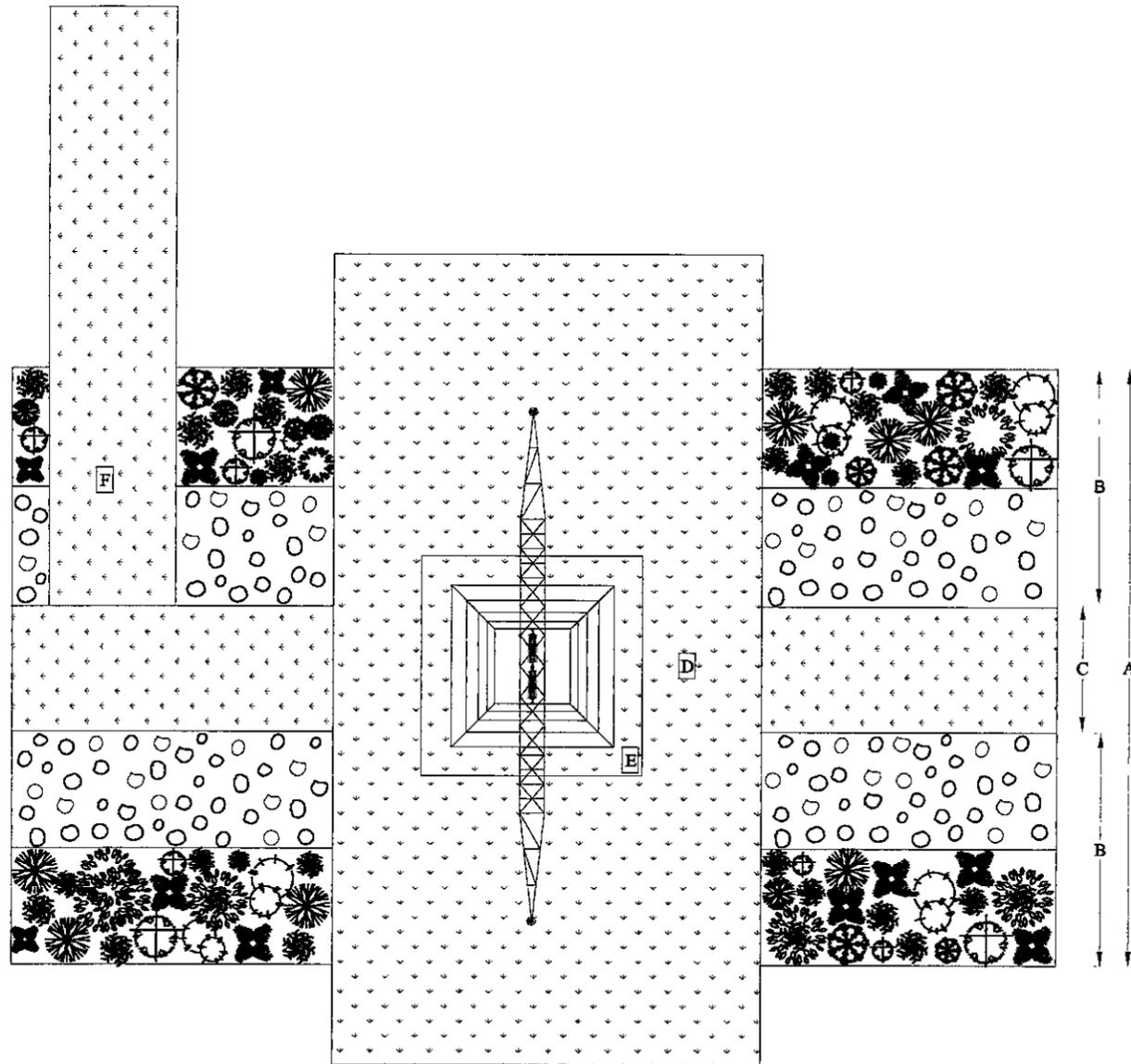
ACOT. S/A

HOJA:

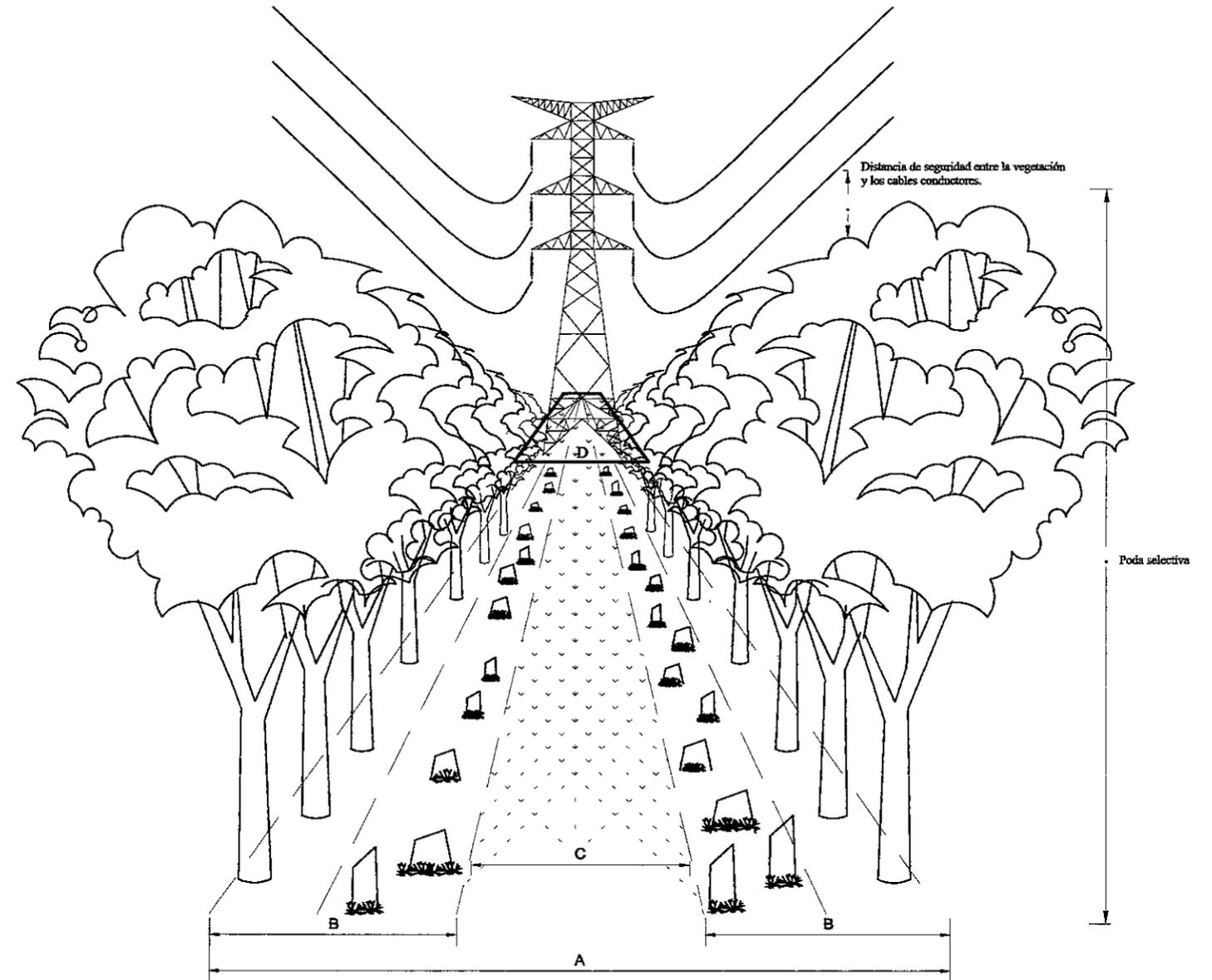
1 de 3



|  |     |      |     |       |     |       |        |
|--|-----|------|-----|-------|-----|-------|--------|
| Efectos Ambientales                            |     |      |     |       |     |       |        |
| Mancjo de vegetación dentro del derecho de vía |     |      |     |       |     |       |        |
| FILIBERTO ZAMORA SÁNCHEZ                       |     |      |     |       |     |       |        |
| FIGURA No.                                     | 2.8 | ESC. | S/E | ACOT. | S/A | HOJA: | 2 de 3 |



- A Ancho del derecho de vía
  - B Ancho de la brecha forestal
  - C Ancho de brecha de maniobra y patrullaje
  - D Área de maniobras para el montaje de estructuras
  - E Área de la base de la estructura
  - F Camino de acceso fuera del derecho de vía.
- Desmonte a matarrasa
  - Derribo y poda selectiva
  - Derribo dejando tocones (cuando sea necesario).



Dentro del ancho de la brecha forestal, se efectúa la poda selectiva a las especies arbustivas que rebasen los límites de seguridad, y el derribo de vegetación dejando tocones.

|   |     |             |              |                 |
|---|-----|-------------|--------------|-----------------|
| Efectos Ambientales                               |     |             |              |                 |
| Manejo de la vegetación dentro del derecho de vía |     |             |              |                 |
| FILIBERTO ZAMORA SÁNCHEZ                          |     |             |              |                 |
| FIGURA No.  | 2.8 | ESC.<br>S/E | ACOT.<br>S/A | HOJA:<br>3 de 3 |

- Se debe de planear la utilización de los caminos existentes cerca del área a desmontar, para así evitar la construcción de otros.
- El manejo de vegetación dentro del derecho de vía deberá ser el mínimo necesario, para prevenir la interferencia de árboles y vegetación con la línea de transmisión.
- Cuando el derecho de vía cruce algún arroyo o río, se deberá llevar a cabo un manejo de vegetación dentro del derecho de vía selectivo en los márgenes de la corriente.
- El uso de helicóptero para la construcción y mantenimiento del derecho de vía deberá ser considerado en áreas montañosas y escénicas. Esto permite que el derecho de vía se ubique en áreas más remotas minimizando los impactos ambientales, estéticos y sociales.
- En los trabajos de construcción de líneas, se recomienda utilizar equipo de tracción que disperse su peso sobre un área de contacto, para así reducir la compactación del terreno y evitar problemas de erosión.
- En sitios donde dos o más circuitos crucen carreteras, la compactación de líneas es efectiva para minimizar el impacto visual.
- En la limpieza de las trayectorias de las líneas de transmisión, se deberá evitar el uso de productos químicos y de fuego, para minimizar la erosión, la muerte de la fauna silvestre de los alrededores, la contaminación del agua y prevenir los incendios forestales.
- Los residuos distintos a los generados por el desmonte se deberán retirar para su depósito en lugares apropiados para no causar daños a los ecosistemas.
- Árboles, arbustos, pastos y la capa superior de la tierra que no se manejo de vegetación dentro del derecho de vía, deberá ser protegida durante la construcción de la línea de transmisión.

### **2.1.7 Restauración del derecho de vía**

Para la restauración del derecho de vía se consideran las acciones necesarias para corregir el daño ocasionado al terreno durante las etapas de tendido de la línea. Estas recomendaciones están enfocadas principalmente a evitar la erosión mediante la replantación y protección del terreno donde se construyó la línea de transmisión.

- Una vez concluida la obra se procede a la reforestación del área.
- La tierra que ha sido extraída durante la construcción y que no es usada, deberá ser esparcida o removida del área desmontada.
- Los daños ocasionados a la superficie del terreno, deberán ser reparados con tierra o vegetación apropiada y de acuerdo a las condiciones locales y naturales.
- Los arbustos y árboles de la región deberán ser dejados en el lugar o plantados al azar cerca de las orillas del derecho de vía adyacentes a los caminos.
- En vez de ser quemados, los arbustos y maderas pueden ser transformados en astillas y dispersadas en la zona afectada.

### **2.1.8 Mantenimiento del derecho de vía**

Aún cuando el mantenimiento del derecho de vía representa la tarea, siempre presente, que todas las empresas eléctricas deben desempeñar, sus programas de mantenimiento varían ampliamente de una compañía a otra.

La razón principal del mantenimiento del derecho de vía es garantizar la confiabilidad, a medida que las líneas operan en los límites de su capacidad de diseño. La continuidad del flujo de potencia adquiere mayor importancia. Si los árboles se dejan sin control, crecen a tal altura que pueden hacer contacto con las líneas, lo que trae como consecuencia fallas e interrupciones de energía. Asimismo, cuando se deja que la vegetación se haga demasiado espesa, puede obstruir el paso de vehículos del personal, impidiéndoles que utilicen el derecho de vía durante las maniobras de inspección y reparación.

Las razones que explican por qué los programas de mantenimiento del derecho de vía varían son:

- La variedad de condiciones climáticas, de terreno y de las especies vegetales.
- El capital disponible para establecer programas.
- El nivel al cual se ubique el terreno –rural, semiurbano o urbano–.
- Las preferencias entre los usuarios.
- Las restricciones ambientales.

El derecho de vía es importante desde el punto de vista del medio ambiente, ya que los animales requieren diferentes tipos de plantas para anidar, alimentarse, reproducirse y descansar. En consecuencia, es frecuente que los animales se congreguen a las orillas de los bosques para conseguir todo lo que necesitan sin tener que recorrer una gran distancia. En la naturaleza, los límites de los bosques se encuentran en lugares que rodean a los lagos. Bajo esta consideración, el derecho de vía sirve como frontera artificial e influye sobre los hábitos de los animales.

A menudo los ecologistas se refieren al establecimiento y mantenimiento del derecho de vía de las líneas de transmisión como uno de los ataques más grandes que cometen las empresas eléctricas contra la naturaleza. Sin embargo, hoy en día las empresas y los grupos relacionados con el medio ambiente han descubierto que este mantenimiento puede llevarse a cabo, de acuerdo con la naturaleza, en beneficio del medio ambiente. En algunos casos, la participación en programas ambientales también puede beneficiar realmente a la empresa.

Por esta razón, las recomendaciones y criterios formulados a continuación, tienen por objeto lograr la armonía entre las líneas de transmisión y el medio ambiente durante el mantenimiento de las instalaciones eléctricas.

Las recomendaciones que se dan a continuación consideran aspectos relacionados con:

- Poda selectiva e inspección (terrestre o aérea).
- Sugerencias para minimizar daños durante el mantenimiento.

Recomendaciones:

- Deben efectuarse en forma programada inspecciones periódicas, en función de la importancia de la línea y del tipo de zona que cruce.
- En zonas urbanas y semiurbanas se recomienda incrementar la periodicidad de las inspecciones, de tal manera que oportunamente se puedan detectar y reportar las construcciones incipientes que afecten el derecho de vía.
- En zonas urbanas y rurales, se debe tener especial cuidado en reportar conflictos en las líneas debido al crecimiento de la vegetación y a los tipos de cultivos que se realizan.

- En la proximidad de los conductores, deben de ser podadas las ramas de grandes arboles para evitar que el desprendimiento y/o movimiento de éstas o el movimiento de los propios conductores, pueda ocasionar fallas a tierra o entre fases.
- Se recomienda realizar una inspección del derecho de vía a pie cada dos años y una anual con helicóptero. La inspección a pie se debe realizar en el verano, de modo que sean muy notorios los efectos de crecimiento en las plantas por la primavera.
- Las actividades de inspección aérea y terrestre de las líneas de transmisión debe de incluir la observación de la erosión, árboles caídos y condiciones de la vegetación que requieran atención.
- Para que la naturaleza se beneficie con el mantenimiento del derecho de vía, se pueden implementar programas ambientales tales como: habitats para la vida silvestre; cuidar las características naturales y biológicas del área; y permitir el uso del sitio por grupos interesados por la vida silvestre.
- El uso de herbicidas, al comenzar la temporada de crecimiento, permite que sean destruidas las semillas antes de que tengan la oportunidad de brotar.
- Cuando se usen sustancias químicas, éstas deberán ser seleccionadas para preservar el medio ambiente natural. En áreas escénicas, el impacto de la decoloración temporal del follaje deberá considerarse.
- La poda con helicóptero se recomienda realizarse cuando es inaccesible el tránsito de vehículos terrestres en los terrenos de la línea, o cuando se trata de ecosistemas frágiles a los que se podrían dañar.
- Se recomienda usar la poda selectiva en el derecho de vía en lugar de la poda total, ya que esta primera permite preservar el paisaje.

### 2.1.9 Usos adicionales del derecho de vía

Con base en los requisitos que deben cumplirse para que el derecho de vía sea funcional, los usos adicionales que puedan darse al derecho de vía son restringidos y deben de tener la previa autorización del órgano encargado del sector eléctrico.

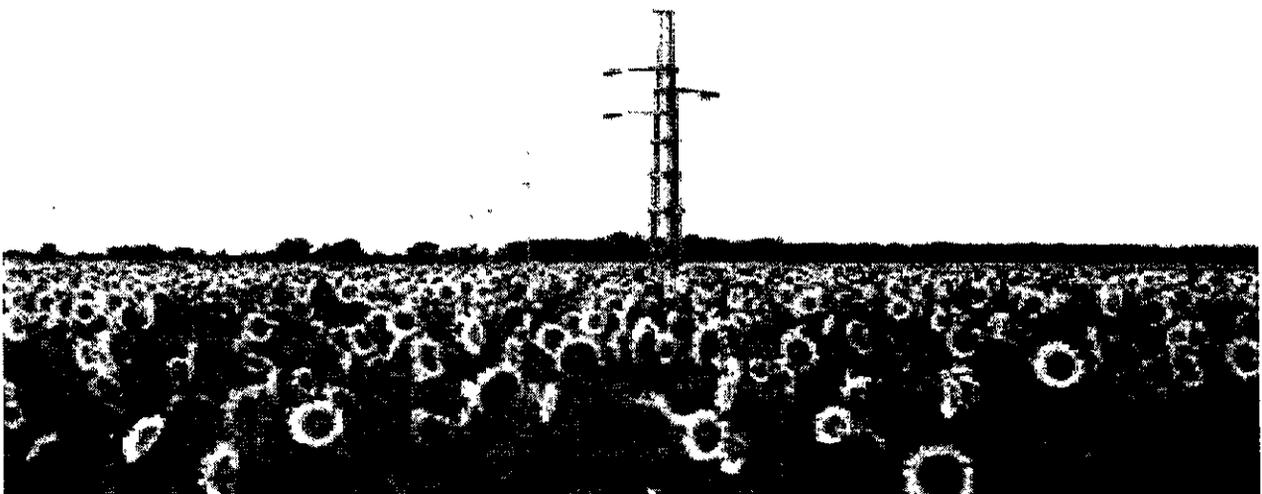


Figura 2.9 Utilización de postes y uso adicional de derecho de vía.

Algunos usos adicionales para el derecho de vía, permisibles por parte del sector eléctrico, debido a que generalmente no afectan la adecuada seguridad del público y la operación de las instalaciones, son: Jardines públicos o viveros con vegetación de altura restringida a 2 metros; vialidades o áreas de estacionamientos de vehículos.

Un uso secundario del derecho de vía, puede ser la plantación de pequeños pinos y plantas de ornato, los cuales durante su desarrollo impiden el crecimiento de otros vegetales.

La aceptación pública de los derechos de vía puede ser mayor cuando es compatible con múltiples usos, tales como: áreas de recreo, parques nacionales, pistas para caballos y bicicletas, campos de golf, reservas ecológicas, viveros y pistas atléticas.

Es importante la instalación de avisos en los cruzamientos con vías de comunicación, así como en las zonas urbanas y semiurbanas, se recomienda instalar en las estructuras avisos que indiquen el ancho del derecho de vía al igual que indiquen las diversas medidas que se deben tener presentes al estar cerca de las instalaciones eléctricas.

Debido a los problemas de invasión del derecho de vía, que a la fecha se han presentado, se recomienda realizar campañas publicitarias por los distintos medios de comunicación masiva, con el objeto de resaltar la importancia de respetar el derecho de vía de las líneas de transmisión y los peligros que implica su invasión.

## 2.2 Campos electromagnéticos generados por líneas de transmisión

El creciente empleo de líneas de transmisión de muy alto voltaje, ha incrementado la importancia de los efectos de los campos eléctrico y magnético que generan estas líneas. Esto a su vez, ha incrementado la actividad de investigación en las siguientes áreas: técnicas de cálculo y medición de campos eléctrico y magnético; Cálculo y medición de voltajes y corrientes inducidos en seres vivos debido a diferentes mecanismos de inducción; investigaciones sobre la sensibilidad de las personas a diferentes efectos de los campos; estudio de condiciones causantes de ignición de combustible, efecto corona y otros posibles efectos de los campos.

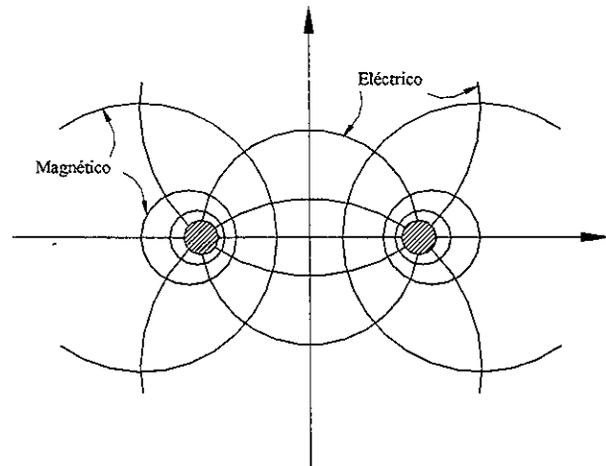


Figura 2.10 Campo eléctrico y magnético asociado a conductores de una línea de transmisión.

Los campos eléctrico y magnético son vectores en el espacio que están presentes en el medio en el que se encuentran las líneas de transmisión, siempre y cuando exista voltaje y corriente en ellas. Con el fin de ilustrar apropiadamente los procedimientos de cálculo disponible y justificar la selección de uno de ellos para aplicarse en la evaluación analítica de la radiación electromagnética de sistemas de transmisión, como parte de este capítulo, se referenciará la información genérica sobre el tema.

### 2.2.1 Ecuaciones de Maxwell para campos que varían con el tiempo

Después de que Oersted demostró, en 1920, que una corriente eléctrica afectaba a la aguja de una brújula, Faraday sustentó la idea de que si una corriente podía producir un campo magnético, entonces un campo magnético también debía ser capaz de producir una corriente en una trayectoria cerrada, y por lo tanto una fuerza electromotriz que diera lugar a una corriente.

Generalmente la ley de Faraday se enuncia como:

$$fem = -\frac{d\phi}{dt} [V] \quad \dots(1)$$

Esta ecuación implica una trayectoria cerrada, aunque no necesariamente una trayectoria cerrada conductora, esta trayectoria puede ser un capacitor o simplemente una línea puramente imaginaria en el espacio. El flujo magnético  $\phi$  es el flujo que pasa a través de la superficie cuyo perímetro es la trayectoria cerrada, y la  $d\phi / dt$  es la rapidez de variación de este flujo con respecto al tiempo. El signo negativo indica que la  $fem$  tiene tal dirección como para producir una corriente cuyo flujo, si se sumara al flujo original, reduciría la magnitud de la  $fem$  (ley de Lenz) .

Una fuerza electromotriz es simplemente una diferencia de potencial que surge de los conductores en movimiento dentro de un campo magnético, o de campos magnéticos variantes con el tiempo, por lo tanto la ecuación 1 se puede escribir como:

$$\oint \bar{E} \cdot d\bar{\ell} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \bar{B} \cdot d\bar{S} \quad \dots(2)$$

Donde los dedos de la mano derecha indican la dirección de la trayectoria cerrada, y el pulgar indica la dirección de  $d\bar{S}$  . De donde, una densidad de flujo  $\bar{B}$ , en la dirección de  $d\bar{S}$  y que se incrementa con el tiempo produce un valor promedio de  $\bar{E}$  que es opuesto a la dirección positiva alrededor de la trayectoria cerrada.

Aplicando el teorema de Stokes a la ecuación anterior y considerando superficies diferentes para ambos miembros, la ecuación anterior puede escribirse en forma puntual o diferencial:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad \dots(3)$$

Esta es una de las cuatro ecuaciones de Maxwell, y se conoce como ecuación de Maxwell obtenida por la ley de Faraday, y establece que un campo magnético que varía con el tiempo produce un campo eléctrico.

A un campo eléctrico que varía con el tiempo, se le puede analizar a partir de la ley de circuito ampere para campos variables en el tiempo (segunda ecuación de Maxwell) establece que:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad \dots(4)$$

El término  $\partial \bar{D} / \partial t$  tiene las dimensiones de densidad de corriente, amperes por metro cuadrado. Como resulta de una densidad de flujo eléctrico que varía con el tiempo, Maxwell la llamó densidad de corriente de desplazamiento.

En las dos ecuaciones de Maxwell presentadas se ve fácilmente la interrelación que existe entre los campos eléctricos y magnéticos que varían en el tiempo.

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad \dots(5)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad \dots(6)$$

Las dos ecuaciones de Maxwell restantes permanecen sin cambio, respecto de su forma sin variación en el tiempo:

La ecuación (5) afirma esencialmente que la densidad de carga es una fuente de líneas de flujo eléctrico y la ecuación (6) reconoce el hecho de que se ignora la existencia de cargas magnéticas o polos ( el flujo magnético siempre se encuentra en espiras cerradas y nunca diverge de una fuente puntal).

### 2.2.2 Las fuentes electromagnéticas y los campos casi-estacionarios.

La ley de la conservación de la carga establece que la densidad de carga por unidad de volumen  $\rho$  y la densidad de corriente por unidad de superficie  $\bar{J}$  están relacionadas por medio de la ecuación de continuidad.

$$\nabla \cdot \bar{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \dots(7)$$

Para un conductor orientado en la dirección del eje z la ecuación de continuidad se puede escribir en términos de la densidad de carga por unidad de longitud  $\rho R$  y la corriente I de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \rho \ell}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial z} = 0 \quad \dots(8)$$

La razón para presentar la ecuación de continuidad, es la de puntualizar que la carga y la corriente están matemáticamente relacionadas, pues las corrientes eléctricas o las cargas son las fuentes de los campos eléctricos y magnéticos. Generalmente los campos  $\bar{E}$  y  $\bar{B} = \bar{\mu}H$ , están acoplados y por lo tanto no pueden calcularse en forma independiente uno del otro. Sin embargo, si la densidad de carga no cambia con el tiempo las leyes del electromagnetismo se desacoplan y se tienen leyes independientes de electrostática (con la carga como elemento primario) y magnetostática (con la corriente constante como elemento primario). Esta particularidad es la que permite relacionar directamente la carga como fuente básica del campo eléctrico y la corriente como la fuente del campo magnético.

Si bien el desacoplamiento entre los campos eléctrico y magnético ocurre estrictamente sólo en el caso de campos estáticos, se puede adoptar como una muy buena aproximación para campos que varían muy lentamente (campos de baja frecuencia). Mediante la aproximación de campos casi-estacionarios, los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  se tratan como si ellos pasaran por secuencias continuas de estados estacionarios.

Las frecuencias de transmisión de potencia 50 y 60 Hz, son tan bajas que la razón de cambio de campo eléctrico  $\vec{E}$  es tan baja que casi no existe efecto mutuo entre los campos magnético y eléctrico, por lo que el campo eléctrico se considera como casi estacionario. Similarmente, el cálculo del campo magnético a frecuencia fundamental, en la vecindad del conductor, se puede obtener en forma adecuada con la misma consideración; sin embargo, para lograr mejores estimaciones, es común adicionar al cálculo del campo casi-estacionario un termino que incorpora el efecto de las corrientes de Eddy inducidas sobre la tierra. Las corrientes de Eddy inducidas en la tierra se producen debido a la variación en el tiempo de la corriente en los conductores y son producto de la interacción entre los campos eléctrico y magnético.

### 2.2.3 Relación entre los parámetros eléctricos y electromagnéticos

Los campos eléctricos y magnéticos son vectores en el espacio que están presentes en el medio en el que se encuentran las líneas de transmisión, siempre y cuando existan voltaje y corriente en ellas. El comportamiento entre los parámetros eléctricos de la línea es muy semejante al comportamiento de sus campos electromagnéticos, como se puede observar de las siguientes expresiones.

Para los parámetros eléctricos tenemos que:

$$-\frac{dV}{dx} = (R + j\omega L)I \dots [V/m] \quad \dots(9)$$

$$-\frac{dI}{dx} = (G + j\omega C)V \dots [A/m] \quad \dots(10)$$

Y en forma similar para los campos electromagnéticos:

$$\frac{dE(y)}{dx} = -j\omega\mu H(z) \dots [V/m^2] \quad \dots(11)$$

$$\frac{dH(z)}{dx} = -(\sigma + j\omega\epsilon)E(y) \dots [V/m^2] \quad \dots(12)$$

En donde los parámetros eléctricos y electromagnéticos guardan la relación correspondiente siguiente (tabla 2.3).

| Eléctricos                | Electromagnéticos              | Unidades     |
|---------------------------|--------------------------------|--------------|
| $Z = R + j\omega L$       | $j\omega\mu$                   | $\Omega/m$   |
| $Y = G + j\omega C$       | $\sigma + j\omega\varepsilon$  | $1/\Omega/m$ |
| $Z_0 = \sqrt{L/C}$        | $Z_0 = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ | $\Omega$     |
| $Velocidad = 1/\sqrt{LC}$ | $v = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$  | $m/s$        |
| $L = Inductancia$         | $\mu$                          | $H/m$        |
| $C = Capacitancia$        | $\varepsilon$                  | $F/m$        |
| $V/x$                     | $E$                            | $V/m$        |
| $I/x$                     | $H$                            | $A/m$        |

Tabla 2.3 Comparación de parámetros eléctricos y electromagnéticos.

Su comportamiento es parecido pero no son directamente equivalentes, como se puede observar en las ecuaciones que los relacionan:

$$I = \oint H \cdot d\ell \quad \dots(13)$$

$$V = -\int E \cdot d\ell \quad \dots(14)$$

o en otra forma:

$$H = \frac{1}{4\pi\mu_r} \int \frac{\bar{I} \times \bar{r}}{r^2} d\ell \quad \dots(15)$$

$$\bar{E} = -\nabla \cdot V \quad \dots(16)$$

En general el campo magnético y la corriente, así como el campo eléctrico y el voltaje, están relacionados por constantes que dependen del punto donde se consideren los campos. De hecho, podemos concluir que los campos electromagnéticos medidos en la cercanía de las líneas son proporcionales a los parámetros eléctricos (voltaje y corriente), y que los factores que los relacionan dependen de las características geométricas y eléctricas de cada línea en particular.

## 2.3 Campo eléctrico

Como el cálculo de campos eléctricos por medios analíticos es difícil y a veces imposible, para aplicaciones de ingeniería se emplean comúnmente métodos numéricos. De los algoritmos desarrollados para el cálculo de campos eléctricos, producidos por líneas de transmisión específicamente, lo más conocidos son: Método de las imágenes, método de cargas simuladas y método de los momentos.

El método de las imágenes se basa en la consideración de que la línea de transmisión se encuentra sobre un terreno plano con conductividad infinita, y que la carga total de cada conductor se encuentra localizada en el centro de él. Este método consiste en sustituir el terreno por un grupo de conductores ficticios, con cargas de signo contrario a los conductores reales y colocados bajo el plano de la tierra (como si fueran imágenes de los conductores reales, en un espejo colocado en el plano de la tierra). El procedimiento consiste en determinar primero las cargas de todos los conductores y los coeficientes de potencial de Maxwell. Posteriormente, se calcula la intensidad de campo eléctrico directamente de las cargas de los conductores reales y de los conductores imagen.

En el método de cargas simuladas, los potenciales de líneas de carga ficticias se toman como soluciones particulares de las ecuaciones de Laplace y de Poisson: Físicamente, las cargas distribuidas de superficie se reemplazan por líneas de cargas discretas. Estas cargas son colocadas fuera de la región en la cual se desea conocer el campo eléctrico. Para que la solución sea única dentro de tal región, las magnitudes de las cargas ficticias se deben calcular de tal forma que su efecto total satisfaga la ecuación de Laplace o de Poisson dentro de la región de consideración: para el cálculo del campo electrostático debido a las líneas de transmisión, la carga distribuida en la superficie de los conductores se reemplaza por  $n$  líneas de carga colocadas dentro del conductor. Para determinar la magnitud de estas cargas se emplean puntos en el contorno del conductor donde el voltaje es conocido (puntos en la frontera). Si el número de puntos de voltaje conocido es igual al número de líneas de carga ficticias, se obtiene un sistema de  $n$  ecuaciones lineales para las cargas. Sin embargo, con el fin de cumplir con las condiciones de frontera en un número mayor de puntos de frontera mayor que el número de cargas ficticias. En este caso, se obtiene un número de ecuaciones mayor al número de incógnitas, y la solución se puede encontrar empleando el método de mínimos cuadrados. Debido a la naturaleza discreta del método de cargas simuladas, se requiere de la selección y colocación de un gran número de líneas de carga para alcanzar una exactitud aceptable. Este método se emplea principalmente para el cálculo del gradiente superficial de voltaje en conductores circulares o trenzados, y además, es posible emplearlo para el cálculo de campo eléctrico en problemas tridimensionales.

El método de los momentos, ha sido empleado extensivamente en el análisis de antenas y líneas de transmisión planas para sistemas de microondas. este método supera dos de las limitaciones del método de simulación de cargas:

1. Las cargas distribuidas en una superficie se modelan con distribuciones continuas, con lo que se logra una representación más exacta del problema, y
2. Los valores de voltaje de frontera especificados, pueden satisfacerse en la superficie donde residen las cargas.

El método se basa en la división de un área en sub-áreas de voltaje conocido, a partir de las cuales, por medio del cálculo de integrales de superficie, se determinan densidades equivalentes de carga superficial. Una vez conocidas estas densidades de carga, es posible calcular el campo eléctrico que originan en cualquier punto. Este método se ha empleado recientemente, para incluir el efecto que tienen las irregularidades de la superficie del terreno sobre el perfil lateral del campo eléctrico. Si bien este método es bastante simple de visualizar y de aplicar, puede llevar a la formulación de integrales bastante complicadas, las cuales deben ser resueltas numéricamente, disminuyendo la exactitud del método e incrementando el tiempo de cómputo.

### 2.3.1 Método general para el cálculo de campo eléctrico en líneas de transmisión

El potencial y la intensidad de campo eléctrico originados por las líneas de transmisión aéreas, se calculan considerando que no existen cargas libres en el espacio, que la tierra es un conductor perfecto y que la permitividad del aire es prácticamente independiente de las condiciones climatológicas, siendo igual a la permitividad del espacio libre.

$$\varepsilon = 8.854 \times 10^{-12} [F/m] \quad \dots(1)$$

En puntos que se encuentran lo suficientemente alejados de la línea de transmisión aéreas, de tal manera que la distancia entre dichos puntos y la línea, sea mucho mayor que el radio equivalente de los grupos de conductores que la forman, puede emplearse el método de las imágenes y los coeficientes de potencial de Maxwell.

Como primer paso, se determinan las cargas en todos los conductores de la línea:

$$\bar{Q} = 2\pi\varepsilon [P]^{-1} \cdot \bar{V} \quad \dots(2)$$

donde  $[P]$  es matriz de coeficientes de potencial de Maxwell completa (sin eliminar los conductores de guarda]; y  $V$  es el vector de voltajes en los conductores.

Para conductores en grupos simétricos, y para el cálculo del campo eléctrico en puntos alejados de la superficie de los conductores, los grupos de las fases se pueden reducir a conductores de fase equivalentes empleando la fórmula del radio medio geométrico.

$$RMG = \sqrt[n]{nrR^{n-1}} \quad \dots(3)$$

donde  $n$  es el número de conductores en el haz,  $r$  es el radio de los conductores y  $R$  es el radio del círculo que forman los conductores.

Aunque dicha reducción no es necesaria, simplifica los cálculos y no introduce errores apreciables (siempre y cuando se cumplan las condiciones señaladas).

Una vez determinadas las cargas en todos los conductores, se puede calcular el campo eléctrico en cualquier punto, sumando las componentes de campo producidas por cada una de ellas en el punto en cuestión.

### 2.3.2 Formulación para el cálculo de las cargas de los conductores

Al aplicar una tensión a un conductor, éste se carga como si fuera un capacitor. La carga  $Q$  que adquiere el conductor se relaciona con el voltaje aplicado  $V$  de acuerdo con:

$$Q = C \cdot V \quad \dots(4)$$

siendo  $C$  la capacitancia del conductor.

Si en un conductor cilíndrico la carga esta uniformemente repartida, las líneas de flujo eléctrico serán radiales y los puntos equidistantes al centro del conductor formarán superficies equipotenciales circulares con el centro del conductor.

La ley de Gauss establece que la densidad de flujo eléctrico total que sale de una superficie cerrada es igual a la carga neta contenida dentro de la superficie, esto es:

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q_r \quad \dots(5)$$

Si se considera una superficie cilíndrica cerrada, que envuelva a una sección de longitud  $\ell$  de un conductor de longitud infinita, se encuentra que los vectores  $d\vec{s}$  normales a las secciones transversales planas del cilindro son de signo contrario. Por lo tanto, la integral se realiza sólo sobre la superficie definida por el cilindro de radio  $x$  y longitud  $\ell$ :

$$Q_r = D \int_c ds = D(2\pi\ell x) \quad \dots(6)$$

De la ecuación anterior, se tiene que la intensidad de campo eléctrico a una distancia  $x$  del un conductor de longitud infinita es:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon x} \quad \dots(7)$$

donde  $\epsilon$  es la permitividad del medio y,  $Q = Q_r/\ell$ , es la densidad de carga lineal.

La diferencia de potencial entre un punto A y un punto B se define como el trabajo realizado al mover una carga positiva unitaria de  $Q$  de B a A, esto es:

$$V_{AB} = \frac{W}{Q} = -\int_B^A E dx \quad \dots(8)$$

Como la diferencia de potencial entre los puntos A y B es independiente de la trayectoria de integración, se puede calcular encontrando la diferencia de potencial entre dos superficies equipotenciales circulares. Por lo tanto, la diferencia de potencial entre A y B será:

$$V_{AB} = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_B}{d_A}$$

donde  $d_A$  y  $d_B$  son las distancias del centro del conductor a los puntos A y B respectivamente.

Si consideramos el caso en que el conductor se encuentra sobre un terreno plano de conductividad infinita, podemos emplear el método de las imágenes para calcular la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera. El método de las imágenes consiste en sustituir el plano de tierra por un conductor ficticio, el cual posea una carga de igual magnitud y de signo contrario a la carga del conductor real. Este conductor ficticio deberá colocarse bajo el plano de tierra, a

una profundidad igual a la altura a la que se encuentra el conductor real, como se muestra en la figura 2.11.

La diferencia de potencia entre dos puntos A y B debida a un conductor con carga  $Q$  y a su conductor imagen  $-Q$  es:

$$V_{AB} = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon} \ln \left[ \frac{D_A \cdot d_B}{d_A \cdot D_B} \right] \quad \dots(10)$$

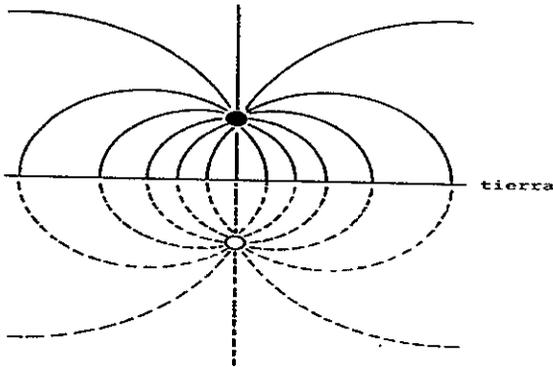


Figura 2.11 Sustitución del plano de tierra por un conductor ficticio.

donde los términos  $d_A$  y  $d_B$  son los definidos anteriormente y  $D_A$  y  $D_B$  son las distancias del conductor imagen a los puntos A y B.

Si se considera un circuito con tres conductores paralelos entre sí y al plano de tierra. La diferencia de potencial entre un punto situado en la superficie del conductor 1, con radio  $r_1$  y un punto  $p$  cualquiera, será la suma de las diferencias de potencial debidas a cada conductor imagen:

$$V_{1p} = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon} \ln \left[ \frac{D_{11} d_{1p}}{r_1 D_{1p}} \right] + \frac{Q_2}{2\pi\epsilon} \ln \left[ \frac{D_{12} d_{2p}}{d_{12} D_{2p}} \right] + \frac{Q_3}{2\pi\epsilon} \ln \left[ \frac{D_{13} d_{3p}}{2\pi\epsilon D_{3p}} \right]$$

Si el punto  $p$  se aleja hasta el infinito (a un potencial cero), la diferencia de potencial  $V_{1p}$  se convierte en el potencial absoluto del conductor 1, y los términos  $d_{ip}/D_{ip}$  tienden a 1. Por lo tanto:

$$V_1 = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{11}}{r_1} + \frac{Q_2}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} + \frac{Q_3}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{13}}{d_{13}} \quad \dots(11)$$

Siguiendo un procedimiento similar, se pueden encontrar las ecuaciones de voltaje para los otros dos conductores. Agrupando las tres ecuaciones en forma matricial tenemos que:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \begin{bmatrix} \ln(D_{11}/r_1) & \ln(D_{12}/d_{12}) & \ln(D_{13}/d_{13}) \\ \ln(D_{21}/d_{21}) & \ln(D_{22}/r_2) & \ln(D_{23}/d_{23}) \\ \ln(D_{31}/d_{31}) & \ln(D_{33}/d_{32}) & \ln(D_{33}/r_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad \dots(12)$$

En general, para un sistema  $n$  de conductores, como se muestra en la figura 2.12, se tendrá un sistema de  $n$  ecuaciones, el cual se puede representar en forma condensada como:

una profundidad igual a la altura a la que se encuentra el conductor real, como se muestra en la figura 2.11.

La diferencia de potencia entre dos puntos A y B debida a un conductor con carga  $Q$  y a su conductor imagen  $-Q$  es:

$$V_{AB} = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon} \ln \left[ \frac{D_A \cdot d_B}{d_A \cdot D_B} \right] \quad \dots(10)$$

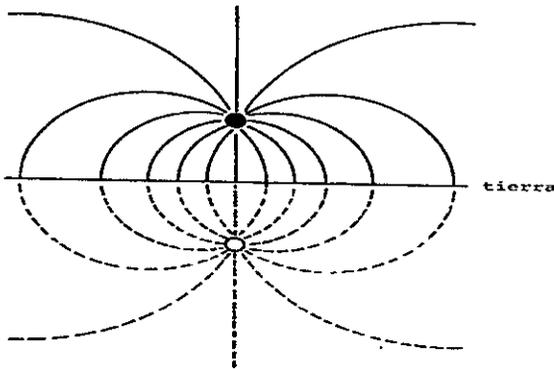


Figura 2.11 Sustitución del plano de tierra por un conductor Ficticio.

donde los términos  $d_A$  y  $d_B$  son los definidos anteriormente y  $D_A$  y  $D_B$  son las distancias del conductor imagen a los puntos A y B.

Si se considera un circuito con tres conductores paralelos entre sí y al plano de tierra. La diferencia de potencial entre un punto situado en la superficie del conductor 1, con radio  $r_1$  y un punto  $p$  cualquiera, será la suma de las diferencias de potencial debidas a cada conductor imagen:

$$V_{1p} = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon} \ln \left[ \frac{D_{11} d_{1p}}{r_1 D_{1p}} \right] + \frac{Q_2}{2\pi\epsilon} \ln \left[ \frac{D_{12} d_{2p}}{d_{12} D_{2p}} \right] + \frac{Q_3}{2\pi\epsilon} \ln \left[ \frac{D_{13} d_{3p}}{2\pi\epsilon D_{3p}} \right]$$

Si el punto  $p$  se aleja hasta el infinito (a un potencial cero), la diferencia de potencial  $V_{1p}$  se convierte en el potencial absoluto del conductor 1, y los términos  $d_{ip}/D_{ip}$  tienden a 1. Por lo tanto:

$$V_1 = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{11}}{r_1} + \frac{Q_2}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} + \frac{Q_3}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{13}}{d_{13}} \quad \dots(11)$$

Siguiendo un procedimiento similar, se pueden encontrar las ecuaciones de voltaje para los otros dos conductores. Agrupando las tres ecuaciones en forma matricial tenemos que:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \begin{bmatrix} \ln(D_{11}/r_1) & \ln(D_{12}/d_{12}) & \ln(D_{13}/d_{13}) \\ \ln(D_{21}/d_{21}) & \ln(D_{22}/r_2) & \ln(D_{23}/d_{23}) \\ \ln(D_{31}/d_{31}) & \ln(D_{32}/d_{32}) & \ln(D_{33}/r_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad \dots(12)$$

En general, para un sistema  $n$  de conductores, como se muestra en la figura 2.12, se tendrá un sistema de  $n$  ecuaciones, el cual se puede representar en forma condensada como:

$$\bar{V} = \frac{1}{2\pi\epsilon} [P] \cdot \bar{Q} \quad \dots(13)$$

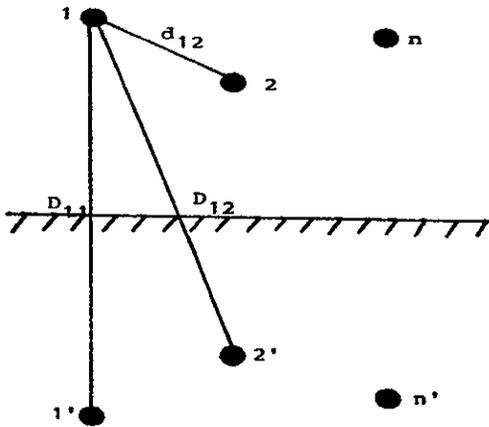


Figura 2.12 Sistema de n conductores sobre el suelo.

siendo [V] y [Q] los vectores de voltajes y cargas de los conductores, respectivamente, y [P] la matriz de coeficientes de potencial de Maxwell, cuyos elementos son los términos logarítmicos definidos como:

$$P_{ij} = \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad (i \neq j) \quad \dots(14)$$

$$P_{ii} = \ln \frac{D_{ii}}{r_i} \quad (i = j) \quad \dots(15)$$

Finalmente las cargas equivalentes de los conductores se calculan como:

$$\bar{Q} = [C] \cdot \bar{V} = 2\pi\epsilon [P]^{-1} \cdot \bar{V} \quad \dots(16)$$

donde [C] es la matriz de capacitancia.

### 2.3.3 Formulación para el cálculo del campo eléctrico

Una vez que se han calculado las cargas de los conductores a partir de los voltajes y de la configuración física de la línea, se pueden calcular las componentes de campo eléctrico producidas por estas cargas en un punto cualquiera.

La intensidad de campo eléctrico en un punto  $(x_p, y_p)$  cualquiera, debida a un conductor con densidad de carga lineal  $Q_k$  situado en  $(x_k, y_k)$ , y a su conductor imagen es: donde:

$$E_{pk} = \frac{Q_k}{2\pi\epsilon} \bar{u}_I + \frac{-Q_k}{2\pi\epsilon D_{pk}} \bar{u}_{II} \quad \dots(17)$$

$d_{pk}$  es la distancia del conductor real al punto p.

$D_{pk}$  es la distancia del conductor imagen al punto p.

$\bar{u}_I$  es el vector unitario en la dirección del conductor imagen al punto p.

$\bar{u}_{II}$  es el vector unitario en la dirección del conductor imagen al punto p.

Los vectores unitarios  $\bar{u}_I$  y  $\bar{u}_{II}$ , se definen como:

$$\bar{u}_I = \frac{x_p - x_k}{d_{pk}} \bar{x} + \frac{y_p - y_k}{d_{pk}} \bar{y} \quad \dots(18)$$

$$\bar{u}_{II} = \frac{x_p - x_k}{D_{pk}} \bar{x} + \frac{y_p + y_k}{D_{pk}} \bar{y} \quad \dots(19)$$

donde  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son los vectores unitarios en la dirección de los ejes coordenados X y Y.

Sustituyendo las expresiones (18) y (19), en la ecuación (17), y simplificando tenemos que los componentes horizontal y vertical del campo eléctrico son:

$$E_{pk}^x = \frac{Q_k}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{x_p - x_k}{d_{pk}^2} - \frac{x_p - x_k}{D_{pk}^2} \right] \quad \dots(20)$$

$$E_{pk}^y = \frac{Q_k}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{y_p - y_k}{d_{pk}^2} - \frac{y_p - y_k}{D_{pk}^2} \right] \quad \dots(21)$$

Las componentes horizontal y vertical totales, del campo eléctrico en un punto debido a una línea de n conductores, son:

$$E_{px} = \sum_{k=1}^n E_{pk}^x \quad \dots(22)$$

$$E_{py} = \sum_{k=1}^n E_{pk}^y \quad \dots(23)$$

En operación de estado estable de corriente alterna, los voltajes varían senoidalmente, por lo que son complejos, y se pueden escribir como:

$$\hat{V}_k = V_{kr} + jV_{ki} = V_k e^{j\theta_k} \quad \dots(24)$$

En este caso, la intensidad de campo eléctrico en un punto p debido a un conductor k, se puede expresar de la siguiente forma:

$$\hat{E}_{pk} = \hat{E}_{pk}^x \hat{x} + \hat{E}_{pk}^y \hat{y} \quad \dots(25)$$

donde las componentes horizontal y vertical,  $\hat{E}_{pk}^x$  y  $\hat{E}_{pk}^y$ , son cantidades complejas, que se obtienen al sustituir en las ecuaciones (20) y (21), los valores complejos de las cargas.

### 2.3.4 Perfil lateral del campo eléctrico a nivel del suelo

El cálculo del campo eléctrico al nivel del suelo de una línea de transmisión, es una simplificación del método general descrito en la sección anterior. De hecho, el campo eléctrico en un terreno plano de conductividad infinita, se compone solamente de un vector vertical, pues la componente horizontal es cero.

Sustituyendo en la expresión de la componente vertical el valor de  $y_p = 0$ , tenemos que:

$$\hat{E}_{pk} = E_{pk}^y = \frac{Q_k}{\pi\epsilon} \frac{y_k}{(x_p - x_k)^2 + y_k^2} \quad \dots(26)$$

donde:

$$\hat{Q}_k = Q_{kr} + jQ_{ki} \quad \dots(27)$$

El campo total en el punto p es:

$$\hat{E}_p = \sum_{k=1}^n E_{pk} = \hat{E}_{pr} + jE_{pi} \quad \dots(28)$$

La magnitud del campo eléctrico es:

$$E_p = \sqrt{E_{pr}^2 + E_{pi}^2} \quad \dots(29)$$

y el ángulo de fase  $\theta$ , es:

$$\theta = \arctan \frac{E_{pi}}{E_{pr}} \quad \dots(30)$$

Si el cálculo del campo eléctrico al nivel del suelo se realiza en diferentes puntos en una sección perpendicular a la línea de transmisión, se obtiene el perfil lateral de campo eléctrico, se efectúa donde la línea tenga el menor claro a tierra.

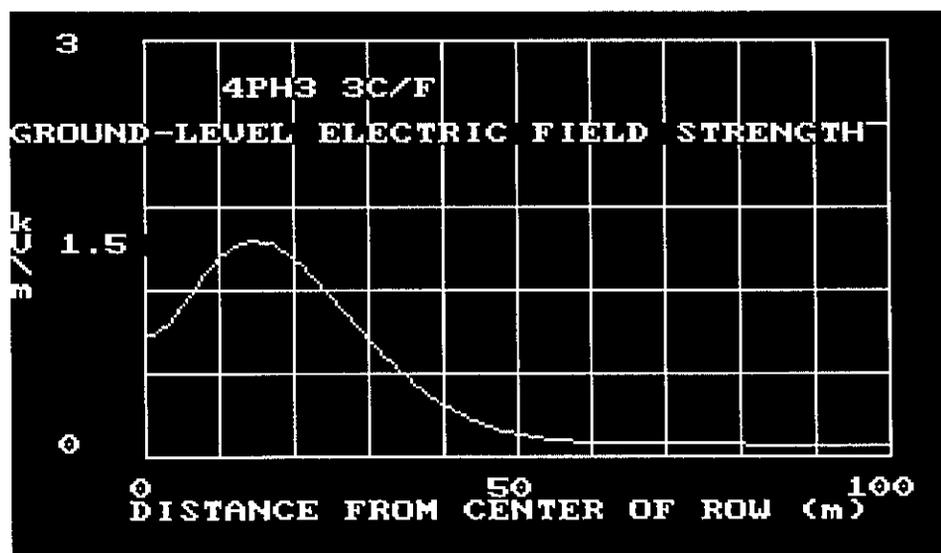
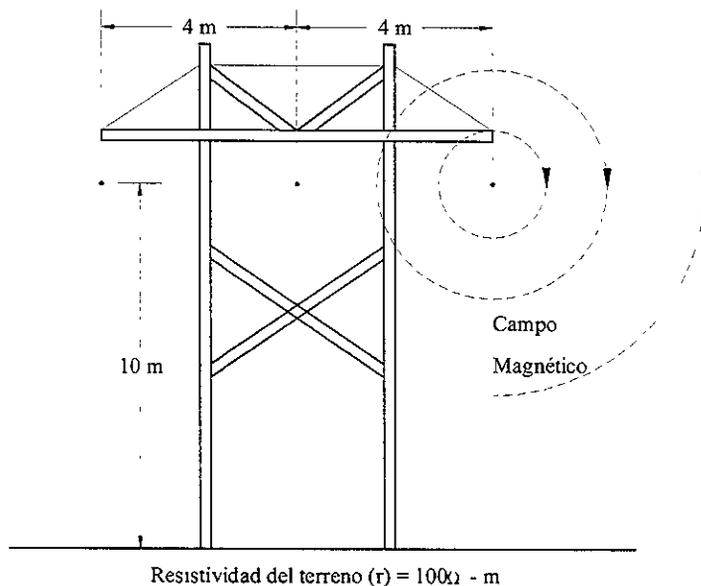


Figura 2.13 Perfil lateral de campo eléctrico.

## 2.4 Campo magnético

Las fuentes de los campos magnéticos son las corrientes eléctricas, las cuales pueden ser de origen natural o generadas por sistemas eléctricos creados por el hombre. Es útil separar estas fuentes en diversas categorías por diferentes razones; primero, se debe de comparar el ambiente natural de campo magnético con el originado por los sistemas eléctricos; segundo, los campos magnéticos de algunas fuentes se pueden predecir más fácilmente que los de otras, por lo que es ventajoso saber cuáles están en cada categoría y porqué.

Las fuentes naturales de campo magnético incluyen, el campo magnético estático de la tierra, así como el campo, magnetotelúrico (la porción del campo magnético de la tierra que varía con el tiempo). El campo magnético natural de 60 Hz es muy pequeño, sin embargo, en organismos que se mueven en el campo magnético estático de la Tierra, se pueden inducir corrientes que son comparables con las inducidas por campos magnéticos producidos por corrientes eléctricas de



2. 14 Campo magnético en una línea de transmisión

Las fuentes de corriente de las líneas de transmisión, incluyen tanto las corrientes de todos los conductores de las líneas como corrientes que fluyen por tierra. Es importante notar que un factor crítico en la predicción de los campos magnéticos a nivel del suelo, donde es más probable la exposición de seres vivos, es la localización y la magnitud de las corrientes de retorno por tierra. Además, debemos señalar que la dirección y la profundidad de estas corrientes, son también función del número y la posición a lo largo de las líneas de conductores localizados bajo el suelo. Esto se debe a que estos conductores atraen las corrientes hacia ellos, provocando que fluyan a una distancia de la superficie del terreno menor a la profundidad de penetración, y en una dirección diferente a la de la línea.

A diferencia de los voltajes de las líneas de potencia, la amplitud y la fase de las corrientes no son constantes, de hecho, las corrientes varían considerablemente a medida que cambia la carga. Esta es una de las razones de porqué es difícil predecir los campos magnéticos de las líneas de potencia, y porqué es necesario desarrollar un tratamiento estadístico para este problema. No

instalaciones en edificios y equipo industrial, son muy difícil de calcular ya que el cableado de cada sistema es diferente, por lo que en estos casos es mejor considerarlos por medio de programas de medición. Valores típicos reportados de campos de 60 Hz en casas, varían de  $10^{-3}$  gauss a 10 gauss cerca de instrumentos eléctricos, y puede alcanzar valores tan altos como 100 gauss en el medio industrial. Sin embargo, es benéfico intentar predecir los campos magnéticos de las líneas eléctricas de potencia. Esto es en parte, porque el problema es más tratable y porque esto puede emplearse para mostrar porqué es difícil hacer predicciones de campo magnético.

obstante, si se conoce en forma determinística las corrientes de todos los conductores, las predicciones de campo magnético pueden ser bastantes razonables.

### 2.4.1 Formulación para el cálculo del campo magnético

El campo magnético de líneas de transmisión se calcula empleado un análisis en dos dimensiones, considerando que las líneas que corren paralelamente sobre un terreno plano. La intensidad del campo eléctrico,  $\bar{H}_{pk}$ , en un punto  $(x_p, y_p)$ , a una distancia  $d_{kp}$ , de un conductor situado en un punto  $(x_k, y_k)$  por el cual fluye una corriente  $I_k$ , es:

$$\bar{H}_{pk} = \frac{\bar{I}_k \times \bar{d}_{kp}}{2\pi d_{kp}^2} = \frac{I_k}{2\pi d_{kp}} \bar{u}_{kp} \quad \dots(1)$$

donde  $\bar{u}_{kp}$  es el vector unitario en la dirección del producto cruz del vector de corriente y el vector de distancia. Este vector unitario es igual a:

$$\bar{u}_{kp} = -\frac{y_p - y_k}{d_{kp}} \bar{x} + \frac{x_p - x_k}{d_{kp}} \bar{y} \quad \dots(2)$$

donde  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son los vectores unitarios en la dirección de los ejes horizontal y vertical, respectivamente.

El campo magnético se ve afectado por la presencia de las corrientes de retorno, especialmente a distancias grandes de las líneas. Estas corrientes pueden tomarse en cuenta empleando las ecuaciones de Carson, sin embargo, es mucho más sencillo hacer uso del concepto de la profundidad de penetración compleja,  $\delta$ . La intensidad de campo magnético en un punto p cualquiera, producida por un conductor situado en un punto k y por su conductor imagen correspondiente, se determina con la siguiente expresión:

$$\bar{H}_{pk} = \frac{I_k}{2\pi d_{kp}} \bar{u}_{kp} - \frac{I_k}{2\pi D_{kp}} \bar{u}_{kp}^c \quad \dots(3)$$

donde la distancia  $d_{kp}$  y  $D_{kp}$  se definen en la figura 2.15, definen en la ecuación (2) y  $\bar{u}_{kp}^c$  es el vector unitario en la dirección del producto cruz entre el vector de corriente y el vector de distancia del conductor imagen al punto p. Este vector unitario es igual a:

$$\bar{u}_{kp}^c = \left[ \begin{array}{c} y_p + y_k + 2\delta \\ D_{kp} \end{array} \right] \bar{x} + \left[ \begin{array}{c} x_p - x_k \\ D_{kp} \end{array} \right] \bar{y} \quad \dots(4)$$

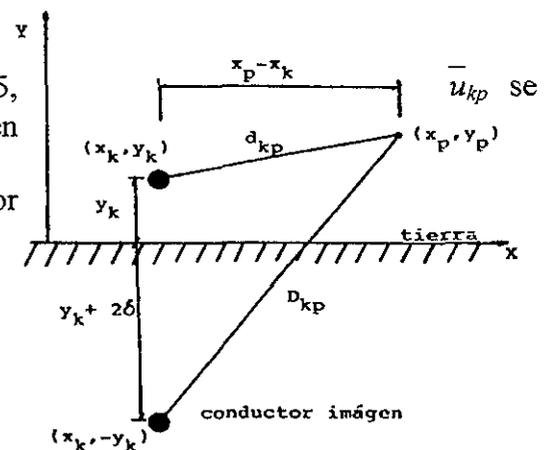


Figura 2.15 Empleo de la profundidad de penetración compleja.

Desarrollando la ecuación de  $\bar{H}_{pk}$  y separando las componentes horizontal y vertical, se tiene que:

$$H_{kp}^x = -\frac{I_k}{2\pi} \left[ \frac{y_p - y_k}{d_{kp}^2} - \frac{y_p + y_k + 2\delta}{D_{kp}^2} \right] \quad \dots(5)$$

$$H_{kp}^y = \frac{I_k}{2\pi} \left[ \frac{x_p - x_k}{d_{kp}^2} - \frac{x_p - x_k}{D_{kp}^2} \right] \quad \dots(6)$$

donde:

$$\delta = \sqrt{2251.646} \sqrt{p/f} e^{j\pi/4}$$

$$d_{kp} = \sqrt{(x_p - x_k)^2 + (y_p - y_k)^2}$$

$$D_{kp} = \sqrt{(x_p - x_k)^2 + (y_p + y_k + 2\delta)^2}$$

Estas ecuaciones son validas en distancias de la línea al punto p menores que  $\lambda/20$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda en el espacio libre ( $\lambda = 3 \times 10^8 / f$  m). Además, son validas para puntos cerca o sobre la superficie del suelo.

El primer término dentro de los corchetes de cada componente de campo, es la contribución de las fuentes de corriente en el espacio libre y representan la aproximación magnetoestática del campo. Sumados a estos términos están las contribuciones de las imágenes, que toman en cuenta las corrientes de Eddy inducidas en el terreno. Estas imágenes también están localizadas en el espacio libre, ya que reemplazan a las corrientes de retorno a tierra.

Las líneas de potencia generalmente están formadas por varios conductores de fase y de guarda. Por superposición, el campo magnético de estas líneas es la suma de los campos producidos por todos los conductores:

$$H_x = \sum_{k=1}^n H_{kp}^x \quad \dots(7)$$

$$H_y = \sum_{k=1}^n H_{kp}^y \quad \dots(8)$$

donde  $H_{kp}^x$  y  $H_{kp}^y$  estan dados por las ecuaciones (5) y (6), respectivamente.

### **Fórmula simplificada válida para puntos dentro del derecho de vía.**

Si la distancia de la línea al punto en cuestión, es mucho más pequeña que la profundidad de penetración en la tierra, las formulas para  $H_x$  y  $H_y$  se pueden reducir e incluir solamente los

términos magnetoestáticos (se pueden despreciar los términos imagen). Como los valores típicos de profundidad de penetración a 60 Hz son de 500 – 1 000 metros, la simplificación es válida para puntos en el derecho de vía. Sin embargo deben de tomarse en cuenta las corrientes que fluyan en otros conductores enterrados bajo el suelo.

Para tomar en cuenta las corrientes de conductores subterráneos se puede hacer uso de la misma consideración mencionada arriba, esto es, si la distancia al punto de cálculo es mucho menor que la profundidad compleja de penetración, simplemente se calcula el campo magnético producido por los conductores reales. La conclusión más importante de esto, es que el suelo proporciona muy poca o nula protección contra el campo magnético en puntos sobre la superficie del terreno.

Por otra parte, debemos considerar que el campo magnético puede acoplar energía a circuitos cercanos. Estos circuitos pueden incluir conductores de blindaje, vías de ferrocarril, tuberías y líneas de comunicación.

### El efecto de corrientes desbalanceadas.

Cerca de las líneas de transmisión los campos magnéticos varían en una forma complicada, como se puede observar en las ecuaciones (7) y (8). Sin embargo, estos campos poseen características interesantes que es importante examinar.

El desarrollo que se presenta a continuación se efectúa con la componente de la intensidad de campo magnético en la dirección del eje  $x$ , siendo posible realizar un desarrollo similar para la componente en el eje  $y$ . Con las ecuaciones (5) y (7), podemos escribir la componente horizontal  $H_x$  para una línea trifásica como:

$$H_x = I_A W_A + I_B W_B + I_C W_C \quad \dots(9)$$

donde:

$$W_A = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{y_p + y_A + 2\delta}{D_{Ap}^2} - \frac{y_p - y_A}{d_{Ap}^2} \right] \quad \dots(10)$$

definiéndose en forma similar a los factores  $W_B$  y  $W_C$ .

Expresando las corrientes de la ecuación (9) en términos de sus componentes simétricas, tenemos que:

$$H_x = (I_1 + I_2 + I_0)W_A + (a^2 I_1 + a I_2 + I_0)W_B + (a I_1 + a^2 I_2 + I_0)W_C \quad \dots(11)$$

donde  $a = \exp(j2\pi/3)$

Reagrupando términos en la ecuación (11), se tiene que:

$$H_x = I_0(W_A + W_B + W_C) + (W_A + a^2 W_B + a W_C) + (W_A + a W_B + a^2 W_C) \quad \dots(12)$$

A partir de esta ecuación se pueden realizar dos casos, (1) cuando el sistema de corrientes trifásicas es balanceado y (2) cuando es desbalanceado.

$$I_0 = I_2 = 0 \quad \dots(13)$$

Para los sistemas balanceados de corrientes las corrientes son igual a:  
por lo tanto:

$$B_x = I_1(W_a + W_B + aW_C) \quad \dots(14)$$

Esta ecuación muestra que en general, aunque la suma vectorial de las corrientes de una línea de transmisión sea cero (corriente de retorno tierra igual a cero), existe el campo magnético. Esta característica se debe principalmente a las diferencias entre las distancias de los conductores de fase al punto de observación.

A medida que la distancia entre el punto de observación y la línea de transmisión se incrementa, los factores  $W$ 's se hacen aproximadamente iguales. por lo que:

$$H_x \approx I_1 W(1 + a + a^2) = 0 \quad \dots(15)$$

Siendo:

$$W = W_A \approx W_B \approx W_C$$

De las ecuaciones anteriores podemos concluir que cuando las corrientes de una línea de transmisión son balanceadas, el campo magnético en puntos localizados a grandes distancias de la línea es muy pequeño y que en puntos cercanos, por ejemplo dentro del derecho de vía, el factor de más influencia es la configuración geométrica de la línea.

Para los sistemas de corriente desbalanceadas. La ecuación (12) representa la solución completa para puntos cercanos a la línea cuando las corrientes son desbalanceadas. Como ya se mencionó para el caso anterior, cuando la distancia entre la línea y el punto de observación se hace muy grande los factores  $W$  se hacen aproximadamente iguales, por lo que:

$$W_A + a^2 W_B + a W_C \rightarrow 0 \quad \dots(16)$$

$$W_A + a W_B + a^2 W_C \rightarrow 0 \quad \dots(17)$$

y por lo tanto:

$$B_x \approx I_0(W_A + W_B + W_C) \quad \dots(18)$$

De acuerdo con esta última ecuación podemos decir que a grandes distancias de una línea (generalmente del orden de cientos de metros), el factor más importante en la intensidad de campo magnético es el grado de desbalanceo de las corrientes de fase.

Cuando existe un desbalanceo en las corrientes, aunque sea de una pequeña cantidad, se puede originar una diferencia grande en el campo magnético. Por ejemplo, en un estudio del campo eléctrico longitudinal (CEL), el cual está relacionado con el campo magnético, un 1 % de desbalanceo puede causar más del 50 % de diferencia en el CEL. Debido a que el desbalanceo es muy sensible a los cambios de carga, el campo magnético puede variar considerablemente conforme varía la carga. Esta es otra razón de por qué el campo magnético de las líneas de potencia es inherentemente difícil de predecir. Es importante comentar que las líneas de muy alta potencia, generalmente llevan corrientes más balanceadas que las líneas de más bajo voltaje que se encuentran cerca de las líneas de distribución puedan ser tan grandes o mayores, que los campos cerca de las líneas de transmisión, sin importar que estas últimas llevan niveles de corriente mayores.

Cuando se consideran los campos magnéticos de cables subterráneos y líneas de distribución, existen otras dos corrientes que se deben de tomar en cuenta, la corriente del conductor neutro y la del blindaje. Esto se debe a que una porción de la corriente de retorno fluye por ellos. Como el conductor neutro y el blindaje se encuentran localizados cerca de los conductores de fase, para propósitos de cálculos magnéticos, el grado de desbalance se determinará más propiamente sumando las corrientes de todos los conductores. La parte residual de estas cinco corrientes (tres fases, neutro y blindaje), es la que causa los campos magnéticos en puntos alejados de las líneas de potencia. Es importante notar que esta corriente residual no es la misma que la corriente de secuencia cero pues esta última incluye las corrientes del neutro y del blindaje.

Existen restricciones en las fórmulas de cálculo magnético. La exactitud de una predicción en particular de campo magnético, depende de la fidelidad con que el modelo representa la situación real. Es importante conocer las fuentes de error y hasta cierto grado poder cuantificar la magnitud del error. Las desviaciones del problema real, se pueden dividir en dos categorías. La primera comprende el desconocimiento de los valores exactos de los parámetros empleados en el modelo. Ejemplos de estos parámetros son la posición de los conductores, las magnitudes y las fases de la corriente balanceada y la corriente desbalanceada. De estos parámetros, la magnitud de la corriente balanceada es la que puede causar desviaciones importantes en la respuesta.

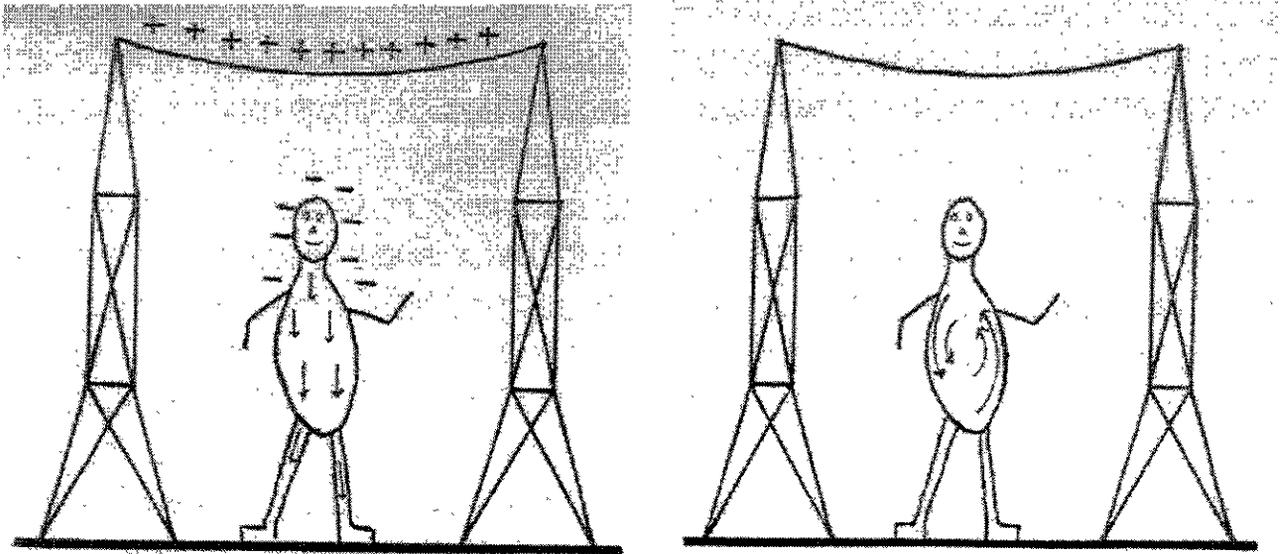
La segunda categoría comprende las propiedades físicas de la situación real que no ha sido tomadas en cuenta por el modelo. Los siguientes puntos están incluidos en esta categoría:

- Se han ignorado las estructuras.
- Se han ignorado los árboles y otras estructuras de madera cerca del derecho de vía.
- Todos los conductores y tubos en el derecho de vía que no son infinitos y paralelos a la línea de potencia, se ignoran. Esto incluye objetos conductores largos con múltiples aterrizamientos, como tubos de irrigación, así como otros sistemas que atraviesen el derecho de vía.
- No se toma en cuenta el hecho de que los conductores no son exactamente paralelos al terreno.
- Se desprecian las irregularidades del terreno cerca del derecho de vía.
- Se desprecia el cambio de resistividad de la tierra tanto a lo largo del derecho de vía, como con la profundidad.
- Las transposiciones de la línea de potencia se desprecian.
- Se desprecian los efectos de las terminaciones de electrodos de aterrizamiento cercanos.

De estos factores, los que pueden tener gran influencia sobre el campo magnético son los conductores, tubos, efectos de terminación, transposiciones y la resistividad no homogénea del terreno.

## 2.5 Efectos sobre la salud de los campos eléctrico y magnético producidos por las líneas de transmisión

La idea de que los campos eléctrico y magnético pueden tener efectos nocivos sobre la salud de los seres vivos es relativamente nueva, y ha inducido a la realización de un gran número de estudios durante los últimos treinta años.



Inducción de cargas y circulación de las corrientes en una persona.

Inducción de corrientes de Eddy en un persona, debajo de una líneas de transmisión

Figura 2.16 Inducción electromagnética por líneas de transmisión.

Durante la década de los setenta, los programas de investigación se enfocaron principalmente a evaluar los posibles riesgos derivados de la exposición prolongada a los campos eléctricos producidos por los sistemas de transmisión de energía eléctrica. Y con base en los resultados de varios de estos estudios, se ha concluido que los campos eléctricos producidos por las instalaciones de alta tensión no tienen efectos serios sobre la salud de las personas, incluidos los trabajadores de las compañías eléctricas expuestos a estos efectos durante la realización de sus tareas dentro de las instalaciones del sistema eléctrico.

Posteriormente, el interés se ha centrado sobre los posibles efectos de los campos magnéticos. Los trabajos más importantes, han abordado los efectos a largo plazo, con particular énfasis sobre la leucemia infantil y el cáncer cerebral. Algunos de los estudios realizados hasta la fecha indican resultados preocupantes, debido a que a través de estudios de epidemiología determinan una asociación entre la leucemia infantil y la exposición a los campos magnéticos. Sin embargo estos estudios son cuestionables en cuanto a los procedimientos utilizados para evaluar la exposición al campo magnético, debido a que sólo consideran factores tales como cercanía con las líneas de transmisión de alta tensión y algunas mediciones puntuales sobre la intensidad del campo magnético.

Considerando que la relación causa efecto no se ha logrado establecer con claridad, los resultados de estudios en curso serán de gran importancia para lograr respuestas más concretas sobre el impacto en la salud.

Se describirá brevemente el ambiente electromagnético, con énfasis en los campos eléctrico y magnético producidos por el uso de la electricidad, haciendo una revisión de los resultados de

estudios orientados a establecer la posible asociación entre el cáncer y la exposición prolongada a los campos eléctrico y magnético.

En nuestra vida diaria nos encontramos inmersos en un ambiente electromagnético integrado por campos eléctrico y magnético, tanto a nivel interno como externo, producto de fuentes naturales incluyen las asociadas con las funciones fisiológicas de los organismos y los campos eléctrico y magnético artificiales o hechos por el hombre. Se producen, por ejemplo, en la generación, en la transmisión y en la distribución de la energía eléctrica, en la operación de las redes de telecomunicaciones, etc. Los campos electromagnéticos naturales o los creados por el hombre son invisibles, y su presencia sólo se percibe a través de algunos dispositivos, por ejemplo la radio, los aparatos receptores de televisión, la brújula. En los siguientes objetivos se describe sucintamente la naturaleza de los campos.

### 2.5.1 La radiación electromagnética

Los campos eléctrico y magnético provienen de muy diversas fuentes de origen natural, entre las que destacan los procesos en la atmósfera que dan origen a un gran campo eléctrico estático sobre la superficie de la tierra. Además, estos campos también existen dentro de todos los seres vivos, pues se ha comprobado que las fuerzas electromagnéticas son las responsables de mantener unidos a los átomos dentro de las moléculas de todos los compuestos químicos[6].

Se sabe que desde el siglo IX los científicos han venido proporcionando herramientas que explican el origen y naturaleza del campo eléctrico y magnético. Sin embargo, para algunas personas el tema ha sido difícil de comprender y explicar. Existen dos tipos de radiación electromagnética; aquella que se propaga a grandes distancias de su fuente (en forma de onda) y aquella que se manifiesta exclusivamente en las inmediaciones de la fuente que la propicia. Se ha demostrado, que las ondas electromagnéticas son portadoras de energía, pero los efectos que ésta puede surtir dependen de la frecuencia, del tipo de onda y de la longitud. Por un lado, la gama de frecuencias del espectro electromagnético es muy amplia, pues se extiende desde las frecuencias extremadamente bajas (ELF) como las de 60 Hz, que se localizan en la región de la energía no ionizante (característica de las líneas de transmisión, hasta las más altas con valor de  $10^{22}$  Hz, localizadas en el umbral de energía o radiación ionizante (longitud de onda del orden de millonésimos de milímetro como en los rayos alfa, gamma y ultravioletas).

Las instalaciones y aparatos asociados con la producción y la utilización de energía eléctrica operan a frecuencias de 50 ó 60 Hz, los aparatos de video y los receptores de televisión producen campos electromagnéticos del orden de 15 000 Hz y sus múltiplos; las frecuencias de radio son del orden del millón de Hz para la amplitud modulada y aproximadamente 100 veces mayores para la frecuencia modulada y la televisión.

Para explicar la diferencia que existe entre las fuentes de energía ionizante, en la figura 2.17 se presenta el espectro electromagnético, donde se observan frecuencias generadas por fuentes naturales como los rayos ultravioleta, gama y X que se clasifican como energía ionizante que va de los  $10^{11}$  Hz a  $10^{22}$  Hz. Por su parte, las líneas de transmisión se localizan en el rango de frecuencia extremadamente baja, y son consideradas como fuentes artificiales de energía no ionizante; de la misma manera, la transmisión de radio A.M y F.M. es considerada de muy baja (VLF); no así, la transmisión de televisión, radar y microondas, que lo hacen a frecuencia muy alta (VHF), cuya banda en el espectro electromagnético va de los  $10^5$  Hz a los  $10^{11}$  Hz. En la misma figura se han representado tres diferentes casos de emisión de ondas electromagnéticas

artificiales, incluyendo la generada por las líneas de transmisión (60 Hz) que se asocia con longitudes de onda de 5 000 kH [7].

Por otro lado, la radiación de alta frecuencia asociada con longitudes de onda muy cortas (hornos de microondas) es fácilmente absorbida por los materiales biológicos (seres vivos), ya que éste tipo de radiación produce fricción entre las moléculas, no así la alta energía o radiación ionizante (rayos X, gamma) que libera electrones de las moléculas. En contraste, la frecuencia de operación de las líneas de transmisión, permite sólo la transferencia de pequeñas cantidades de energía en los materiales biológicos [7].

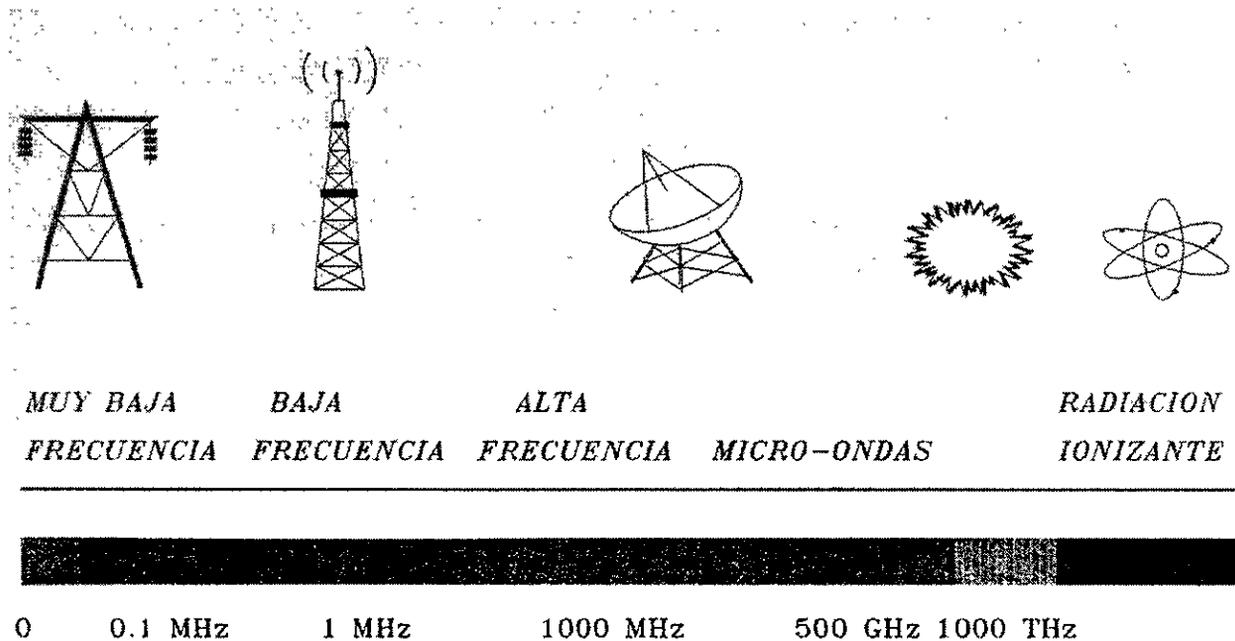


Figura 2. 17 Fuentes de campos electromagnéticos.

Los campos eléctrico y magnético producidos por las líneas de transmisión, de distribución y las subestaciones eléctricas, son producidas por las cargas eléctricas que fluyen a través de los conductores desde el sitio de la generación, hasta los sitios de su utilización. Debido al modo común de la operación de los sistemas eléctricos de energía, la operación en frecuencia alterna de 50 o 60 Hz, propicia que los campos que se generan sean variables en el tiempo y pueden ser representados gráficamente a través de mediciones promedio de su intensidad y dirección.

Como se sabe, el funcionamiento de todos los aparatos eléctricos como la radio, la televisión y los electrodomésticos dependen de la existencia del campo eléctrico y magnético. En la teoría electromagnética, cada electrón se encuentra rodeado por un campo eléctrico inherente a su naturaleza e independiente de sus movimientos. Así, en torno a un circuito eléctrico recorrido por una corriente variable (como en las líneas de transmisión) existe un campo electromagnético constituido por un campo eléctrico variable generado por las diferencias de tensión entre las distintas partes del circuito y un campo magnético variable provocado por las fluctuaciones de corriente. La intensidad del campo eléctrico disminuye gradualmente conforme se aleja de la fuente; tal es el caso que en las líneas de transmisión, distribución y aparatos electrodomésticos donde la intensidad de campo eléctrico es función de la distancia que se considere.

Para las frecuencias (50 y 60 Hz), el campo eléctrico y el campo magnético pueden considerarse en forma separada. El campo eléctrico es consecuencia del voltaje relativo de la instalación eléctrica con respecto a tierra. Los voltajes comunes utilizados van desde los 127 ó 220 Volts utilizados a nivel residencial, los 13 kV para las líneas de distribución, hasta las tensiones mayores de las líneas de transmisión (69 kV a 400 kV). El campo magnético se encuentra asociado con la magnitud del flujo de corriente (electrones en movimiento) que se transporta a través del circuito eléctrico, el cual se mide en amperes. Los circuitos a nivel residencial usualmente transportan corrientes entre los 15 y 30 A, la mayoría de los aparatos electrodomésticos demandan del orden de 10 A ó menos. Las corrientes en las líneas de distribución y las líneas de transmisión son mayores, debido a que proporcionan servicio a un número elevado de usuarios.

La siguiente tabla, presenta el rango de los valores típicos de los campos eléctrico y magnético presentes cotidianamente en diferentes ambientes. Los valores ilustran claramente las diferencias en los ordenes de magnitud para las diversas fuentes. Campos electromagnéticos de magnitud muy superior pueden encontrarse en el interior de las instalaciones industriales y en los laboratorios.

| Sitio   | Campo Eléctrico (V/m) | Campo Magnético (mG) |
|---|-----------------------|----------------------|
| Medio residencial.  | 1 – 10                | 1 – 5                |
| En la cercanía de aparatos electrodomésticos.   | 30 – 300              | 5 – 3 000            |
| Bajo líneas de distribución que alimentan zonas residenciales.  | 10 – 60               | 1 – 70               |
| Bajo las líneas de transmisión que transportan grandes bloques de energía desde los centros de generación hasta los centros de consumo. | 1 000 – 7 000         | 25 - 500             |

Tabla 2.4 Rangos de los valores típicos de campos eléctrico y magnético.

La intensidad de las magnitudes de los campos electromagnéticos decrece rápidamente con la distancia.

Derivado de los estudios epidemiológicos recientes relacionados con la incidencia de cáncer y el campo magnético en el ambiente del hogar, se ha despertado una inquietud muy particular por evaluar las fuentes de campo magnético en el hogar y las dosis que aportan cada una de ellas. Entre las fuentes más comunes de radiación electromagnética destacan:

- Aparatos electromagnéticos.
- Instalaciones eléctricas del hogar.
- Conductores de distribución aéreos y subterráneos.
- Trayectorias de corriente por tuberías de agua.

La intensidad de campo magnético máxima en el hogar se ha monitoreado en las proximidades de los aparatos electrodomésticos (particularmente aquellos que funcionan con pequeños motores y transformadores, tales como secadoras de pelo, lámparas fluorescentes y televisores de color).

Como referencia de los niveles que se producen derivados del uso de la electricidad, la tabla 2.5 presenta los valores medidos de campo eléctrico y magnético en aparatos eléctricos, subestaciones y diversas líneas de transmisión.

| Aparato o Lugar                                  | Campo Eléctrico<br>V/m, KV/m | Campo Magnético<br>:T |
|--|------------------------------|-----------------------|
| Parrilla   | 130 V/m                      |                       |
| Tostador   | 40 V/m                       |                       |
| Estéreo  | 90 V/m                       |                       |
| Cobija eléctrica                                 | 240 – 10 000 V/m             |                       |
| Refrigerador                                     | 60 V/m                       | 0.5 – 1.7             |
| licuadora  | 50 V/m                       | 60 – 700              |
| Secadora de cabello                              | 40 V/m                       | 6 – 2 000             |
| Plancha eléctrica                                | 60 V/m                       | 8 – 30                |
| TV a color                                       | 30 V/m                       | 2.5 – 50              |
| Cafetera eléctrica                               | 30 V/m                       | 1.8 – 25              |
| aspiradora                                       | 16 V/m                       |                       |
| Lámpara incandescente                            | 2 V/m                        |                       |
| – Pasillo  | 13 V/m                       |                       |
| – Recámara                                       | 2 – 8 V/m                    |                       |
| – Sala   | 3.3 V/m                      |                       |
| – Comedor  | 0.9 V/m                      |                       |
| – Cocina   | 2.6 V/m                      |                       |
| – Lavandería                                     | 0.8 V/m                      |                       |
| – Baño   | 1.2 – 1.5 V/m                |                       |
| Abrelatas  |                              | 100 – 2 000           |
| Rasuradora                                       |                              | 15 – 1 500            |
| Taladro  |                              | 400 – 800             |
| Calefactores                                     |                              | 10 – 180              |
| Batidora   |                              | 25 – 130              |
| Línea 230 KV, 200 Amperes                        | 2 KV/m                       | 5                     |
| Línea de 500 KV de doble circuito, 1 000 Amperes | 6 – 8 KV/m                   | 8                     |
| Línea 1 100 KV, 1 000 Amperes                    | 6 - 9 KV/m                   | 24                    |
| 345 KV niv. piso                                 | 7.5 KV/m                     |                       |
| 400 KV a 1.8 m                                   | mayor a 10 KV/m              |                       |
| 520 KV niv. piso                                 | 8.5 KV/m                     |                       |
| 735 KV a 2 m                                     | 14 KV/m                      |                       |
| 765 KV niv. piso                                 | 9 KV/m                       |                       |
| Campo equivalente de S.E. de 330 KV              | 4 – 9 KV/m                   |                       |

Tabla 2.5 Valores medidos de campo eléctrico y magnético ( 1 :T = 10 mG) [8]

## **2.5.2 Investigaciones sobre los efectos de los campos eléctrico y magnético a la salud**

El objetivo de los estudios de epidemiología es determinar si existe un agente promotor, por ejemplo la exposición a los campos eléctrico y magnético, y la aparición de alguna causa de muerte, usualmente mediante la definición de un riesgo relativo. El riesgo relativo es la relación de la incidencia de la enfermedad en un grupo de individuos sometidos al agente promotor sobre el riesgo de la misma enfermedad en un grupo de individuos no expuestos al agente promotor, éste grupo se denomina individuos de control.

Si el riesgo es mucho mayor que la unidad, la asociación puede ser real o aparente, debido a efectos de algunos errores de diseño del experimento. Aun en el caso de alguna asociación real y válida, queda la duda de si la enfermedad es producida por un agente promotor, o si en cambio tanto la enfermedad como la exposición están asociados de alguna manera con un tercer factor. En general se puede afirmar que los resultados disponibles hasta la fecha sobre los efectos en la salud de la exposición prolongada a los campos electromagnéticos sufre de esta limitación.

### **2.5.2.1 El campo magnético y su supuesta asociación con el cáncer**

Con la utilización en gran escala de la energía eléctrica y la utilización de la corriente alterna para el transporte de la potencia eléctrica, dentro de la trayectoria de las líneas de transmisión, se ha sumado al campo magnético terrestre una componente de 50 ó 60 Hz. El campo magnético de 50 ó 60 Hz en nuestros hogares en promedio es del orden de 1 mG pero cerca de los aparatos electrodomésticos y dentro del derecho de vía de las instalaciones eléctricas (líneas de transmisión y subestaciones), puede alcanzar los 500 mG.

Los resultados reportados, sugieren una asociación entre la exposición prolongada a los campos eléctrico y magnético y posibles efectos adversos sobre la salud de las personas. Los estudios científicos se pueden agrupar bajo cuatro enfoques diferentes: estudios epidemiológicos, los que analizan padrones de mortalidad entre la población y buscan establecer relación entre las enfermedades y sus posibles causas; estudios básicos de laboratorio, los que buscan determinar el efecto de los campos electromagnéticos sobre las células, los tejidos y sobre animales vivos; estudios sobre exposición, los que tratan de establecer patrones de exposición de las personas a los campos electromagnéticos, incluido tiempo de exposición y nivel o magnitud de la exposición; estudios de caracterización de magnitudes, los que establecen los niveles de los campos electromagnéticos producidos por el hombre y definen alternativas para disminuirlos y controlarlos.

### **2.5.2.2 Estudios epidemiológicos sobre el cáncer**

Los autores de diversos estudios epidemiológicos han sugerido una posible asociación entre la exposición al campo magnético y la incidencia de cáncer. Considerando que esto no se ha corroborado con estudios de laboratorio que permitan dimensionar tal asociación, durante los últimos veinte años, se han realizado una gran cantidad de estudios con resultados contradictorios y difíciles de generalizar. Como consecuencia, actualmente no existe una conclusión que permita abordar el problema.

Existen dos tipos de estudios epidemiológicos, los que se han orientado al análisis de la incidencia de cáncer infantil asociado con la exposición a la radiación electromagnética generada

por fuentes dentro del área residencial, y los estudios de tipo ocupacional de personas expuestas al campo magnético en el lugar de trabajo.

El punto central de estos estudios, como se derivará del análisis presentado a continuación, está constituido por la incertidumbre en la definición del nivel de exposición. Los estudios epidemiológicos de agentes ambientales tales como la radiación electromagnética son dependientes de la definición de la exposición de cada miembro, ya sea del grupo bajo estudio o del grupo control. A consecuencia de la incertidumbre en la caracterización de la exposición, los resultados de los estudios resultan siempre cuestionables.

### 2.5.2.3 Estudios sobre el cáncer infantil

El primer resultado que estableció una asociación entre los campos electromagnéticos y el cáncer se obtuvo de los estudios realizados en Denver, Colorado. Wertheimer y Leeper [9] publicaron un estudio sobre cientos de niños quienes habían muerto de cáncer en el área metropolitana de Denver. El estudio fue diseñado para probar la hipótesis de que la exposición al campo magnético puede incrementar el riesgo de contraer cáncer en la población infantil. El diseño del estudio hizo necesaria la comparación de la exposición de los infantes enfermos con un grupo sano cuya edad y lugar de nacimiento fueron idénticos.

Con el fin de estimar la exposición a la radiación electromagnética, los investigadores hicieron la suposición de que la mayor fuente de radiación en el medio estaba constituida por las líneas de transmisión en la vecindad de las residencias. Adicionalmente, adoptaron la convención de que mediante una inspección visual de estas líneas, ellos podrían formarse el juicio sobre la energía transportada y conjuntamente con una estimación de la distancia de las líneas a las residencias, clasificar su nivel de exposición (este sistema de inspección visual fue adoptado como código de Wertheimer-Leeper, o simplemente como el código de alambres). Los resultados obtenidos indicaron un riesgo tres veces superior para los residentes de las casas con mayor nivel de exposición, comparado con el riesgo observado para los residentes con nivel de exposición normal. El incremento en el riesgo aparentemente afectó todos los tipos de cáncer, entre los que la leucemia resulta ser el más común.

El estudio anterior fue recibido con gran escepticismo por la comunidad científica. Muchos especialistas mostraron escepticismo sobre la posibilidad teórica de que las intensidades de campo tan débiles pudieran inducir corrientes de suficiente magnitud para influir en funciones biológicas [10]. El mayor escepticismo surgió en relación con la caracterización del nivel de exposición. Varios consideraron poco probable que la exposición a la radiación electromagnética al exterior de las residencias pudiera ser adecuadamente caracterizada mediante percepción visual de la presencia de líneas de transmisión de alto voltaje.

Un estudio similar fue publicado al año siguiente, el código de alambres se utilizó para definir el nivel de exposición. El resultado de este estudio no confirmó la asociación con el cáncer determinada en el estudio anterior. El resultado logrado no permitió diferenciar nivel alguno de exposición entre el grupo de niños enfermos y el grupo de niños sanos [11]. Otro estudio realizado en Estocolmo [12], reportó resultados que indican incremento en el riesgo a contraer cáncer del cerebro, y una disminución en la incidencia de leucemia para los infantes expuestos.

El estudio más importante realizado, y que a la fecha se ha convertido en el estudio con mayor impacto en la opinión pública, fue dirigido por Savitz [13], en 1988. El estudio de Savitz, al igual que el estudio de Wertheimer y Leeper, se realizó en el área de Denver, una diferencia importante se derivó de la utilización de los registros de cáncer. Con relación a la caracterización

del nivel de exposición, además de utilizar el código alambre, también se realizaron mediciones puntuales en el interior de las residencias. Los resultados confirmaron un incremento superior a dos para los residentes clasificados como de alto nivel de exposición.

Sin embargo, con base en las intensidades de los campos medidas en forma puntual, no se determinó incremento en el riesgo a contraer la enfermedad. Los campos medidos en las residencias de los infantes con cáncer fueron sólo ligeramente diferentes de aquellas realizadas en las residencias de los infantes sanos. Aunque se determinó un ligero incremento en el riesgo a contraer la enfermedad para los residentes de las áreas clasificadas como de mayor intensidad del campo magnético, este riesgo resulta estadísticamente no significativo.

La discrepancia aparente de estos estudios creó un dilema; la no confirmación del riesgo de contraer cáncer asociado a los niveles de campo magnético medidos, contrariamente a lo esperado con la aplicación del código de alambres, plantea la existencia de algún factor de confusión adicional, es decir, existe otro factor diferente a los campos magnéticos que influye en los resultados de los estudios. Algunos han sugerido que el código de alambres puede ser una estimación más realista de la exposición de largo plazo que las mediciones puntuales realizadas por Savitz.

Con el fin de analizar las discrepancias sobre los procedimientos para evaluar la exposición, se realizó un estudio en la Universidad del Sur de California [14]. Este estudio presenta ventajas importantes sobre los estudios anteriores; considera un número mayor de casos, analiza un solo tipo de la enfermedad (leucemia) en lugar de todos los tipos de cáncer, y fue realizado en otra ciudad diferente a Denver. Sin embargo el aspecto más importante posiblemente se constituyó en el uso de un instrumento recientemente desarrollado para la determinación del nivel de exposición, el cual fue instalado sobre los sitios de observación por períodos de 24 horas o más, y debido a esto logró proporcionar mayor información sobre los niveles de exposición que los procedimientos basados en el código de alambres y las mediciones puntuales.

Los resultados de este estudio, en lugar de mejorar el conocimiento del problema, parecen aumentar las discrepancias. No es posible establecer asociación entre los niveles de exposición registrados y la incidencia de la leucemia. Para los infantes residentes en las áreas de mayor exposición, se establece un incremento moderado en el riesgo de la enfermedad. Mientras que para los residentes de las áreas clasificadas como de nivel intermedio de exposición, se determina un riesgo inferior al establecido para residentes ubicados en las áreas del más bajo nivel de exposición. Estos resultados parecen indicar que los niveles promedio de exposición al campo magnético en las residencias son irrelevantes para la incidencia de la enfermedad.

Por el contrario, definiendo el nivel de exposición con base al código de alambres, los resultados son consistentes estableciéndose un incremento ligeramente superior a dos en el riesgo a contraer la enfermedad. Llegándose inclusive a establecer una relación estadísticamente significativa entre la dosis y la respuesta.

Otros resultados del estudio de la Universidad del Sur de California, incluyen asociaciones estadísticamente significativas entre la leucemia y el uso de algunos aparatos electrodomésticos como son los televisores blanco y negro y las secadoras de cabello. Se estableció también la asociación entre el uso de pesticidas al interior de las residencias y la enfermedad. El significado de estos resultados hace necesario el desarrollo de estudios adicionales.

El estado actual de las investigaciones indican resultados contradictorios. En general, se puede afirmar que los resultados que asocian el riesgo de incremento en la incidencia de cáncer con la caracterización de la exposición a partir del código de alambres resultan positivos. Sin embargo, la utilización de resultados de caracterización del nivel de exposición a través de mediciones no establecen asociación consistente alguna.

A la fecha se han debatido tres posibles explicaciones. Una de ellas argumenta que el código de alambres es indicador de algo más que la simple presencia de campo magnético. Lo que esto puede ser parte de un enigma, incrementado por el limitado conocimiento sobre la incidencia de cáncer infantil. Algunos otros factores que han mostrado asociaciones consistentes con el incremento en el riesgo de la enfermedad son: densidad de tráfico, actividades de los padres en algunas actividades industriales y alimentación materna de bebés. La evidencia de cualquiera de estas causas como factor determinante en la incidencia del cáncer infantil continúa siendo muy débil.

Otro argumento afirma que el código de alambres si es un buen indicador de la caracterización a la exposición prolongada a los campos magnéticos, aunque se desconoce la importancia de las dosis de campo magnético desde el punto de vista biológico. Se ha sugerido que mientras que los niveles promedio de campo magnético resultan biológicamente poco importantes, las variaciones rápidas conocidas como picos o transitorios, pueden explicar la asociación con el código de alambres como elemento de la caracterización de la exposición. La implicación de esto es que estas variaciones rápidas son más comunes en áreas con mayor número de alambres en la vecindad de las residencias. La validez de esto plantea una nueva incógnita.

El tercer argumento establece que la generalidad de los estudios en esta dirección presenta limitaciones en el diseño del experimento, lo que conduce a factores de confusión en los resultados. Todas estas posibilidades se analizan actualmente y se busca integrarlas en los estudios que se realizan sobre este tópico en diversos países.

### **Estudios ocupacionales.**

Un segundo grupo de resultados de estudios epidemiológicos, establecen algunas asociaciones entre los campos electromagnéticos de muy baja frecuencia y la incidencia de cáncer entre las personas clasificadas como empleados de alto riesgo. Estas ocupaciones incluyen: electricistas, soldadores, empleados de empresas eléctricas, empleados de empresas telefónicas y otros. Varios estudios determinan un incremento moderado sobre el riesgo en la incidencia de leucemia y tumores cerebrales.

Aunque estos resultados se han considerado como complementarios de la asociación entre los campos electromagnéticos y el cáncer, igualmente, los estudios ocupacionales han mostrado deficiencias en la caracterización de los niveles de exposición, es decir, sólo se utiliza el tipo de empleo como evidencia de la exposición. Actualmente se realizan estudios que buscan establecer una caracterización adecuada de la exposición a los campos electromagnéticos en estas ocupaciones, para posteriormente buscar definir su asociación con el posible incremento en la incidencia de esta enfermedad.

Existen resultados reportados sobre malformaciones en los descendientes de trabajadores expuestos a ambientes electromagnéticos [15]. Los investigadores de este estudio, mediante una encuesta realizada en Estocolmo, determinaron un incremento en el índice de malformaciones en los descendientes de trabajadores de las instalaciones eléctricas de alta voltaje. A la fecha no se tiene noticia de otros estudios similares

Actualmente se realiza un gran número de estudios para caracterizar la exposición a los campos electromagnéticos en varios ambientes ocupacionales, los resultados se utilizarán como complemento a los riesgos asociados a la incidencia del cáncer.

### 2.5.3 Estudios de laboratorio sobre el cáncer y los campos generados por los sistemas de transmisión de 50 ó 60 Hz

Del orden de 50 estudios epidemiológicos se han realizado sobre la incidencia del cáncer en niños y en adultos, tanto para el medio residencial como para el ocupacional, derivados de la exposición prolongada a los campos eléctrico y magnético generados por los sistemas eléctricos de potencia y por la exposición a los aparatos electrodomésticos [16], [17]. En general, los diversos estudios establecen la posible existencia de una asociación débil entre la exposición a los campos de 50 ó 60 Hz y algunos tipos de cáncer (predominantemente leucemia y tumores cerebrales). Sin embargo, estos estudios presentan un gran número de deficiencias, incluida la medición inconsistente de la dosis o el nivel de exposición al campo magnético, posibles confusiones en la selección de los controles y bajo número de casos de estudio y sus controles.

Considerando que los estudios epidemiológicos que determinan una asociación positiva definen incremento en el riesgo del orden de dos, generalmente se acepta que si la exposición a los campos de 50 ó 60 Hz es el agente promotor, el efecto más sutil. Adicionalmente, la posibilidad e errores en estos estudios es muy elevada si el incremento en el riesgo es inferior a tres. En consecuencia, resultados de epidemiológica tan débiles, para ser convincentes, deberían ser soportados por estudios de laboratorio, los cuales deberán mostrar que la exposición de las células y seres vivos a los campos de 50 ó 60 Hz actuará como promotor del cáncer.

El cáncer o un tumor maligno se constituyen por un crecimiento nuevo aparentemente autónomo de los tejidos y tendrá la habilidad para invadir el tejido cercano y, en la mayoría de los casos, dividirse y migrar del sitio original a sitios distantes donde nuevos tejidos del mismo origen podrán establecerse. Células normales podrán sufrir la transformación mediante un proceso de iniciación, promoción y progresión que las conduzca a la formación de tejido maligno. La iniciación se describe como el evento o eventos en las células que han sido expuestas a un promotor del cáncer y que produce daño sobre las cadenas del Ácido Dexosirribonúcleico (DNA). Las células son alteradas de manera irreversible a una condición que tiene una alta probabilidad de evolucionar hacia la formación de tumores malignos. El agente promotor deberá ser de la suficiente robustez para convertirse en iniciador. Una célula iniciada no evoluciona por sí misma hacia la formación del cáncer, la célula iniciada permanecerá latente hasta que un agente estimulante promueva la formación del tumor.

Los promotores del cáncer producen cambios importantes en la actividad de las enzimas, en consecuencia las células pueden tomar diferentes características morfológicas dando lugar a células transformadas [18]. En resumen, promoción es el proceso a través del cual una célula iniciada evoluciona hacia un tumor. Para arribar a un tumor, las células deben de exponerse a un iniciador y posteriormente a un agente promotor. Aunque el modelo iniciación-promoción describe la tumoración como un proceso de dos etapas, debe de aclararse que cada etapa puede consistir de más de un evento.

La progresión describe los cambios que van tomando lugar en un tumor benigno hacia uno de carácter maligno, y es el resultado de mutaciones adicionales al evento original de iniciación. En conclusión, la progresión es el proceso a través del cual las células de un tumor benigno superan las gran mayoría de sus limitaciones para multiplicarse, organizarse y adquirir su malignidad.

Se han realizado experimentos en cada una de estas etapas del proceso de tumoración, con el fin de determinar si la exposición a los campos generados por las líneas de transmisión de alto voltaje, actúa como agente promotor en alguno de los eventos, los resultados conocidos se resumen a continuación.

## **Iniciación.**

Se han realizado estudios para determinar si la exposición a los campos generados por las líneas e transmisión, producen algún daño sobre la cadena del DNA [19], [20], [21] [22]. Todos han concluido que los campos magnéticos de 50 ó 60 Hz no son promotores (etapa de iniciación) del cáncer. Actualmente se realizan investigaciones para determinar si los campos pueden ser promotores o aceleradores del cáncer en células iniciadas.

## **Promoción.**

Existe evidencia de algunos estudios que revelan que los campos producidos por las líneas de transmisión promueven el desarrollo del cáncer sobre células de tejido iniciadas.

Estudios de probeta. Estudios realizados en células humanas han reportado un incremento en Acido Ribonúcleico (RNA) en respuesta a la exposición a campos de extrema baja frecuencia (50 ó 60 Hz) [23], [24]. Los cambios en el RNA muestran una dependencia importante de la amplitud y la frecuencia de los campos aplicados, así como del tiempo de exposición. Una explicación posible a estas observaciones establece que el campo altera la constante de las reacciones intermedias involucradas en la síntesis y degradación del RNA. Se ha observado también el incremento en las síntesis de otras proteínas en otros estudios de células expuestas a los campos de extrema baja frecuencia. Los resultados sobre RNA se han asociado con un efecto modulador de los campos sobre la evolución, aunque no se ha obtenido evidencia concreta de que estos efectos conduzcan a la formación de una nueva célula tumoral análoga a la que se obtienen con promotores del cáncer bien identificados. El número de experimentos realizados en este sentido ha sido limitado, por lo que no es aún posible determinar el efecto del campo magnético en el proceso evolutivo de las células afectadas. El resultado de estudios en progreso resultará de mucha utilidad.

Otros estudios [18],[22], [25], [26] y [27], han determinado incremento en otra enzima conocida como ODC (ornithine decarboxylase) como consecuencia de la exposición de células malignas a la exposición de los campos electromagnéticos de 60 Hz. La inducción de la enzima ODC se considera la reacción metabólica más importante de los promotores del cáncer.

Estudios en seres vivos [28]. La interrogante bajo estudio gira alrededor del posible efecto de la hormona conocida como melatonin, producida por la glándula pineal, sobre el crecimiento de las células malignas. Se ha acumulado experiencia que indica que posiblemente el cáncer del tórax y otros tipos de cáncer pueden ser limitados por esta hormona. Debido a la reducción que sobre la producción de esta hormona se ha asociado con los campos creados por las líneas de transmisión [29], se ha sugerido que la exposición a los campos de extrema baja frecuencia puede influir en parte a un incremento del cáncer del tórax. Sin embargo, no se ha determinado efectos biológicos derivados de los niveles de melatonin sobre la salud de los animales estudiados.

Por el momento, los resultados de diversos estudios [30], [31], [32], [33], [34], conducen a resultados limitados que permiten concluir que los campos de 50 ó 60 Hz no son promotores importantes del cáncer.

## **Progresión.**

Los efectos de los campos y las corrientes de las líneas de transmisión sobre la proliferación y el crecimiento del cáncer han sido abordados en algunos otros estudios [35], [36], [37]. En

algunos se ha reportado disminución del crecimiento de los tumores, en otros casos no se ha observado efecto alguno.

En conclusión, se hace necesario contar con la mayor evidencia para determinar si los campos de 50 ó 60 Hz, pueden actuar como promotores o aceleradores del cáncer. La evidencia disponible parece indicar que no existe efecto alguno. Los estudios en progreso permitirán aportar mayor información al conocimiento presente.

## **2.6 Ruido audible**

Cualquier persona que de alguna u otra forma haya estado cerca de una línea de transmisión de energía eléctrica de alto voltaje seguramente habrá escuchado el ruido que de ella emana. Este ruido es debido a las pequeñas ondas de sonido generadas por las descargas producidas en la superficie de los conductores y puede clasificarse en dos grupos: una componente de banda ancha con un significativo contenido en altas frecuencias, que es el que prácticamente lo distingue de otros ruidos ambientales y una componente de baja frecuencia (también llamada de tonos puros) que se superpone a la componente de banda ancha.

La primera componente es generada a lo largo de todo el conductor a partir de las propias irregularidades de éste, por la nieve, el hielo, la humedad, la lluvia y partículas extrañas depositadas en el conductor en resumen por las fuentes corona, cuyas ondas de sonido llegan al punto de medición del ruido en forma aleatoria, las cuales son las de mayor contribución en los niveles de ruido, y la segunda componente se genera por movimientos resultantes de la influencia del campo eléctrico alterno en la vecindad del conductor sobre los iones que son atraídos y repelidos por los conductores, con los que su frecuencia de ocurrencia más significativa es de 120 Hz para un sistema que trabaja a 60 Hz.

La importancia del estudio del ruido audible está en el hecho del impacto que este ruido puede producir en las personas que habitan en las cercanías de las líneas de transmisión: una línea que pueda tener niveles de ruido considerables no tendrá el mismo efecto si está ubicada en una zona despoblada, que si se encuentra en una zona poblada con niveles bajos de ruido de fondo.

Actualmente, la tendencia de aumentar los niveles de voltaje en las líneas de transmisión para transportar mayores cantidades de energía, implica que los gradientes producidos en la superficie de los conductores aumentan, aumentando los niveles de ruido audible en la vecindad de las líneas.

En la literatura existen diversos métodos para evaluar los niveles de ruido audible a una distancia lateral de las líneas de transmisión, ya sea en laboratorios (con condiciones controladas) o directamente a partir de líneas reales.

### **2.6.1 Efecto de las condiciones ambientales.**

El ruido depende en gran medida del número de fuentes corona sobre la superficie del conductor, En buen tiempo, cuando las principales fuentes de corona están constituidas por las irregularidades del conductor y los elementos extraños que pueda contener sobre su superficie, los niveles de ruido audible son bajos llegando incluso, en el límite de derecho de vía de línea, a confundirse con el ruido ambiental imperante en la zona. Sin embargo, en condiciones de mal tiempo, como pueden ser los periodos de lluvia, nieve y neblina, se incrementan las fuentes corona debido a la formación de gotas de agua u hojuelas de nieve sobre la superficie de los

conductores. Esto incrementa la actividad de nieve sobre la superficie de los conductores. Esto incrementa la actividad corona, aumentando los niveles de ruido generados por la línea de transmisión.

Los niveles de ruido audible generados por una línea de transmisión en condiciones de buen tiempo son muy difíciles de evaluar, ya que dependen de un gran número de factores ambientales, como son: humedad, presión, temperatura, contaminación, viento, etc. Esto hace que cada línea tenga niveles de ruido audible medidos bajo ciertas condiciones de todos los parámetros ambientales involucrados. Por ejemplo, cuando el viento excede los 6 m/s las mediciones de ruido audible se consideran inválidas, debido a que el viento induce ruido.

Además, los sonidos ambientales generalmente intervienen en las mediciones de ruido generados por una línea. T. Vinh [38] encontró que en más del 60 % de las mediciones realizadas a 15 metros laterales a partir de una línea de transmisión utilizando tres diferentes niveles de voltaje mostraron curvas de distribución muy irregulares y distorsionadas, atribuyéndolo al ruido ambiental existente en zonas (como viento, vehículos automotores, aviones, etc.) los que probablemente contribuyeron en gran medida a las discrepancias en las distribuciones. Cuando realizó mediciones con la línea viva y la línea desenergizada, las diferencias encontradas fueron mínimas, lo que implica que, como una sencilla deducción, puede decirse que el ruido audible en buen tiempo y los niveles de ruido ambientales son más o menos de la misma magnitud.

Debido a la diversidad de variables que intervienen en la elevación del ruido en las líneas de transmisión, es muy difícil obtener la formulación analítica que pueda predecir dichos niveles de sonido. Sin embargo, considerando casi la totalidad de los parámetros constantes, es posible obtener formulaciones generales en forma empírica a partir de las mediciones en líneas existentes o en laboratorios de prueba, y aplicarlas a otras líneas para su evaluación.

Cuando se tienen parámetros similares entre una línea existente y una línea nueva a la cual se desea realizar los cálculos de evaluación de ruido audible, es recomendable utilizar formulaciones comparativas. Sin embargo, debido a que muchas veces no se tienen disponibles tal información, es necesario utilizar formulaciones generales.

Se sabe que bajo condiciones de mal tiempo, generalmente en lluvia fuerte, los parámetros ambientales tales como, presión, temperatura, humedad, etc., pierden importancia. Esto significa que, bajo una condición de lluvia dada, los niveles de ruido audible dependerán en gran medida de los gradientes de voltaje sobre la superficie del conductor y del nivel de lluvia que afecte la línea. Otro aspecto muy importante es que, con estos dos únicos parámetros (que además pueden ser controlables), las condiciones ambientales (en este caso los conductores totalmente mojados) pueden ser reproducidas en laboratorio, lo que hace muy factible el proceso de evaluación de ruido.

Al inicio de la lluvia, cuando los conductores no están completamente mojados, existe una considerable variación en los niveles de ruido conforme varía la intensidad de lluvia. Cuando los conductores se encuentran totalmente mojados, disminuyen considerablemente las variaciones en los niveles de ruido audible, debido a que, aún cuando la lluvia sea más intensa, los conductores estarán saturados con gotas de agua, que son las que actúan como fuentes corona. Esta condición también puede presentarse en condiciones de neblina, si es lo suficientemente intensa y prolongada.

Cuando las pruebas se realizan en laboratorio, los valores alcanzados de ruido audible, a un mismo nivel de gradiente superficial en los conductores, son menores que cuando se realizan en líneas reales. Este fenómeno puede relacionarse al hecho de la que saturación en los conductores se alcance más rápido en pruebas de laboratorio que en líneas reales.

En pruebas realizadas con diferentes intensidades de lluvia, se encontró que, a un nivel de voltaje constante, los niveles de ruido audible dependen del rango de lluvia: un incremento en la relación de lluvia va acompañada por un aumento en los niveles de ruido audible.

Sin embargo, para tener una relación exacta entre el ruido audible y los niveles de lluvia también deben tomarse en cuenta la dependencia con la configuración del conductor, si el conductor es nuevo o viejo y los niveles de gradiente. Kirkham [39] concluyó que los incrementos en niveles de lluvia generalmente van acompañados de incrementos en los niveles de ruido audible, y que a un elevado nivel de lluvia no existe diferencia entre considerar un cable nuevo o viejo.

Aún cuando el calentamiento producido en los conductores por la circulación de corriente puede inhibir algunas fuentes corona, no se considera como un factor importante en la evaluación del comportamiento de una línea.

### 2.6.2 Evaluación para ruido audible en líneas de transmisión

En la operación de las líneas de transmisión de energía eléctrica de alto voltaje intervienen elementos que son indispensables para la conducción de la energía que se transmite desde un centro de generación hasta los centros de consumo. Uno de estos elementos es el conductor. Debido al potencial al que se encuentran estos conductores se forman gradientes de voltaje en la superficie de los mismos. Cuando los voltajes no son muy elevados (115 kV o menores), el fenómeno asociado con estos gradientes pueden no tener un impacto importante sobre el medio ambiente. Sin embargo, en la actualidad, todo el proceso industrial en el cual se basa el desarrollo económico depende de la energía eléctrica, por lo que cada día la demanda eléctrica es mayor, requiriéndose voltajes más elevados de transmisión.

Al aumentar los voltajes de los conductores, se produce descargas locales por ionización del aire circundante en la superficie del conductor debido a los elevados gradientes. Este fenómeno se conoce como efecto corona. Los pequeños sonidos producidos por estas descargas se conocen como ruido audible. Estos sonidos pueden presentarse por ondas acústicas de impulso que se superponen en forma aleatoria y que son emitidas a partir de la formación de los iones en la vecindad del conductor.

Como el fenómeno involucrado durante la formación de estos iones es de la misma naturaleza física que los que causan la radio interferencia y las pérdidas corona, puede esperarse que existan influencias debido a condiciones meteorológicas, parámetros eléctricos y parámetros geométricos de los conductores.

Respecto a las condiciones meteorológicas, generalmente el ruido audible es mayor en mal tiempo (lluvia, neblina o nieve) que en un buen tiempo. Los parámetros eléctricos y geométricos para evaluar el ruido audible son:

- Gradiente superficial del conductor.
- Radio de los conductores.
- Número de conductores por fase.
- Disposición de los conductores.

Un aspecto importante en las mediciones de ruido audible a partir de las líneas de transmisión es que no pueden ignorarse el ruido de fondo. Este ruido tiene una característica local (de acuerdo

al lugar; pueblo, ciudad, área no habitada, etc.) y además tiene un factor de tiempo (día, noche, estación del año, etc.). Adicionalmente, el mal tiempo también puede modificar los niveles de referencia del ruido, ya que la lluvia en particular es un agente que modifica el nivel de ruido de fondo, cuando permanece invariables los demás factores.

Actualmente, se están tomando muy en cuenta los niveles de contaminación ambiental, procurando que sus niveles no sobrepasen cantidades tolerables por el ser humano. El ruido audible es una forma de contaminación ambiental, siendo particularmente importante debido a que está formando por componentes a frecuencias entre los 100 Hz y los 1 500 Hz, las cuales cubren el espectro en donde el oído humano es más sensible (1-4 kHz).

A nivel mundial, existen diversos métodos para predecir los niveles de ruido audible en una línea de transmisión. Debido a la cantidad de parámetros que intervienen en la evaluación de este ruido, cada método incluye parámetros obtenidos en forma empírica o semiempírica, dependiendo de las características de la línea y de las condiciones meteorológicas, y prácticamente establecen la diferencia entre cada uno de los métodos. Una particularidad importante es que la mayoría de los métodos ofrecen una buena relación entre los resultados calculados y los obtenidos en campo.

En México no existe ningún método sistematizado de medición y de predicción de ruido audible generado por las líneas de transmisión. El objetivo de este documento es informar acerca de los diferentes métodos de evaluación y predicción del ruido audible y establecer, de acuerdo a las características de las líneas en nuestro país, el método más adecuado para poder calcular o predecir los niveles de ruido audible, tomando en cuenta las condiciones inherentes a las líneas de transmisión. con base en los factores que intervienen, los conceptos más importantes a considerar son:

- Gradiente de voltaje superficial sobre los conductores.
- Parámetros meteorológicos.
- Medio ambiente.

### **Gradiente de voltaje superficial.**

El factor de mayor influencia en el comportamiento corona y, por lo tanto, en la evaluación del ruido audible en una línea de transmisión de energía eléctrica de alto voltaje es el gradiente de voltaje superficial sobre los conductores.

Este gradiente está fuertemente influenciado por el diámetro de los conductores; a mayor diámetro menores niveles de gradiente. Sin embargo, para voltajes mayores de 200 kV, el aumentar el diámetro de los conductores es un método no práctico para reducir los niveles de gradiente, por lo que se utilizan grupos de conductores por fase, con lo que se obtienen dos beneficios prácticos; se reducen los gradientes de voltaje superficial de los conductores y se mantienen los diámetros de los conductores dentro de límites prácticos.

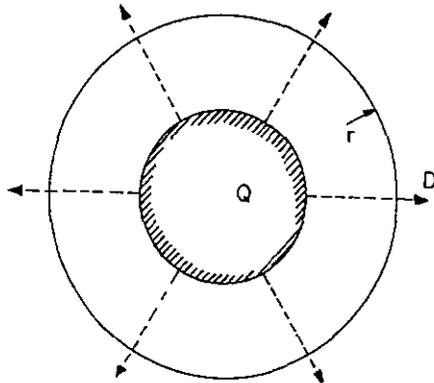
El espaciamiento entre los conductores es el parámetro que ocupa el segundo lugar en cuanto a la influencia en los niveles del gradiente de voltaje superficial, a menor espaciamiento mayores niveles de gradiente. La altura de los conductores y la presencia de los hilos de guarda son parámetros que tienen poca influencia sobre los niveles de gradiente.

En general, para calcular los gradientes de voltaje superficiales en los conductores, se consideran las siguientes simplificaciones:

- La tierra se considera una superficie infinita, plana, conductora y horizontal.
- Los conductores se consideran cilindros circulares lisos e infinitamente largos, paralelos entre sí y el plano de tierra.
- Las superficies de los conductores se consideran equipotenciales, con potenciales aplicados conocidos.
- El plano de tierra se considera a un potencial cero.
- Se desprecia la influencia de las estructuras, soporte de los conductores y de cualquier otro objeto cercano.

### Conceptos básicos.

Para establecer las relaciones existentes en la superficie del conductor de una línea de transmisión, considérese una esfera (figura 2.18) en la cual se desea conocer el campo eléctrico en la zona circundante a ella a la distancia  $r$  (considerando una superficie gaussiana), con una carga  $Q$  uniformemente distribuida. Debido a la simetría de la esfera, la densidad de flujo  $D$  es radial y uniforme sobre la superficie gaussiana. La magnitud de este flujo se obtiene dividiendo el flujo total  $Q$  (igual a la carga encerrada) por el área  $4\pi r^2$  sobre la cual el flujo abandona la esfera en forma uniforme. Es decir:



...(1)

$$D = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

justo como si la carga de la esfera estuviera concentrada en su centro. El campo eléctrico a la distancia  $r$  es:

Figura 2.18 Campo eléctrico de una esfera cargada.

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \quad \dots(2)$$

en donde  $\epsilon$  es la permitividad del espacio libre.

Cuando se analiza un alambre, la superficie gaussiana es un cilindro concéntrico de radio  $r$ , con sus extremos planos (figura 2.19). Se ignoran los efectos de los extremos considerando que el alambre es muy largo. Lo anterior implica que  $D$  es radial en cualquier lugar y perpendicular al eje del

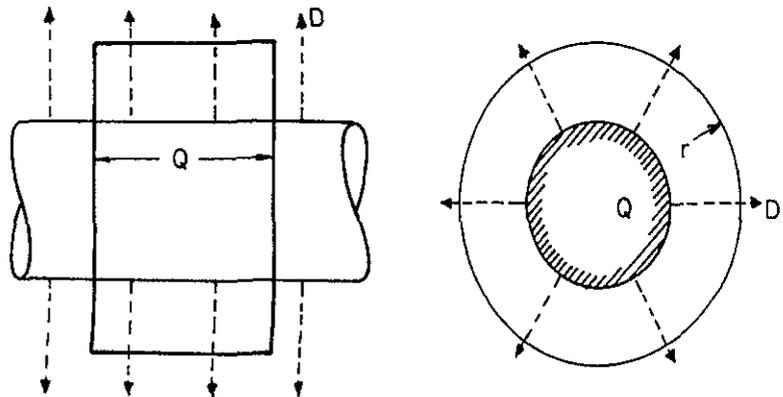


Figura. 2.19 Campo eléctrico de un alambre cargado.

Cilindro y que su magnitud es uniforme sobre la porción curva de la superficie gaussiana. Como no existe flujo a través de los extremos de la superficie gaussiana,  $D$  no tiene componente perpendicular a dichos extremos. Por lo tanto, el flujo total  $Q$  se encuentra uniformemente distribuido sobre la superficie curva solamente y el área de esta superficie es  $2\pi r$ . Por tanto:

$$D = \frac{Q}{2\pi r} \quad \dots(3)$$

y

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon r} \quad \dots(4)$$

### Dos conductores cilíndricos paralelos con cargas opuestas.

La siguiente figura 2.20 muestra dos conductores cilíndricos dispuestos en forma paralela uno de otro, en donde cada conductor tiene un radio  $R$  y una distancia  $t$  entre sus centros. Uno de estos conductores, ubicado a una distancia  $+t/2$  sobre el eje X del sistema de coordenadas mostrado, tiene una densidad de carga lineal de  $+Q$ . El otro conductor tiene la misma carga pero de signo opuesto y ubicada a  $-t/2$ . Los límites de estos conductores son equipotenciales y circulares: se considera que no existe ninguna influencia eléctrica externa.

Debido a que la atracción existente entre las cargas contenida sobre los conductores es mayor que la acción de repulsión dentro de cada conductor debido a la existencia de cargas de la misma polaridad, se produce una densidad de carga superficial sobre los lados adyacentes de los conductores que es significativamente mayor que sobre sus lados opuestos. El fenómeno físico anterior significa que la ubicación de la carga lineal se desplaza del centro del conductor.

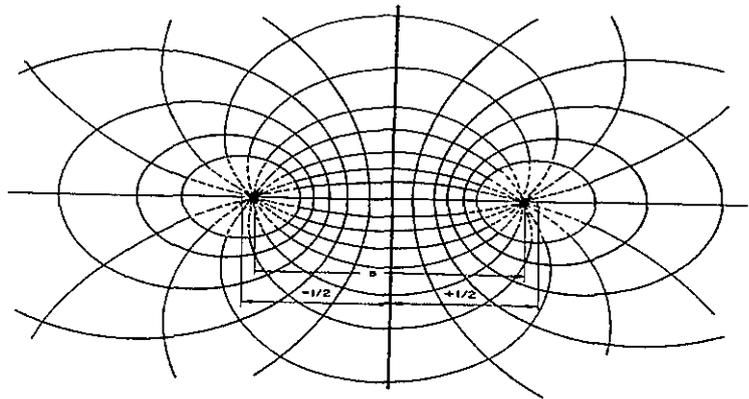


Figura 2.20 Dos conductores cilíndricos paralelos con cargas opuestas.

Matemáticamente, el desplazamiento  $s$  sufrido por las cargas lineales debido a la fuerza de atracción entre los conductores (que establece la misma trayectoria de campo externo de los conductores, de la misma forma que trabajan las cargas reales sobre los límites de los conductores) es:

$$s = \sqrt{t^2 - (2R)^2} \quad \dots(5)$$

Para el caso en que  $2R$  es similar a la distancia  $l$ , la carga lineal se mueve hacia la parte adyacente entre los conductores. La capacitancia en forma exacta, considerando el efecto de atracción entre los conductores es:

$$C = \frac{\pi\epsilon}{\ln \left[ \frac{l}{2R} + \sqrt{\left(\frac{l}{2R}\right)^2 - 1} \right]} \quad \dots(6)$$

Para el caso en que el término  $2R$  sea pequeño con respecto a  $l$ , el valor de  $s$  es esencialmente  $l$ . El valor de la capacitancia, en forma bastante aproximada, puede calcularse por la expresión:

$$C = \frac{\pi\epsilon}{\ln \frac{l}{R}} \quad \dots(7)$$

lo que considera que la carga lineal equivalente se localiza al centro del conductor.

### Un solo conductor sobre tierra.

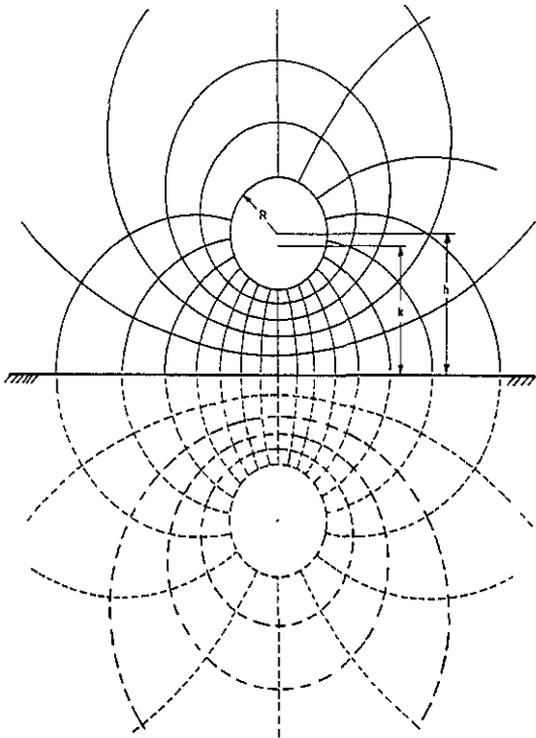


Figura 2.21 Disposición de un solo conductor sobre tierra y su imagen.

Cuando se analiza un solo conductor sobre el plano de tierra, se hace uso del método de las imágenes, el cual ubica un conductor imagen de las mismas características y a la misma profundidad que la altura del conductor real, pero con carga opuesta. La siguiente figura 2.21 muestra la disposición del arreglo. El parámetro  $h$  indica la altura desde el centro del conductor real al plano de tierra al centro del conductor imagen. El radio del conductor es  $R$ . Utilizando el razonamiento anterior, (de los conductores paralelos con cargas opuestas) el efecto de atracción de las cargas (carga real y carga imagen) produce que la carga lineal equivalente se encuentre desplazada a una distancia  $k$  a partir del plano de tierra, dada por la fórmula:

$$k = \sqrt{h^2 - R^2} \quad \dots(8)$$

La capacitancia de este arreglo es igual a:

$$C = \frac{Q}{E} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left[\frac{h}{R} + \sqrt{\left(\frac{h}{R}\right)^2 - 1}\right]} \quad \dots(9)$$

Se observa, de la misma figura, que la carga lineal se encuentra ubicada muy cerca del centro del conductor. Esta distancia  $k$  está en función directa de la altura  $h$  y del radio  $R$ . Cuando la relación  $(h/R)$  es muy grande (mayor de 100), como es el caso de las líneas de transmisión, esta distancia es muy corta, por lo que la carga prácticamente se encuentra en el centro del conductor. Esta representación de la carga en los conductores (prácticamente al centro) implica automáticamente una distribución uniforme de carga y de campo eléctrico alrededor de la superficie del conductor. Esto permite utilizar el método de los coeficientes de potencial de Maxwell para el cálculo de cargas y de campos eléctricos sobre los conductores de un sistema multiconductor.

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon r} \quad \dots(10)$$

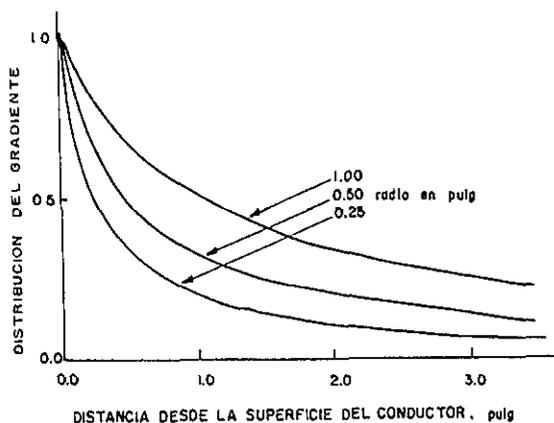
Lo anterior implica que, si  $Q$  es la carga por unidad de longitud sobre la superficie del conductor, el gradiente de voltaje (el cual es radial) a cualquier punto  $r$  está dado por:

$$Q = C \cdot V \quad \dots(11)$$

en donde  $Q$  esta relacionada al voltaje aplicado  $V$  por la capacitancia  $C$ :

donde:

$$C = \frac{2\pi\eta}{\ln\frac{2h}{R}} \quad \dots(12)$$



Para el análisis de conductores lisos, el gradiente de voltaje, es máximo en la superficie del conductor y varía en forma inversa con la distancia a partir del centro del conductor. La figura 2.22 muestra la variación del gradiente de voltaje con la distancia, a partir de la superficie del conductor. En la realidad esta distribución del campo eléctrico se distorsiona cerca de la superficie del conductor debido a las irregularidades tales como el trenzado y partículas extrañas.

Figura 2.22 Distribución del gradiente de voltaje en la vecindad del conductor.

## Dos o más conductores sobre tierra.

La figura 2.23 muestra la disposición de dos conductores paralelos sobre el plano de tierra. Considerando que los conductores *a* y *b* tienen la misma carga (con la misma polaridad), el desplazamiento de las cargas lineales reales en los conductores se indica por la distancia *c* por el efecto de repulsión entre los conductores y por la distancia *s* por el efecto de atracción con sus cargas imágenes correspondientes.

Para los arreglos de las líneas de transmisión de alto voltaje, se consideran

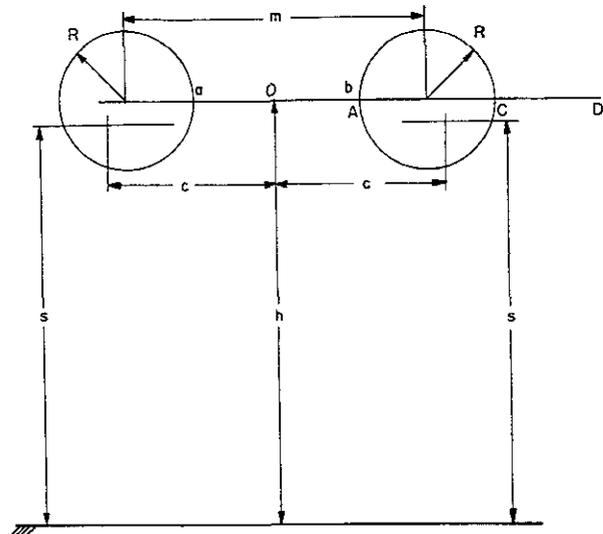


Figura 2.23 Disposición de dos conductores sobre tierra y el efecto de sus imágenes

que los conductores son paralelos entre sí, con longitudes muy largas y cercanas a un plano de tierra considerado como un plano extenso y conductor. En este caso, como los espaciamientos entre los dos conductores o de cualquier conductor a tierra es grande comparado con los radios de los conductores, pueden utilizarse, con un buen grado de precisión, las formulaciones aproximadas anteriormente descritas, lo que implica considerar que las cargas lineales representativas de cada conductor se encuentran prácticamente ubicadas en sus centros.

## Distribución del gradiente de voltaje.

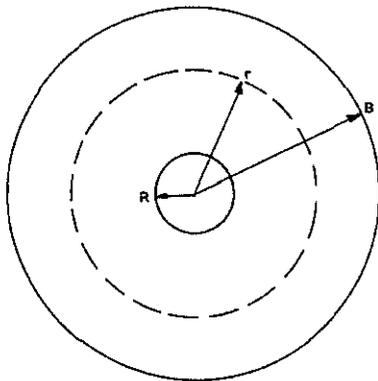


Figura 2.24 Disposición de dos conductores cilíndricos coaxiales.

Para analizar la distribución del gradiente de voltaje en la superficie del conductor, considérese la figura 2.24, en la que se muestra dos conductores cilíndricos coaxiales. Si  $Q$  es la carga por unidad de longitud que existe sobre la superficie del conductor, el gradiente de voltaje es radial y, evaluado sobre el punto  $r$ , se tiene la siguiente expresión

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon r} \quad \dots(13)$$

La capacitancia entre los dos cilindros coaxiales es:

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{B}{R}} \quad \dots(14)$$

$E_r$  alcanza un valor máximo en la superficie del conductor y está dado por la siguiente relación:

$$E_s = \frac{Q}{2\pi\epsilon R} \quad \dots(15)$$

por lo que el gradiente sobre cualquier punto  $r$  puede expresarse en términos del gradiente superficial máximo en la superficie del conductor. Es decir:

$$E_r = E_s \left( \frac{R}{r} \right) \quad \dots(16)$$

El factor  $(R / r)$  será referido como la distribución del gradiente de voltaje. La figura 2.22 muestra la distribución del gradiente de voltaje como una función de la distancia a partir de la superficie del conductor. Se observa que la distribución aumenta al aumentar el radio  $(R)$  del conductor.

Si se considera que el arreglo de dos conductores sobre el plano de tierra de la figura 2.28 de altura  $h$  y el espaciamento entre los conductores  $m$  son muy grandes comparados con el diámetro  $2R$  del conductor, la distribución de gradiente será muy uniforme alrededor de la circunferencia del conductor. Por lo que, para el mismo diámetro del conductor, la distribución de gradiente cerca del conductor es igual para los arreglos de dos cilindros coaxiales (figura 2.24) y un solo conductor sobre tierra (figura 2.21).

Para los valores cortos de la distancia entre conductores  $(m)$ , como es el caso de conductores duales, existe una apreciable distribución no uniforme del gradiente de voltaje alrededor de la circunferencia del conductor, debido a la proximidad del otro conductor. La figura 2.25 muestra la variación del gradiente de voltaje alrededor de la circunferencia del conductor para

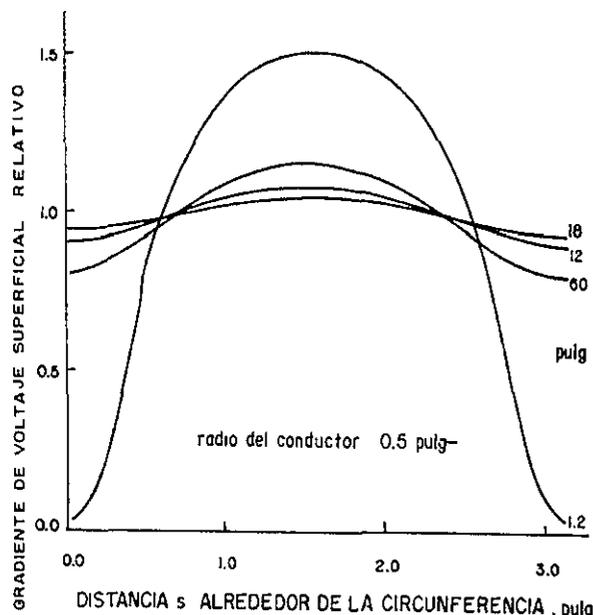


Figura 2.25 Distribución del gradiente para sistemas duales.

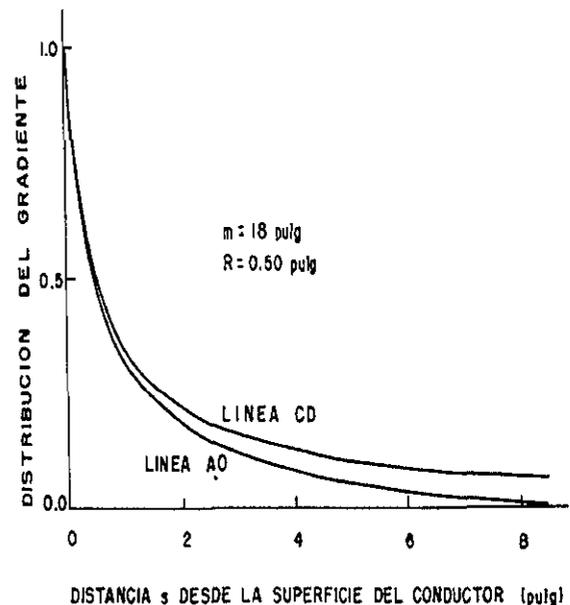


Figura 2.26 Distribución del gradiente para el arreglo de dos conductores.

el arreglo de dos conductores (fig. 2.23) separados por una distancia corta. La figura 2.26 muestra la variación del gradiente de voltaje a lo largo de las líneas de flujo de campo eléctrico que inician en los puntos de gradiente superficial mínimo y máximo. La distribución del gradiente a lo largo de las otras líneas de flujo que inician a partir de los puntos restantes de la superficie del conductor se encuentra entre los dos extremos mostrados en la figura 2.26. La figura 2.27 muestran la distribución del gradiente de voltaje para una distancia  $m$  muy corta (de 1.2 pulgadas).

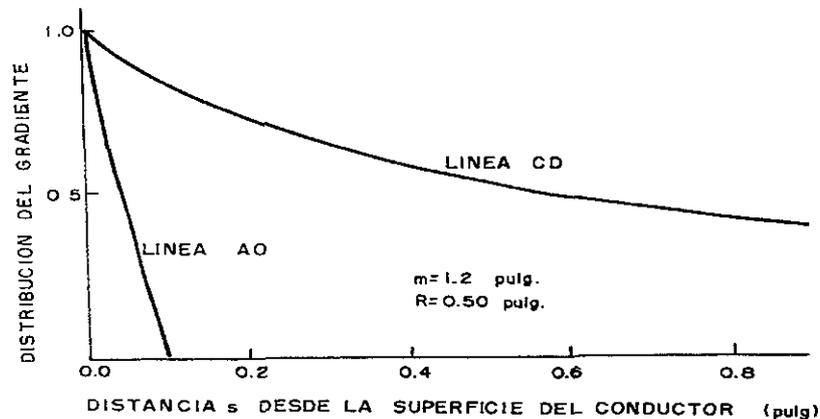


Figura 2.27 Distribución del gradiente para un arreglo de dos conductores con  $m = 1.2$  pulg.

### Gradiente superficial de un grupo de conductores.

Cuando se consideran grupos de conductores por fase en una línea de transmisión de alto voltaje, la distancia entre los conductores en el grupo es muy corta comparada con sus radios, por lo que cada uno de ellos producirá una influencia sobre los demás. Sin embargo, para configuraciones prácticas, puede realizarse un análisis aproximado, considerando que la distribución de las cargas sobre los conductores puede sustituirse por dos cargas reales y dos cargas imágenes. Las dos cargas reales se ubicarían desplazadas del centro del conductor, como se ve en la figura 2.23. Para valores prácticos de  $h$ , el valor de la distancia  $s$  será similar a  $h$ , por lo que la configuración de este arreglo quedaría como el de la figura 2.28, que corresponde al de dos conductores paralelos aislados en el espacio libre. Como la altura  $h$  es grande, la contribución de las imágenes al gradiente de voltaje cerca de la superficie de los conductores será muy pequeña comparado con el de las cargas reales.

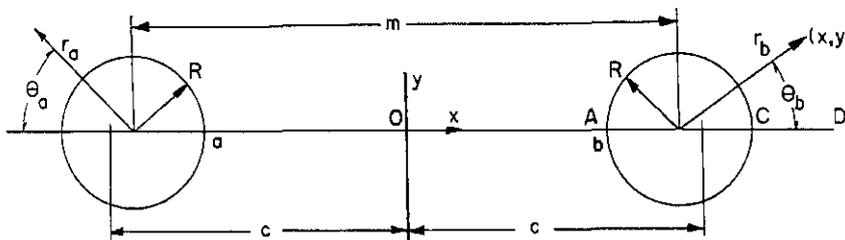


Figura 2.28 Dos conductores paralelos aislados en el espacio libre.

Con el razonamiento anterior, se observa que la distribución de gradiente cerca de los conductores es aproximadamente igual que para dos conductores aislados en el espacio libre

(figura 2.28). En este caso, considerando el campo asociado con las dos cargas lineales separadas por una distancia  $2c$ , donde:

$$c = \frac{m}{2} + \frac{R^2}{m} \quad \dots(17)$$

la distribución del gradiente está dado por la siguiente relación aproximada:

$$E_r = E_s \left( \frac{R}{r} \right) \left[ 1 + \left( \frac{r-R}{r} \right) \left( \frac{2R}{m} \right) \cos\theta \right] \quad \dots(18)$$

Como la cantidad encerrada entre corchetes es aproximadamente igual a la unidad, la distribución del gradiente para un grupo de conductores es similar a la de un solo conductor con el mismo diámetro.

#### Formación del vector de cargas.

Considerando un grupo de dos o más conductores sobre tierra, inicialmente descargados, de tal forma que todos los potenciales son cero. Supóngase que se carga el conductor 1. Esto implica que el conductor 1 adquiere un potencial desde cero hasta un valor máximo y los demás conductores adquirirán potenciales intermedios, proporcionales a la carga del conductor 1. Esta relación puede escribirse como:

$$\begin{aligned} V_1 &= P_{11} \cdot q_1 \\ V_2 &= P_{21} \cdot q_1 \\ &\dots etc., \end{aligned} \quad \dots(19)$$

donde las  $P$ 's son constantes y depende de las características geométricas.

En forma similar, el efecto de transferencia de la carga  $q_2$  desde el nivel de tierra hasta el conductor 2 es el conjunto de los potenciales:

$$\begin{aligned} V_1' &= P_{12} \cdot q_2 \\ V_2' &= P_{22} \cdot q_2 \\ &\dots etc., \end{aligned} \quad \dots(20)$$

Por el principio de superposición, el conjunto de potenciales cuando las cargas  $q_1, q_2, \dots, q_n$  son transferidos en forma simultánea desde tierra hasta los conductores  $1, 2, \dots, n$  se obtienen a partir de:

$$\begin{aligned}
 V_1 &= P_{11}q_1 + P_{12}q_2 + \dots + P_{1n}q_n \\
 V_2 &= P_{21}q_1 + P_{22}q_2 + \dots + P_{2n}q_n \\
 &\dots \\
 V_n &= P_{n1}q_1 + P_{n2}q_2 + \dots + P_{nn}q_n
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Las constantes  $P$  son llamadas coeficientes de potencial de Maxwell.

$$P_{ij} = \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \tag{22}$$

Para el caso de conductores que se encuentran sobre un terreno plano de conductividad infinita, se puede establecer, por el método de las imágenes, el cálculo de la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera. Los valores de la matriz de coeficientes de potencial de Maxwell son:

$$P_{ii} = \ln \frac{D_{ii}}{r_i} \tag{23}$$

para los elementos mutuos ( $i \neq j$ ) y para los elementos propios ( $i = j$ ). La cantidad  $D_{ij}$  representan la distancia entre el conductor  $i$  y el conductor imagen  $j$ . La cantidad  $d_{ij}$  representa la distancia entre el conductor  $i$  y el conductor  $j$ . La cantidad  $D_{ii}$  representa dos veces la altura al nivel del suelo del conductor  $i$ . el radio  $r_i$  representa ya sea el radio del conductor o el radio medio geométrico de un grupo de conductores. Estas  $n$  ecuaciones pueden resolverse a partir de las cargas  $q$  en términos de los potenciales  $V$ :

$$\begin{aligned}
 q_1 &= c_{11}V_1 + c_{12}V_2 + \dots + c_{1n}V_n \\
 q_2 &= c_{21}V_1 + c_{22}V_2 + \dots + c_{2n}V_n \\
 &\dots \\
 q_n &= c_{n1}V_1 + c_{n2}V_2 + \dots + c_{nn}V_n
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

en donde las  $c$ 's son los coeficientes de capacitancia.

### Evaluación de gradientes de voltaje superficial en grupos de conductores.

Para el caso de líneas de transmisión que utilizan grupos de conductores por fase, las cargas individuales de cada conductor no pueden ubicarse en el centro de los mismos, ya que existe una fuerte influencia de los demás conductores debido a que el espaciamiento entre ellos es muy corto. Esto implica que la carga sobre cada conductor individual no esté uniformemente distribuida.

Existen diversos métodos para realizar el análisis en forma rigurosa, considerando que la carga total del grupo de conductores no está igualmente distribuida entre los conductores. Todos parten de la misma condición frontera: el potencial a cualquier punto de la circunferencia del conductor en cuestión es igual a la unidad, considerando que es el potencial a tierra. Algunos métodos que se han tratado en la literatura para este tipo de análisis son:

Método de imágenes sucesivas. El método se basa en el concepto de puntos imaginarios o cargas lineales imaginarias que no se localizan dentro de la región de evaluación del campo, sino que se seleccionan de tal forma que el campo de las cargas imágenes dentro de esta región sea idéntico con el de las cargas inducidas sobre los límites de dicha región.

Considérese una carga lineal infinitamente larga  $+\lambda$  (C/m) colocada en forma paralela a un cilindro conductor infinitamente largo de radio  $r$ , figura 2.29. El efecto de la distribución de carga inducida sobre el cilindro puede simularse colando una carga lineal imagen  $-\lambda$  (C/m) en el cilindro a una distancia  $\gamma = r^2/D$  alejado de su centro. El campo en

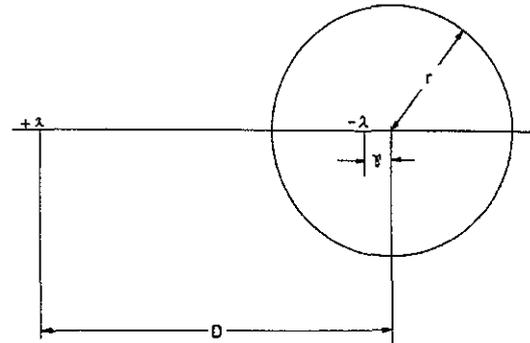


Figura 2.29 Carga Lineal paralela al conductor.

esta región exterior del cilindro del conductor puede calcularse considerando las cargas lineales  $+\lambda$  y  $-\lambda$ .

Para un sistema de conductores cilíndricos paralelos de radio finito con potenciales conocidos aplicados a ellos, puede aplicarse el concepto descrito anteriormente, que consiste básicamente de:

- Sustituir la distribución de la carga verdadera sobre la superficie del conductor por una serie de cargas lineales imágenes.
- Calcular la distribución de campo debido al sistema resultante de las cargas imágenes.

Una vez que se determina el sistema de cargas lineales imágenes, la intensidad del campo puede calcularse por la siguiente expresión:

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{[r_i]^2} \cdot r_i \quad \dots(25)$$

donde  $m$  es el número total de cargas lineales imágenes en el sistema y  $r_i$  es el radio vectorial de cada una de las cargas lineales al punto en el cual las cantidades anteriores están evaluadas.

Método de simulación de carga. El nombre de este método, se deriva del hecho de que se consideran cargas concentradas para representar la carga eléctrica distribuida, y los valores de estas cargas concentradas desconocidas se determinan para satisfacer las condiciones frontera. El número óptimo de cargas concentradas se determina por el compromiso existente entre una exactitud aceptable y un número de ecuaciones simultáneas factibles. Sin embargo, con el fin de mejorar la precisión del método, puede elegirse un número de puntos de voltaje conocido mayor que el número de cargas ficticias, con lo que se obtiene un número de ecuaciones mayor al número de incógnitas, para cuya solución puede emplearse el método de mínimos cuadrados. Las cargas concentradas consideradas pueden colocarse dentro del conductor, como muestra la figura 2.30 La razón para esta selección ficticia es que se obtiene mayor precisión y se invierte menor tiempo en los cálculos con una computadora digital. Una vez que se obtienen los gradientes de voltaje superficial, es posible determinar las cargas superficiales reales.

Método de los momentos. A diferencia de los dos métodos descritos anteriormente, este método considera que las cargas distribuidas en una superficie se modelan con distribuciones continuas, con lo que se logra una representación más exacta del fenómeno, y los valores frontera de potencial especificados, pueden satisfacerse en la superficie donde residen las cargas. Aún cuando este método se pueda aplicar en forma sencilla, su uso puede llevar a evaluar integrales muy complicadas, las cuales deberán resolverse en forma numérica, lo que le resta exactitud e incrementa el tiempo de computo.

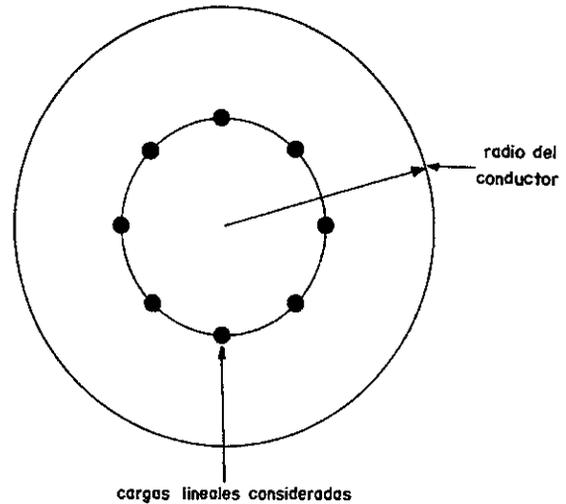


Figura 2.30 Representación de cargas concentradas en el interior de un conductor.

### Método práctico para la evaluación de gradiente de voltaje superficial en un grupo de conductores.

Los parámetros inherentes a las líneas de transmisión, como son los eléctricos y los geométricos, se obtienen con un cierto grado de incertidumbre. Esto significa que, aún cuando el método de análisis para obtener los gradientes de voltaje superficiales sobre los conductores sea muy riguroso, existirá siempre un grado de incertidumbre en los resultados obtenidos, debido principalmente a la imprecisión en la obtención de los datos de entrada.

Así por ejemplo, la tolerancia en la sección transversal de los diferentes tipos de conductores de aluminio utilizados en las líneas de transmisión y el hecho de que el radio del conductor es el parámetro de mayor influencia en la evaluación de los gradientes, produce, de entrada, un dato inexacto.

Por otro lado, la altura de los conductores sobre tierra está sujeta a cambios debido principalmente a dos factores: por efecto de la temperatura del conductor, que puede dilatar o contraer el conductor, y por efecto de la variación del plano de tierra efectivo, en términos de conductividad, debido a cambios en el contenido del suelo, humedad, etc. Además, el espaciamiento efectivo entre conductores puede variar debido a condiciones de viento. Desafortunadamente, no es posible establecer una relación sencilla entre los cambios en los gradientes y los cambios de alturas y espaciamentos de los conductores. Un efecto adicional (posiblemente un incremento de hasta el 5 %) sobre el gradiente superficial lo representa la proximidad de las torres de transmisión. Es importante hacer notar que, también las irregularidades existentes sobre la superficie de los conductores, debido tanto al trenzado como a partículas extrañas, afecta el grado de precisión de los resultados.

Debido a las condiciones anteriores expuestas y al hecho de que los parámetros de interés para el análisis tanto del ruido audible como de cualquier otro fenómeno Corona son por fase, lo importante no es utilizar métodos lo más precisos posibles, sino utilizar un método que no exceda el 5 % de incertidumbre, para que aunado a las incertidumbres producidas por los datos de entrada, se tengan resultados bastantes aceptables.

El método más simple, desde el punto de vista computacional, y que cumple con las características anteriormente descritas para efectos prácticos, es el método Mark y Mengele. Este método se divide en dos partes:

- Se reemplaza cada grupo de conductores por un solo conductor equivalente (desde un punto de vista de capacitancia) y se determina la carga total sobre cada uno de ellos, usando el método de coeficientes de Potencial de Maxwell.
- Se calcula el campo eléctrico del grupo de conductores, considerando que se localiza en el espacio libre (el grupo de conductores se encuentra aislado de los demás), con la carga total obtenida en el punto anterior, distribuida uniformemente entre los conductores del grupo. Esto implica que la carga de cada conductor del grupo se localiza al centro.

El algoritmo utilizado en este trabajo para utilizar el método de Mark y Mengele es el siguiente:

1. Cada grupo de conductores se reemplaza por un conductor equivalente cuyo radio equivalente está definido por:

$$r_{eq} = [n \cdot r \cdot A^{n-1}]^{\frac{1}{n}} \quad \dots(26)$$

donde  $n$  es el número de conductores en el grupo,  $r$  es el radio de los conductores y  $A$  es el radio del grupo de conductores.

Este concepto es ampliamente utilizado para líneas de transmisión de alto voltaje, en las que los conductores de cada grupo están separadas en forma radial por una misma distancia y sus radios son similares.

2. Con los grupos representados por los conductores equivalentes, la carga total de cada uno de ellos se calcula por el método de los coeficientes de potencial de Maxwell. Deben tomarse en cuenta los hilos de guarda.
3. Conociendo la carga total ( $q_i$ ) del grupo (obtenida en el punto anterior), el gradiente promedio del grupo es:

$$E_{au} = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{nr} \quad \dots(27)$$

4. El gradiente promedio máximo del grupo se calcula:

Como en este método los grupos de conductores se consideran aislados unos de otros, el gradiente máximo del grupo será igual a  $E_m$ .

$$E_m = E_{au} \left[ 1 + (n-1) \frac{r}{A} \right] \quad \dots(28)$$

El algoritmo presentado es ampliamente validado por el subcomité de efectos corona de la IEEE [40], en el que se utilizaron 10 configuraciones básicas para líneas de transmisión, con y sin cables de guarda. Como la finalidad principal fue comparar los métodos existentes en la literatura

para el cálculo de los gradientes superficiales de voltaje de grupos de conductores utilizados en líneas de transmisión de alto voltaje prácticos, se analizaron diversos métodos existentes en la literatura: diversos investigadores reportan sus resultados, utilizando cada uno de ellos alguno de estos métodos:

- Basados en la técnica de Mark Y Mengele.
- Imágenes sucesivas o versiones simplificadas.
- Simulación de carga.
- Ecuación integral.

El método utilizado como exacto para efecto de comparación, debido a que se demostró teóricamente que converge a la solución exacta fue el de imágenes sucesivas. Los resultados mostrados por el método de Mark y Mengele ofreció menos del 0.1 % de error para gradientes promedio del grupo de conductores y menos del 1 % de error para gradientes promedio máximo en grupo. También dio menos del 2 % de error para configuraciones que tienen 4 o menos conductores por grupo. Para más de 5 conductores por grupo, el error puede ser de hasta el 5 %.

En resumen, el método de Mark y Mengele ofrece un buen grado de precisión para configuraciones de 4 o menos conductores por grupo, siendo un método muy sencillo de utilizar en una computadora digital. Aún cuando existe la limitante en el número de conductores por grupo, se considera que aceptando un margen de error de hasta el 5% para configuraciones de más de 4 conductores por grupo, este método puede seguirse aplicando para fines prácticos.

## REFERENCIAS

- [1] CHECA, Luis María. **Líneas de transporte de energía**. Marcombo. 3ª Edición, Barcelona-México, 1988.
- [2] Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones de la Industria Eléctrica. **Cálculo de flechas y tensiones en líneas de transmisión**. México, 1969.
- [3] Comisión Federal de Electricidad, Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación. **Catálogo de torres: 400 kV, 230 kV y 115 kV**. 4ª Edición. México 1997.
- [4] Comisión Federal de Electricidad. **Derechos de vía**. Especificación CFE L0000-10, México 1993.
- [5] S. Bartlett. **Transmission line intersects rainforest**. Transmission and distribution world, vol: 51, num: 4, abr. 1999, 5 p., sin refs.
- [6] I. Nair, G. Morgan, K. Florig. **Biological effects of power frequency electric and magnetic fields**. Background paper, Department of engineering and public policy, Carnegie Mellon University Pittsburg, PA., 15213, may 1989.
- [7] J. Lee Jr, J. Brunke, G. Lee, G. Reiner, F. Shon. **Electrical and biological effects of transmission lines: A Review**. Biological studies task team, U. S. Departmente of energy, Bonneville Power administration, Portland, Oregon, August 1982.
- [8] M. Granger Morgan. **Electric and magnetic Fields from 60 hertz electric power: What do we know about possible health risks**. Department of Engineering and Public Policy. Carnegie Mellon University, 1989.
- [9] N. Wertheimer, E. Leeper, **Electrical wiring configurations and childhood cancer**. Am. J. Epidemiol, 1979; vol. 109.
- [10] Alasdair Phillips. **Killing fields**. Electronics world wireless world, february 1990.
- [11] J. Fulton, S. Cobb, L. Leone, E. Forman. **Electric wiring configurations and childhood leukemia in rhode island**. Am. J. Epidemiol, 1980, vol. 7.
- [12] L. Tomenius. **50 Hz electromagnetic field environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm contry**. Bioelectromagnetics, 1986, vol. 1.
- [13] D. Savitz. **Case-control study of childhood cancer and residential exposure to electric and magnetic fields**. Am. J. Epidemiol, 1988, vol. 128.
- [14] S. London, D. Thomas, J. Bowman, E. Sobel, T. Cheng, J. Peters. **Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia**. Am. J. Epidemiol, 1991, vol. 134.
- [15] S. Nordstrom, E. Birke, L. Gustavsson. **Reproductive hazards among workers in high voltage switch yards**. Bioelectromagnetics, 1983, vol. 4.

- 
- [16] M. Coleman. **Epidemiological methods and human studies of 50-60 hz field exposure.** Radiation protection in Australia, 1991, vol. 9.
- [17] M. Repacholi. **Cancer from exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields – a major scientific debate.** Aust. Physical & engineering science in medicine, 1990, vol. 13.
- [18] R. Boutwell. **Electric and magnetic fields-their relationship to the causes of cancer and the biology and molecular mechanisms of the processes associated with the appearance of cancer.** Report submitted to US environmental protection agency, 1990.
- [19] H. Bender. **A study of the effects of EFL electromagnetic fields upon drosophila melanogaster.** Indiana university os Notre Dame, 1986, reports NTIS-035956.
- [20] M. Cohen. **In vitro Genetic effects of electromagnetic fields.** Contractors final report 21082-11, N.Y. State power line project, 1986.
- [21] R. Benz, A. Carsten, J. Baum, A. Kuehner. **Mutagenicity and toxicity of 60 Hz magnetic and electric fields.** Final repot, New York State power lines project, Wadsworth centre for laboratories and research, 1987, Albany, NY-1201.
- [22] M. Frazier, J. reese, J. Morris. **Effects of 60 Hz electromagnetic fields on growth rates and transformation frequencies of C3H10T1/2 cells.** Abstract P-3-4, bioelectromagnetics society meeting, 1990.
- [23] R. Goodman, L-X. Wei, A. Henderson. **Quantitatie changes in transcripts result from varying signal amplitude.** BSTRACT a-3-7, Bioelectromagnetics society conference, 1990.
- R. Goodman, J. Abbot, A. Henderson. **Transcriptional patterns in the X chromosome of sciara coprophila following exposure to magnetic fields.** Bioelectromagnetics society conference, 1990.
- [24] L-X. Wei, R. Goodman, A. Henderson. **Changes in levels of c-myc and histone H2B following exposure of cells to low frequency sinusoidal signals: evidence for window effects.** Bioelectromagnetics, 1990, vol. 11.
- [25] C. Byus, S. Pieper, W: Adey. **The effect of low energy 60 Hz environmental electromagnetic fields upon the growth-related enzyme ornithine decarboxylase.** Carcinogenesis, 1987, vol. 8.
- [26] C. Cain, M. Malto, R. Jones, W. Adey. **Effect of 60 Hz fields on ornithine decarboxylase activity in bone cells and fibroblasts.** Technical report, contractors review meering DOE, EPRI, and N. Y. Dept. health, 1986.
- C. Cain, W Thomas, R. Adey. **60 Hz magnetic fiel effects on C3H10T1/2 fibroblasts: ornithine decarbosylase-activity and focus formation in response to tumor promoter.** Abstract p-2-5, bioelectromagnetics conference, 1990.
- [27] M. Frazier, J. Reese, J. Morris **Assessing the transformation and/or promotion potential of 60 Hz magnetic fields in C3H10T1/2 cells.** P-1-14, bioelectromagnetics conference, 1989.
-

- [28] R. Saunders, Z. Sienkiewicz, C. Kowalczyk. **Biological effects of electromagnetic fields and radiation**. J. Radiol. Prot., 1991, vol. 11.
- [29] R. Stevens. **Overview: ELF and carcinogenesis. In: extremely low frequency electromagnetic fields: the question of cancer**. Battelle press, 1989.
- [30] F. Leung, D. Rommereim, R. Stevens, B. Wilson, R. Buschbom, L. Henderson. **Effects of electric fields on ratt mammary tumour development induced by 7, 12 dimethylbenz (a)- anthracene**. Bioelectromagnetics society meeting, 1988.
- [31] R. Buntenkotter, K. Brinkmann, E. Zittlau, R. Swingelberg, H. Reinhard, M. Melvissen. **An oncological study of DMBA on rats exposed to 50 Hz magnetic fields**. Abstracts of the twelfth annual meeting of the bioelectromagnetics society, 1990.
- [32] J. Mclean, et. al. **Cancer co-promotion in the mouse skin model by a 60 Hz magnetic field: II. tumour development and immune response**. Bioelectromagnetics, 1991.
- [33] B. Holmberg, A. Rannug, T. Elkstrom, K. Mild. **A skin tumour promotion study on NMRI mice with 50 Hz magnetic fields**. DOE annual contractors review, 1991.
- [34] A. Rannung, B. Holmberg, T. Elkstrom, K: Mild. **Rat liver foci studies with 50 Hz magnetic fields**. DOE annual contractors review meeting, 1991.
- [35] S. Batklyn, F. Tabrak. **Effects of alternating magnetic field (12 Gauss) on transplanted neuroblastoma**. Res. Comm. Chem. Path and pharm., 1977, vol. 16.
- [36] J. Phillips, W. Winters, L. Rutledge. **In vitro exposure to electromagnetics fields: changes in tumour cell properties**. Int. J. Radiat. Biol., 1986, vol. 49.
- [37] R. Thompson, S. Michaelson, Q. Nguyen. **Influence of 60 Hz magnetic fields on leukaemia**. Bioelectromagnetics, 1988, vol. 9.
- [38] T. Vinh, G.H. Shih. J.V. King and W.R. Roy. **Audible noise and corona loss performance of 9 -conductor bundle for UHV transmission lines**. IEEE Trans. On PAS, vol. PAS-104, no. 10, Oct/1985, pp 2764-2770.
- [39] H. Kirkham. **The influence of rain rate on transmission line corona performance**, IEEE. Trnas. on PAS, vol.PAS-100, no.1, Jan/91.
- [40] Field effects Subcommittee IEEE. **A survey of methods for calculating transmission line surface voltaje gradients**. Presented at the IEEE PES Winter meeting, New York, NY, February 4-9 1979.

"La observación es una forma de trabajo  
y la experiencia una forma de éxito"

*Henry James.*



## **CAPITULO 3**

### **Impacto Ambiental**

En los últimos dos o tres decenios el cuidado del medio ambiente se ha convertido en una preocupación central de todas las sociedades del mundo. Esto se manifestó primero en los países industrializados, pues en ellos se conjugaban las mayores perturbaciones ambientales y los más abundantes recursos para atenuarlas; pero en los últimos 10 años la preocupación ambiental se ha extendido a casi todo el resto del mundo. Hay importantes razones para que así sea.

En las naciones pobres o de reciente industrialización los problemas del entorno natural suelen ser ahora más severos, pues los agrava la explosión demográfica y los prolonga la escasez de medios materiales e institucionales para resolverlos. Además, por primera vez en la historia, la perturbación de los ambientes naturales ha crecido tanto y a tasas tan altas que tiende a afectar a los sistemas globales que controlan el clima y crean condiciones para la vida en el planeta.

En este mismo periodo el sector eléctrico a crecido aún más que la población y la economía y es muy probable que continúe de esa manera. Esta alta demanda de electricidad tiene una razón poderosa: que la electricidad como forma final de entrega o uso de energía es muy ventajosa por su limpieza seguridad y versatilidad. En efecto, tanto en usos residenciales como en la industria y los servicios (incluyendo la transportación) las opciones eléctricas son más limpias que sus alternativas, y son de versatilidad mucho mayor.

La evaluación de las opciones para el crecimiento del sector eléctrico, las políticas y las practicas de operación de sus instalaciones tienen que hacerse en el contexto de las preocupaciones ambientales de la época, tanto locales como globales.

La energía eléctrica producida en las centrales de generación se lleva hasta los centros de consumo mediante líneas de transmisión de alta tensión, generalmente aéreas por razones de costo (una línea subterránea cuesta de 10 a 20 veces más que una aérea equivalente). Las líneas de transmisión tienen efectos ambientales que no necesariamente son despreciables, pero que pueden tener una magnitud menor que los de las centrales de generación.

El más perceptible de estos efectos es el que ocurre sobre los paisajes, pues las líneas áreas son muy visibles. Otras alteraciones que provocan son la radiointerferencia, el ruido producido por el efecto corona, los posibles efectos biológicos de campos electromagnéticos y el riesgo de descargas o caída de conductores de alta tensión.

También puede ser importante el efecto de estas instalaciones en cuanto a uso de suelo: en las zonas urbanas y suburbanas, por el alto costo del terreno y en las zonas arboladas por la necesidad de talar la vegetación a lo largo de las líneas.

En cuanto a los otros efectos de la transmisión de alto voltaje (radiointerferencia, ruido, efectos biológicos, riesgos de accidentes) sólo el ruido representa un problema insoluble en la inmediata vecindad de la línea y en ciertas condiciones atmosféricas. La radiointerferencia es problema menor y solo afecta las transmisiones de AM. Según la información más reciente, los riesgos biológicos de campos electromagnéticos y los de accidentes son, para el público, muy bajos en comparación con otros riesgos de la vida cotidiana.

### **3.1. El sector eléctrico y la conceptualización ambiental**

Los problemas ambientales de los que el mundo ha cobrado conciencia en los últimos decenios suelen ser muy complejos. Una parte de su complejidad es intrínseca o consustancial a su naturaleza, y otra proviene de la subjetividad con la que necesariamente se le percibe. En otros términos, algunas de la complejidades son científico-técnicas y otras son filosóficas y de comunicación social.

La complejidad científico-técnica de los problemas ambientales se debe al gran número de variables que intervienen en la respuesta de cualquier ecosistema a la perturbación producida por un proyecto de ciertas proporciones. Por ejemplo, en un proyecto de una línea de transmisión, ubicada en una localidad de amplia diversidad biológica, habría que tener en consideración cada una de las especies vivas en la proximidad del proyecto, en cada una de las facetas de su vida. Los elementos físico-químicos (aire, agua y suelo); las variables tecnológicas susceptibles de manejo directo o indirecto; las dimensiones que definen la magnitud del proyecto; las opciones de la evolución socioeconómica futura, etc. Para mayor dificultad, las múltiples relaciones entre esas variables son inciertas a causa de la limitación del conocimiento científico.

Aun así deben tomarse decisiones, e incluso proponer o soslayar una decisión explícita es en sí mismo determinante de un curso en acción, es decir, equivale a optar por una entre diversas posibilidades. Esto es suficiente justificación para buscar que los problemas ambientales dejen de plantearse en términos puramente descriptivos, taxonómicos o ideológicos y se pase a formularlos de manera propicia para la toma de decisiones racionales; esto es, diseñando o formulando opciones o cursos de acción alternativos, evaluando las consecuencias (costos sociales) de cada opción con lo mejor del conocimiento disponible y escogiendo, con base a ello, entre las opciones identificadas, aquella que minimice los costos totales (o, lo que es equivalente, maximice los beneficios totales).

Además de la complejidad intrínseca de los problemas ambientales, otro de los obstáculos para ese enfoque proviene de la variedad de percepciones y de las dificultades de comunicación social de estos problemas. Debe pensarse en lo que implica que, en relación con cada proyecto significativo, haya diversidad de instituciones y grupos sociales

---

legítimamente interesados, y que cada uno de ellos tenga valores, conocimientos, concepciones, intereses, expectativas y lenguajes distintos.

### 3.1.1 Repercusión de las preocupaciones ambientales

En los países con grandes desigualdades sociales como México se dan tendencias que pueden afectar el desarrollo, suministro y costos futuros del servicio eléctrico. Por ejemplo:

- a) Por una parte, hay una sensibilidad pública creciente sobre la importancia de los problemas ambientales. Tal sensibilidad comienza a generalizarse y ya ha dado lugar a que en México, siguiendo el ejemplo de otros países, se adopten disposiciones legales para la protección al ambiente.
- b) Sin embargo, la conciencia pública del problema es muy superficial y diversa. El ciudadano está poco informado o mal informado al respecto. Lo han influido, sobre todo, el simplismo y la propaganda de grupos que propugnan actitudes antitecnológicas inconsistentes. Esto ha dado lugar a paradojas; hay oposición, con bases ambientales, a casi cualquier proyecto del sector eléctrico, independientemente de su ubicación, tecnología y efectos objetivos, y a la vez creciente demanda de energía eléctrica tanto en los países en desarrollo como en los más industrializados.
- c) La opinión pública mal informada acerca de los problemas ambientales da lugar a riesgos, como la adopción de los proyectos con menor resistencia social y no los de menor efecto integral, el encarecimiento de los proyectos por exigencias excesivas de apariencia ambiental pero sin fundamento objetivo, y una creciente dificultad para ubicar proyectos de transmisión con bases racionales que respondan al interés general.

A fin de reducir estos riesgos se requiere información pública y educación sobre las características, costos y efectos de largo plazo de los diversos tipos de proyectos del sector eléctrico. Para que esta información tenga credibilidad y eficacia debe ser promovida no sólo por la industria eléctrica, sino además por el sector académico y los medios de comunicación. También puede contribuir a la selección y diseño racional de proyectos de transmisión eléctrica la cooperación internacional con bases macroeconómicas sanas, a fin de evitar que en países pobres se adopten sistemáticamente los proyectos con menor inversión inicial y cuyos efectos ambientales y sociales sean mayores a la larga.

Como otros aspectos del comportamiento humano, las acciones prácticas en pro del ambiente requieren convicción, pues tales medidas implican esfuerzo y tienen costos. En este caso la convicción ha venido gestándose poco a poco, por el peso de los hechos; pero para ser eficaz, ha de ser adquirida simultáneamente por quienes toman decisiones y por el entorno social, pues a uno y a otros toca realizar esfuerzos y asumir costos de las acciones respectivas. A las instituciones reguladoras y a las empresas eléctricas toca vencer resistencias internas y asumir costos al cambiar sus criterios de evaluación, planeación y manejo de proyectos. Los usuarios del servicio eléctrico, por su parte, deben entender y vigilar las acciones de protección ambiental y asumir también sus costos. Proteger el ambiente equivale a cuidar la cantidad de vida de la generación actual y no transferir a las generaciones futuras, heredándoles un medio inhóspito y pobre de opciones.

Así pues, debe haber compromiso compartido para poner en práctica los enfoques, métodos y acciones descritas. También debe haber convicción de tales métodos han de usarse de inmediato, sin importar cuán imperfectos sean ahora, pues su perfeccionamiento

futuro sólo puede provenir de incorporar progresivamente la experiencia resultante de su uso y los avances relevantes del conocimiento científico.

Esas condiciones están empezando a cumplirse en el sector eléctrico de México, a pesar de que el país arribó con retraso a la decisión de incorporar el cuidado del medio ambiente a los criterios de evaluación de proyectos. El gobierno federal, y luego los estatales, han promovido leyes y normas al respecto en respuesta a preocupaciones sociales diversas.

Por su parte el organismo del sector eléctrico ha hecho público su compromiso con la protección ambiental, más allá del mero cumplimiento de las normas ambientales y ha adoptado políticas expresas al respecto. Asimismo, ha creado estructuras internas ad hoc, responsables de cumplir aquel compromiso institucional.

Dentro del sector eléctrico federal la organización interna encargada de incorporar los aspectos ambientales, se terminó de diseñar y se puso en operación muy recientemente (1992): se concibió atendiendo tres consideraciones principales: los objetivos y procedimientos a los que obliga el marco jurídico en la materia; la medida en que existe en el país personal calificado y servicios de apoyo técnico en este campo, y la experiencia de empresas eléctricas extranjeras (especialmente de Estados Unidos de Norteamérica y Canadá), cuya practica ambiental es al menos dos decenios más amplia que la nuestra.

La organización interna adoptada por el sector eléctrico consta de dos instancias: un pequeño grupo corporativo (denominado Gerencia de protección ambiental) con funciones normativas, de gestión y de auditoría ambiental, más cierto número de grupos operativos ubicados en las áreas sustantivas de la empresa (generación, transmisión- transformación y distribución) y el área responsable de construcción de nuevos proyectos. Otras porciones de la estructura de este organismo, como la planeación y programación, no cuentan con grupos especializados pero adoptarán en interacción con el grupo corporativo, métodos de trabajo que incorporan criterios ambientales en la atención de sus responsabilidades.



Figura 3.1 Empleo de herbicidas en la trayectoria de líneas de transmisión, Terra Industries -Sioux City, Iowa, U.S.A.-

Las funciones y contrapartes de las instancias internas de protección ambiental de ésta empresa se indica en la tabla 3.1 salvo por variantes derivadas del tamaño de la empresa y del grado de desarrollo del marco normativo externo, el mismo tipo de organización priva en numerosas empresas eléctricas de países en los que la atención de los problemas ambientales tiene mayor antigüedad.

| Instancia  | Funciones   | Contrapartes  |
|--|---|---|
| Grupo corporativo (Gerencia de Protección Ambiental).                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ventanilla única de relación con autoridades ambientales para fines de gestión de aprobaciones, intercambio de información y negociación de compromisos de protección ambiental.</li> <li>• Colaboración con autoridades ambientales para mejoría del marco normativo.</li> <li>• Interpretación de las normas ambientales externas que obligan al sector eléctrico y comunicación de las mismas a los grupos operativos internos.</li> <li>• Formulación de criterios, métodos, normas y procedimientos internos de protección ambiental.</li> <li>• Auditorías ambientales a áreas operativas.</li> <li>• Apoyo técnico a la Gerencia de Desarrollo social en la atención a comunidades afectadas.</li> <li>• Colaboración con organizaciones externas para mejorar criterios, métodos y procedimientos de protección ambiental.</li> <li>• Formulación, contratación y seguimiento de estudios e investigaciones sobre problemas ambientales de interés genérico.</li> <li>• Seguimiento de estudios sobre problemas ambientales específicos.</li> <li>• Obtención de consejo especializado externo.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Autoridades ambientales de los gobiernos federal, estatales y municipales.</li> <li>• Grupos operativos internos.</li> <li>• Gerencia de Desarrollo Social.</li> <li>• Comunidades afectadas.</li> <li>• Empresas eléctricas.</li> <li>• Instituciones académicas.</li> <li>• Consejo asesor de protección ambiental.</li> <li>• Grupos de Interés.</li> <li>• Grupos internos operativos.</li> <li>• Grupo corporativo de protección ambiental.</li> <li>• Responsable de cada obra o planta.</li> <li>• Proyectistas y contratistas.</li> <li>• Consultores.</li> <li>• Proveedores.</li> <li>• Instituciones académicas.</li> </ul> |
| Grupos operativos de la áreas de construcción, generación, transmisión y distribución. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Contratación de estudios sobre problemas específicos.</li> <li>• Formulación de proyectos ejecutivos de protección ambiental.</li> <li>• Ejecución de acciones de protección ambiental de su respectiva competencia.</li> <li>• Comunicación con el grupo corporativo para flujo de información relevante y retroalimentación.</li> <li>• supervisión del cumplimiento del proyecto ejecutivo de protección ambiental.</li> </ul>  |   |

Tabla 3.1. Instancias internas de protección ambiental en el órgano encargado del sector eléctrico.

---

### 3.2 Políticas y acciones de protección ambiental

Las políticas ambientales del sector eléctrico han sido enunciadas en los siguientes términos:

1. Se tomarán en cuenta, en todas sus formas, las repercusiones ambientales de las obras y acciones de la empresa, y se buscará cuantificarlas a fin de asegurar que sea favorable el balance de beneficios y costos, económicos y de otro tipo, internos y externos.
2. Se considerará que las normas nacionales de protección ambiental fijan el nivel mínimo de cuidado del ambiente, y que la empresa debe ir más allá de ese mínimo cada vez que racionalmente se justifique.
3. Se colaborará con las autoridades en la materia a fin de desarrollar y mejorar las normas y la metodología de protección ambiental.
4. Se incorporarán en la concepción, diseño y seguimiento de las actividades de protección ambiental de la empresa los puntos de vista y recomendaciones fundadas de expertos externos de la mayor calificación profesional.
5. Se tomará en cuenta las opiniones de los grupos con intereses legítimos en los proyectos de que se trate.
6. En la medida de las posibilidades de la empresa se apoyará la educación, la investigación y el desarrollo tecnológico en el campo de la protección ambiental.

El marco jurídico en que esas seis políticas se aplican está constituido por las leyes Federales de Servicio Público de Energía Eléctrica; Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente; Aguas; Forestal; Pesca; salud y los Estatales Municipales (en los casos en que existen), y los acuerdos internacionales sobre ecología y protección ambiental suscritos por México. Por otra parte, la transformación de aquellas políticas en medidas concretas requiere, en nuestro medio, formular o adaptar métodos y procedimientos para realizar paso a paso y de manera sistemática las acciones necesarias. Esta es una tarea en proceso a la que están dedicando atención y recursos las instancias que creó el órgano encargado de la energía eléctrica para cuidar asuntos ambientales, a la vez que casuísticamente se atienden las cuestiones ambientales propias de cada proyecto particular en desarrollo o en operación.

Para formular métodos y procedimientos genéricos y para atender casos particulares, es útil concebir las acciones de protección del ambiente como una secuencia ligada a la evolución de los proyectos. En el sector eléctrico de México se está adoptando para ese fin la secuencia descrita en la tabla 3.2, en el que, para cada etapa de desarrollo de un proyecto eléctrico, se describen las acciones necesarias de cuidado ambiental con miras a minimizar costos sociales.

| Etapa                                    | Acciones  |
|--|---|
| Planeación y programación.               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Comparación de alternativas de generación basadas en diversas fuentes primarias de energía, en función de costos sociales totales (internos y externos).</li> <li>• Caracterización y jerarquización de opciones de generación en función de costos sociales totales.</li> <li>• Definición de niveles deseables de protección ambiental (emisiones y otros impactos) en función de efectos y costos de prevención.</li> </ul>                                 |
| Estudios de campo y selección de sitios. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificación de efectos potenciales y variables relevantes.</li> <li>• Recopilación de datos básicos relevantes.</li> <li>• Investigación de la manera en que las diversas variables del proyecto influyen en la magnitud de los impactos ambientales (relaciones causa-efecto).</li> <li>• Estimación de costos sociales totales de transmisión y transformación asociados a cada sitio alternativo de generación, en su caso.</li> </ul>                   |
| Estudios de factibilidad.                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Descripción e inventario de recursos y condiciones iniciales del entorno.</li> <li>• Monitoreo de condiciones ambientales.</li> <li>• Evaluación del impacto del proyecto en las condiciones ambientales (con base en las relaciones causa-efecto).</li> <li>• Esbozo de medidas de prevención, mitigación y control.</li> <li>• Cuantificación de costos (y beneficios) sociales totales y afinación de niveles deseables de protección ambiental.</li> </ul> |
| Diseño.<br>Construcción.                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proyecto ejecutivo de protección ambiental y especificaciones de construcción y operación.</li> <li>• Implantación de las acciones de prevención, mitigación y control previstas para esta etapa en el proyecto ejecutivo de protección ambiental.</li> </ul>  |
| Operación.                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Afinación del proyecto ejecutivo en función del monitoreo de las condiciones de campo.</li> <li>• Implantación de lo previsto para esta etapa en el proyecto ejecutivo de protección ambiental afinado.</li> <li>• Afinación de las políticas y especificaciones de operación en función de la evolución de condiciones de campo.</li> </ul>   |
| Desocupación o desmantelamiento.         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proyecto ejecutivo de desocupación o desmantelamiento.</li> <li>• Restauración de condiciones de equilibrio.</li> <li>• Disposición segura de desechos.</li> </ul>   |

## 3.2 Acciones de protección ambiental en proyectos eléctricos.

### 3.3 Antecedentes de los organismos reguladores en materia ambiental

Para 1970 el gobierno de los Estados Unidos Mexicanos asumió la responsabilidad de proteger y mejorar el medio ambiente. Estableció medidas técnicas y jurídicas para evitar el deterioro de los recursos naturales: agua suelo y aire. Creando dependencias a nivel federal y entrando en vigor lineamientos jurídicos de los que se carecían.

Los primeros instrumentos jurídicos que se crearon con la finalidad específica de proteger al ambiente fue la Secretaría de Salubridad y Asistencia (S.S.A), la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, emitiéndose por esta secretaría la primera ley federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental, esta ley ha sufrido modificaciones según los requerimientos de actualización a los problemas que se iban presentando hasta el año de 1988 en el que se publica la reglamentación vigente que es la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, emitida por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, derivándose de ella los reglamentos respectivos para los temas de impacto ambiental, atmósfera, residuos peligrosos. Y en lo referente a la contaminación del agua, el reglamento inicial para prevenir y controlar la contaminación del agua fue publicada en 1973, derogándose dicho reglamento y estando vigente en 1994.

Actualmente las atribuciones en materia ecológica y de protección al ambiente a nivel federal son la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca por medio de los dos órganos desconcentrados que son el Instituto Nacional de Ecología y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. Siendo el primero el que lleva a cabo la regulación y el segundo el que verifica que se cumpla con la normatividad vigente.

### 3.4 Impacto ambiental

Un estudio de impacto ambiental es una descripción del medio, en donde se proyectara una obra. El estudio se estructura a partir de una lista de control de parámetros de los medios físico-químico, biológico, cultural y social.

El medio físico-químico incluye aspectos como los suelos, la geología, la topografía, los recursos hídricos superficiales y subterráneos, la calidad del agua, del aire y la climatología. El medio biótico se refiere a la flora y a la fauna de un área, incluyendo las especies existentes. Debe de hacerse referencia a cualquier especie animal o vegetal amenazada o en peligro de extinción. Deben indicarse también aspectos biológicos globales como la diversidad de especies y la estabilidad del ecosistema en general. Los elementos culturales incluyen lugares arqueológicos e históricos y los recursos estéticos, tales como el impacto visual. El medio socioeconómico se refiere a una gama de aspectos relacionados con el propio hombre y el medio, entre los que se incluyen las tendencias demográficas y la distribución de la población, los indicadores del bienestar humano, los sistemas educativos, las redes de transporte y otras infraestructuras, como el abastecimiento de agua, el saneamiento y la gestión de residuos sólidos; servicios públicos, la protección contra incendios, las instalaciones médicas y muchos otros. Los medio Físico-químico y biológico pueden denominarse medio natural o medio biofísico, mientras que los medios cultural y socioeconómico representa el medio humano.

Los posibles impactos de proyectos, planes, programas o políticas sobre la salud deben de considerarse también en el proceso de toma de decisiones. Debido a la importancia de estos aspectos, particularmente en los países en vías de desarrollo, se propuso (OMS, 1987)

un proceso de evaluación de impacto sobre la salud y el medio ambiente. En el caso de los proyectos de líneas de transmisión se estudia el efecto electromagnético de éstas cuando están en operación.

Los estudios de impacto ambiental realizados al principio de los años setentas hicieron énfasis en los medios físico-químico y biótico; sin embargo, se fue prestando cada vez más atención a los medios culturales y socioeconómicos al ir discurriendo la década.

El inventario ambiental sirve como base para evaluar los impactos potenciales del proyecto propuesto, tanto los de carácter benéfico como perjudicial. El desarrollo del inventario representa el primer paso en el proceso de evaluación de impacto ambiental.

La evaluación de impacto ambiental puede definirse como la identificación y valoración de los impactos (efectos) potenciales de proyectos, planes, programas o acciones normativas relativas a los componentes físico-químico, bióticos, culturales y socioeconómicos del entorno. El propósito principal del proceso es la consideración real del medio ambiente en la planificación y en la toma de decisiones para en definitiva, acabar estableciendo los procedimientos que sean más compatibles con el medio ambiente.

Los profesionales asociados al proceso de la evaluación de impacto ambiental comprende al personal de los organismos públicos de nivel federal, estatal y municipal; empresas consultoras de medio ambiente, planificadoras y de ingeniería, así como compañías privadas que han desarrollado personal capaz de plantear y dirigir estudios de impacto ambiental. Los profesionistas involucrados en éste proceso incluyen, entre otros, ingenieros, biólogos, geógrafos, arquitectos, topógrafos y arqueólogos.

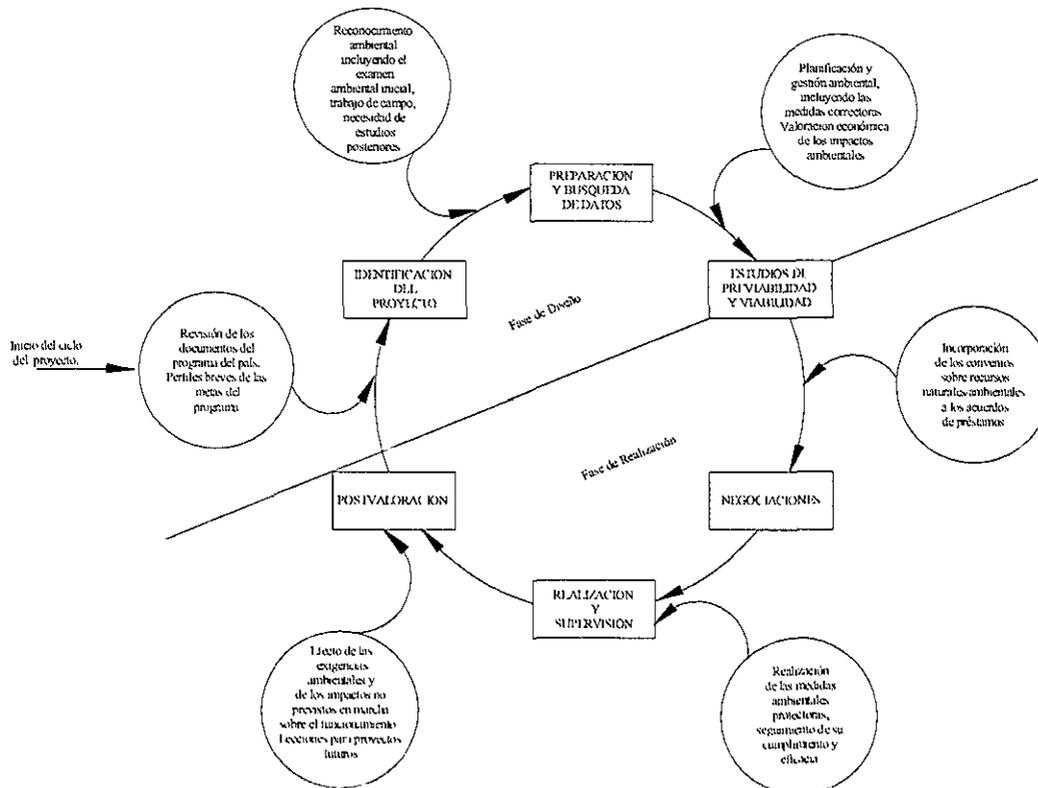


Figura 3.2 Ciclo del proyecto para la planificación de los recursos naturales y ambientales.

para su ejecución. En el caso de que la información presentada no sea suficiente para dictaminar. Dicho instituto solicita información adicional, complementaria o algún estudio en específico.

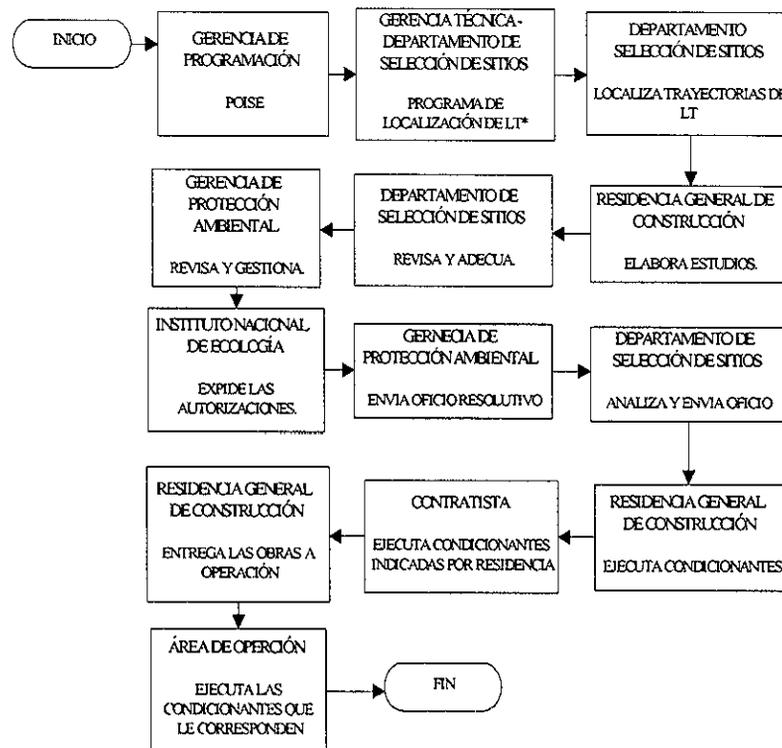
Con la autorización del proyecto, en materia de impacto ambiental, se incorporan en el diseño las medidas para cumplir con los términos establecidos, evaluando el costo-beneficio de diseñar estructuras multicircuitos para disminuir los derechos de vía e impacto visual, así como la factibilidad de líneas subterráneas.

En la etapa de construcción se ejecutan los programas específicos de protección ambiental de acuerdo a las condicionantes determinadas por la SEMARNAP.

Cuando la línea de transmisión entra en operación se lleva a cabo la ejecución de los programas determinados de protección ambiental:

- Control de la brecha forestal.
- Control de la posible contaminación a estructuras, aisladores, conductores y equipo electromecánico.
- Control de las invasiones a los derechos de vía.
- Medición de los campos eléctricos y magnéticos.

Asimismo se efectúa el mantenimiento de equipos y estructuras instaladas.



\* LINEA DE TRANSMISIÓN

Figura 3 4 Ruta crítica para gestiones ambientales de líneas de transmisión.

### 3.6 Estudio de impacto ambiental

El impacto ambiental es definido por la Legislación Mexicana como:

" Modificación al ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza"

Otras definiciones mencionan que el impacto ambiental es "cualquier alteración de las condiciones medio ambientales o la creación de un nuevo grupo de condiciones ya sean adversas o benéficas, causadas o inducidas por la acción de un grupo de acciones". Estas definiciones ponen de manifiesto algunos puntos importantes:

1. La palabra impacto ambiental generalmente se relaciona con algo negativo, sin embargo, como su definición lo dice, este puede ser benéfico.
2. Desde el momento que implica el concepto de ambiente incluye en su definición a todos sus componentes:
  - Rasgos físicos (clima, suelos, hidrología, etc.).
  - Rasgos biológicos (flora y fauna).
  - Economía.
  - Sociedad.
  - Paisaje.
3. Aclarar la idea generalizada de relacionar impacto ambiental como sinónimo de contaminación. Pues aún cuando la contaminación es un impacto al ambiente, el concepto de contaminación por si mismo, no abarca lo que implica el de impacto ambiental.
4. Remarcar el carácter previo de las evaluaciones en materia de impacto ambiental, como punto básico es decir su carácter preventivo más que correctivo.

La evaluación de impacto ambiental es un análisis objetivo, conducido a identificar y evaluar los efectos al medio natural, económico, social y estético que una acción determinada (actividad, obra, proyecto) genere en el ambiente y las alternativas de manejo o modificaciones razonables de un proyecto determinado que de ello se deriven.

La identificación de impactos requiere antes que nada de la descripción y entendimiento de las condiciones ambientales antes del desarrollo del proyecto.

#### 3.6.1 Procedimientos

De acuerdo a lo establecido en el artículo 7° del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental, quien pretenda realizar una obra o actividad de las que requieran autorización previa, conforme a lo dispuesto por el artículo 5° de dicho reglamento, considere que el impacto ambiental de la obra o actividad no causará desequilibrio ecológico, ni rebasará los límites y condiciones

señalados en, los reglamentos y normas técnicas para proteger el medio ambiente, antes de dar inicio a la obra o actividad, presentará ante la secretaría competente un informe preventivo. Una vez analizado, la secretaría comunicará si la obra queda autorizada o si debe presentarse una manifestación del impacto ambiental así como su modalidad.

Artículo 8 del reglamento. El informe preventivo al que se refiere el artículo 7º, en términos generales deberá contener la siguiente información:

- Datos generales de quien pretenda realizar la obra o actividad.
- Ubicación y descripción general de la obra o actividad proyectada.
- Descripción del proceso.

### 3.6.2 Manifestaciones de impacto ambiental

Documento mediante el cual se da a conocer, con base a estudios, el impacto ambiental significativo y potencial que generaría una obra o actividad así como la forma de evitarlo o atenuarlo en caso de que sea necesario.

La visión holística de las evaluaciones de impacto ambiental requieren, para una correcta evaluación de su magnitud, que se cubran todas las etapas que implica un proyecto, así como de una correcta descripción del medio.

De esta manera es de fundamental importancia evaluar:

- Los criterios de selección de sitios.
- Las obras de preparación del sitio.
- La etapa de construcción.
- La etapa de operación y mantenimiento.
- La etapa de abandono de sitio.

Para entender el primer punto que se refiere a la selección del sitio podemos partir de las premisas básicas.

1. Proyectos que requieran por fuerza instalarse en sitios específicos, (Presas, geotermoeléctricas, minas, etc.)
2. Proyectos que no precisan de un sitio en particular para instalarse, por ejemplo, industrias, desarrollos turísticos, carreteras, líneas de transmisión, etc.

No obstante ello, principalmente en los del segundo caso, resulta de fundamental importancia conocer los criterios de los cuales se parte para establecer en el sitio propuesto, pues puede resultar que aún cuando no se precise de un sitio en particular, el rango de operatividad se limite a determinada región.

Una vez que se tiene claro el rango de acción que permite un determinado proyecto, con base en lo que se expone para instalarlo en un sitio específico, el siguiente punto será identificar los impactos que genera su instalación y operación.

Para este punto es básico que el documento describa detalladamente lo siguiente:

- 
- Etapa de preparación y construcción del sitio, donde es básico contar con la siguiente información.
    - Programa de trabajo, equipo a utilizar, materiales que serán utilizados (bancos de materiales etc.), obras y servicios de apoyo, personal a emplear, requerimientos de energía, agua, residuos que serán generados, así como el destino final de las obras y servicios de apoyo.
    - Etapa de operación y mantenimiento, donde es de suma importancia la información de los recursos naturales de las áreas que serán aprovechadas, materias primas e insumos por fase del proceso, productos y subproductos, formas de transportación de cada uno de ellos, sus requerimientos de energía y agua, los residuos que serán generados (atmosféricos, aguas residuales y/o residuos tanto domésticos como industriales) así como su factibilidad para reciclarlos, asimismo, los niveles de ruido, los posibles accidentes y los planes de emergencia que se prevén para contingencias.
    - Finalmente la etapa de abandono del sitio, donde se requiere conocer una estimación de la vida útil del proyecto y los programas que se prevén para la restitución del área al abandono de las actividades.

Cada una de estas etapas varía en importancia dependiendo de la actividad que se trate. Para una línea de transmisión es importante tanto la etapa de construcción como la de mantenimiento.

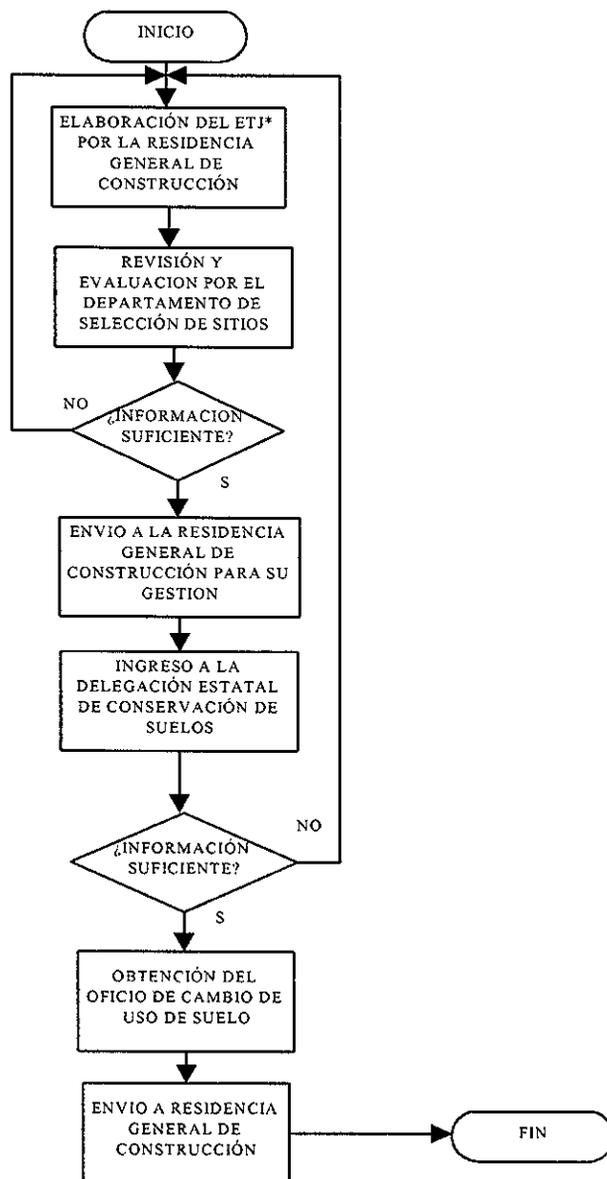
- Del medio natural socioeconómico es importante conocer las características que permitan predecir los impactos que generaran las distintas etapas que componen un proyecto. Por lo tanto es necesario conocer:
  - Rasgos físicos como son las condiciones climatológicas, geomorfológicas y geológicas, tipo de suelos, hidrografía y oceanografía entre otras.
  - Los rasgos biológicos que son la vegetación y la fauna.
  - Paisajes.
  - Las características socio-económicas como población, servicios existentes (comunicaciones, transporte, centros educativos y de salud, etc.), el tipo de economía predominante (autoconsumo de mercado, producción sostenida, pervivencia, etc.)

Finalmente, una vez que se tiene el panorama del proyecto y del medio circundante se procede a la predicción de impactos ambientales y la magnitud de los mismos.

### 3.7 Estudio Justificativo

Es el estudio que sirve para tramitar el cambio de uso de suelo.

De acuerdo al artículo 2º fracción VI del reglamento de la ley forestal, se define como cambio de uso de suelo a la remoción total o parcial de la vegetación de terrenos forestales, para destinarlos a actividades no forestales.



\*ESTUDIO TÉCNICO JUSTIFICATIVO

Figura 3.5 Flujograma para la gestión del estudio técnico justificativo para la obtención de la autorización de utilización de terrenos forestales para la construcción de una línea de transmisión.

El Estudio Técnico Justificativo de acuerdo al artículo 20 del reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico, deberá contener:

- Objetivos y usos que se pretenda dar al terreno.
- Ubicación y cuantificación de las superficies del predio o predios en que se pretende llevar a cabo, a través de planos que permitan identificar su localización por entidad y municipio, así como las principales vías de acceso.
- Caracterización de los elementos físicos y biológicos de la cuenca hidrográfica o subcuenca donde se ubica el predio.
- Descripción detallada de las condiciones del predio que incluya el uso actual del suelo y descripciones de clima, tipos de suelo, relieve, hidrografía y tipos de flora y fauna.
- Medidas para conservar y proteger el hábitat existente de las especies y subespecies de flora y fauna silvestres y acuáticas en peligro de extinción, amenazadas, raras y las sujetas a la protección ambiental que hayan sido señaladas en las Normas Oficiales Mexicanas que emita la dependencia en fuero ecológico o de aquellas sujetas a protección especial por decreto del titular del Ejecutivo Federal.
- Clasificación, en un plano de escala mínima de 1: 50 000 de las superficies destinadas a producción, protección y restauración de conformidad con los criterios establecidos en el artículo 13 de este ordenamiento.
- Estimación del volumen de los productos a aprovecharse.
- Forma de ejecución y plazo.
- Vegetación que deba respetarse, estrategias establecerse par proteger las áreas agrícolas o ganaderas y en su caso, las obras de riego o de otra naturaleza existentes.
- Medidas de prevención y mitigación de impactos ambientales y su justificación, aplicables durante distintas etapas de desarrollo del cambio del uso del suelo.
- Factores que pudieran poner en riesgo el uso propuesto.
- Justificación técnica, económica y social que pueda servir a la autoridad para que motive la autorización excepcional del cambio de uso de suelo.
- Nombre de la persona que formulo el estudio, así como de aquella que será responsable de dirigir la ejecución.
- En su caso, el medio propuesto para el marcaje de la madera en rollo.

Dentro del informe preventivo se debe de contar con un estudio dasonómico, que se puede definir como el estudio para el cultivo, conservación y aprovechamiento de la vegetación, a diferencia de los estudios técnicos justificativos que únicamente contemplan los aprovechamientos forestales para la obtención de productos maderables, en los dasonómicos se elabora un inventario general de la vegetación que e afectará, promoviendo su conservación y aprovechamiento racional.

Los estudios dasonómicos no están contemplados en la Ley Forestal ni en su reglamento, pero son requeridos cuando las obras se localizan en sistemas frágiles, áreas protegidas o zonas con una gran diversidad de flora y fauna.

### **3.8 Gestiones para obtener la autorización en materia de impacto ambiental**

Para las gestiones de obtención de la autorización se debe de entregar un informe preventivo de impacto ambiental y de la copia de pago de derechos por la recepción y evaluación a la dirección general de Normatividad Ambiental del Instituto Nacional de Ecología.

Se deben de realizar reuniones periódicas con el personal del departamento de evaluación y proyectos, con el fin de dar seguimiento al avance de la evaluación del informe preventivo, comentarios del objeto del proyecto y en su caso aclarar las dudas que se les llegaran a presentar o si es necesaria una visita al sitio de la obra.

Las reuniones con el personal de la mencionada dirección son con el fin de saber si existen resoluciones en materia de impacto ambiental.

Con la obtención del escrito de autorización en materia de impacto ambiental para la realización de la obra o de solicitud de información complementaria, estudio técnico justificativo, dasonómico o manifestación de impacto ambiental. Se efectúa una revisión y envío del oficio de autorización o de requerimiento de información a la gerencia encargada de la construcción del proyecto para el cumplimiento de las condicionantes o para la elaboración de la información.

### **3.9 Resolución en materia de impacto ambiental**

La resolución es el escrito mediante el cual el Instituto Nacional de Ecología autoriza una obra, condicionando su construcción, operación y mantenimiento o bien se solicita información adicional, complementaria, estudios técnicos justificativos, dasonómicos o manifestaciones de impacto ambiental que les puedan dar más información del proyecto.

La autorización menciona los términos generales que se deben de cumplir:

- Acatar lo establecido en los criterios ecológicos CE-OESE-003/89, publicados en el diario oficial de la federación el 8 de junio de 1989, para la selección y preparación de sitio y trayectorias, construcción, operación y mantenimiento de las líneas de transmisión y subestaciones eléctricas y a la norma NOM-114-ECOL-1998.
- Queda estrictamente prohibido: Cazar, capturar, dañar, molestar y comercializar con las especies de flora y fauna silvestre, presente en el área de la obra.
- Efectuar talas selectivas de especies arbóreas, que por su altura, pudiera intervenir con las actividades de construcción, aplicando el criterio de tocones con alturas de 60 cm.
- La apertura de la brecha forestal se realizará en forma manual, utilizando hachas, machetes y/o motosierras, quedando prohibido la utilización de maquinaria pesada, con excepción de los caminos de acceso.
- Se deberá de mantener en el ancho del derecho de vía de la línea, una cubierta vegetal de especies nativas arbustivas y/o herbáceas, que evite la erosión del suelo.
- Se deberá respetar las superficies de desmonte manifestadas como necesarias para los caminos de acceso, brecha por el eje de la línea, áreas de montajes de estructuras, asimismo se deberán aplicar las medidas tendientes a la recuperación de la vegetación en los caminos que posterior a la construcción de la obra no sean necesarios para el mantenimiento.
- Se deberá respetar la vegetación existente en cañadas, debiendo observarse la altura necesaria entre la copa de los árboles y el cable conductor.
- Los materiales de desecho y residuos líquidos generados durante la construcción, deberán enviarse fuera del área de la obra y disponerse en los centros de acopio o en los lugares indicados por las autoridades.

- Deberán respetarse los límites máximos permisibles de emisión de ruido y contaminantes atmosféricos durante las diferentes etapas de construcción.
- Deberán establecerse los programas y actividades de reforestación en coordinación con las delegaciones estatales de la SARH, SEMARNAP y Gobiernos de los Estados y Municipios con el fin de seleccionar los sitios en que se efectuará la plantación debiendo tener estos como mínimo un área igual a la desmontada.
- En las actividades de reforestación se evitará el uso de especies introducidas tales como eucaliptus y casuarina, para tal efecto se utilizarán especies nativas de la zona.
- Implementar durante las diferentes etapas de la obra, las medidas y acciones de conservación y protección de la flora y fauna que se distribuyen en el área del proyecto, con especial énfasis en las especies catalogadas en la NOM-059-ECOL-1994, que determina las especies y subespecies de flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas en peligro de extinción, amenazadas, raras y sujetas a protección especial y que establece especificaciones para su protección.
- Queda prohibida la apertura y explotación de bancos de material para la construcción de la obra, los materiales deberán ser adquiridos en bancos comerciales.
- El suministro de agua cruda deberá ser limitado y racional con el fin de no perturbar los ecosistemas acuáticos de los arroyos, ríos, presas, lagunas, etc. Si fuera necesario un camino de acceso de los cuerpos de agua, su trazo deberá ser diseñado de modo que no altere la comunidad animal y vegetal del lugar. Al término de su uso, se procederá a la restauración de la vegetación y del suelo compactado, que será aflojado para restituirlo a su estado original.
- Queda prohibido la instalación de campamentos y almacenes en la trayectoria de la línea, al respecto se ubicarán en los poblados circunvecinos.
- Considerar la opción de la utilización de letrinas móviles.

La aplicación de las condicionantes de acuerdo a los términos establecidos en la autorización de impacto ambiental, sugieren determinar soluciones precisas y adecuadas en las diferentes etapas del proyecto.

### 3.10 Costos ambientales

Existen tres posibles medidas del costo de un impacto ambiental:

1. El monto de los años inducidos. Por ejemplo: el valor de la producción agrícola perdida por los efectos ambientales, la disminución de productividad por daños a la salud de una población afectada por los mismos efectos, más el costo de atender estos daños a la salud.
2. El costo de control o mitigación. Por ejemplo: los costos de fertilizar para recuperar la producción a los niveles previos al efecto ambiental, los costos de reducir las emisiones hasta niveles inocuos para la salud, etcétera.
3. El monto del riesgo por analogía con un seguro. Cuando en el mercado no existe el seguro correspondiente, pueden calcularse las cotas superior e inferior de ese monto mediante la determinación de:
  - a) El precio que se está dispuesto a pagar por evitar el riesgo (cota inferior), y

Queda prohibido la ampliación de la brecha y en el ancho de vía el desmonte total, desenraice de la vegetación y retiro de la capa vegetal, así como la construcción de nuevos caminos de acceso.

### 3.12 Alternativas técnicas en el diseño, construcción y mantenimiento de líneas de transmisión

Como resultado de las experiencias en impacto ambiental, a nivel mundial las empresas y compañías del sector eléctrico han desarrollado herramientas, técnicas y métodos en el diseño, construcción y mantenimiento, efectivas pero de costo muy elevado.

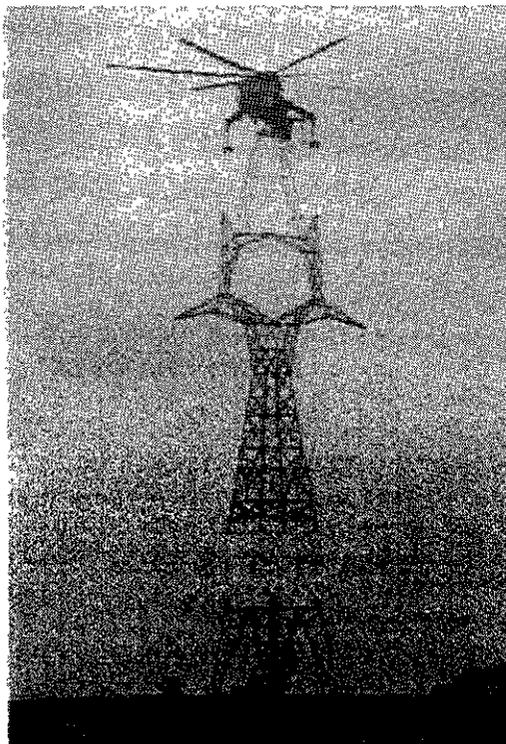


Figura 3.7 Montaje de estructuras. Power engineering -Hailey, Idaho, U.S.A.-.

En el diseño se emplean criterios, técnicas, procedimientos y metodologías de línea compacta.

Para la elaboración de los estudios de impacto ambiental se recurre a software que permite la preparación de cálculos e informes para la obtención de



Figura 3.8 Camino de acceso temporal para personal y maquinaria, en la construcción de una línea de transmisión, Powerlink - Queensland's, Australia- [1].

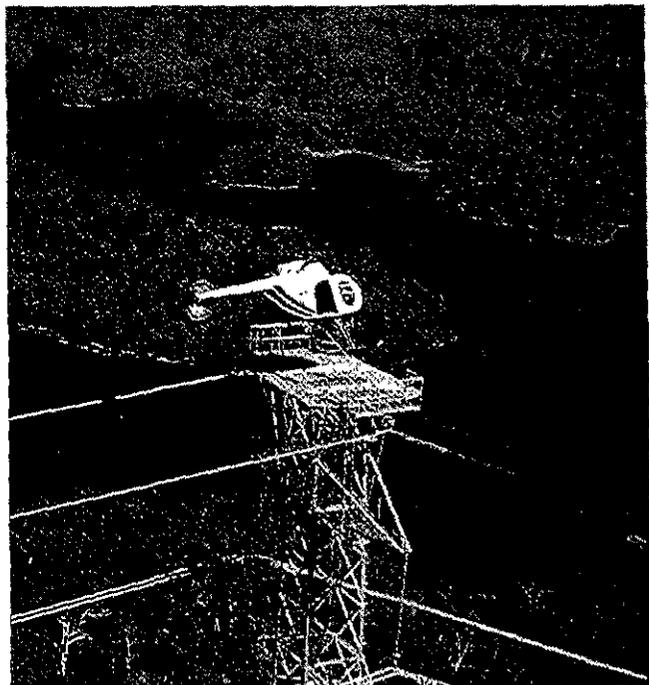


Figura 3.9 Torres equipada con helipuerto para maniobras de mantenimiento, Powerlink -Queensland's, Australia-[1]

los permisos para la construcción de las líneas de transmisión.

En la construcción estos métodos abarcan desde la apertura de accesos temporales y de brecha a través de la utilización de tendidos aéreos para librar el corte total de las especies arbustivas (práctica de corte selectivo), evitando el daño de la corteza superficial del suelo, para la conservación íntegra del entorno.

En las cuestiones de armado y montaje de estructuras las operaciones se realizan de forma aérea con la ayuda de helicópteros; el tendido y tensado tanto de los conductores y del hilo de guarda se realiza de la misma forma, disminuyendo así los efectos ambientales producidos por el peaje de trabajadores por el derecho de vía.

Para el mantenimiento y reparación de las líneas de transmisión se ha optado por el diseño de torres de transmisión con helipuertos con el fin de evitar el paso total por la brecha establecida en la construcción o la apertura de nuevos caminos de acceso, algunas compañías han desarrollado técnicas de mantenimiento y reparación aéreas en línea viva.

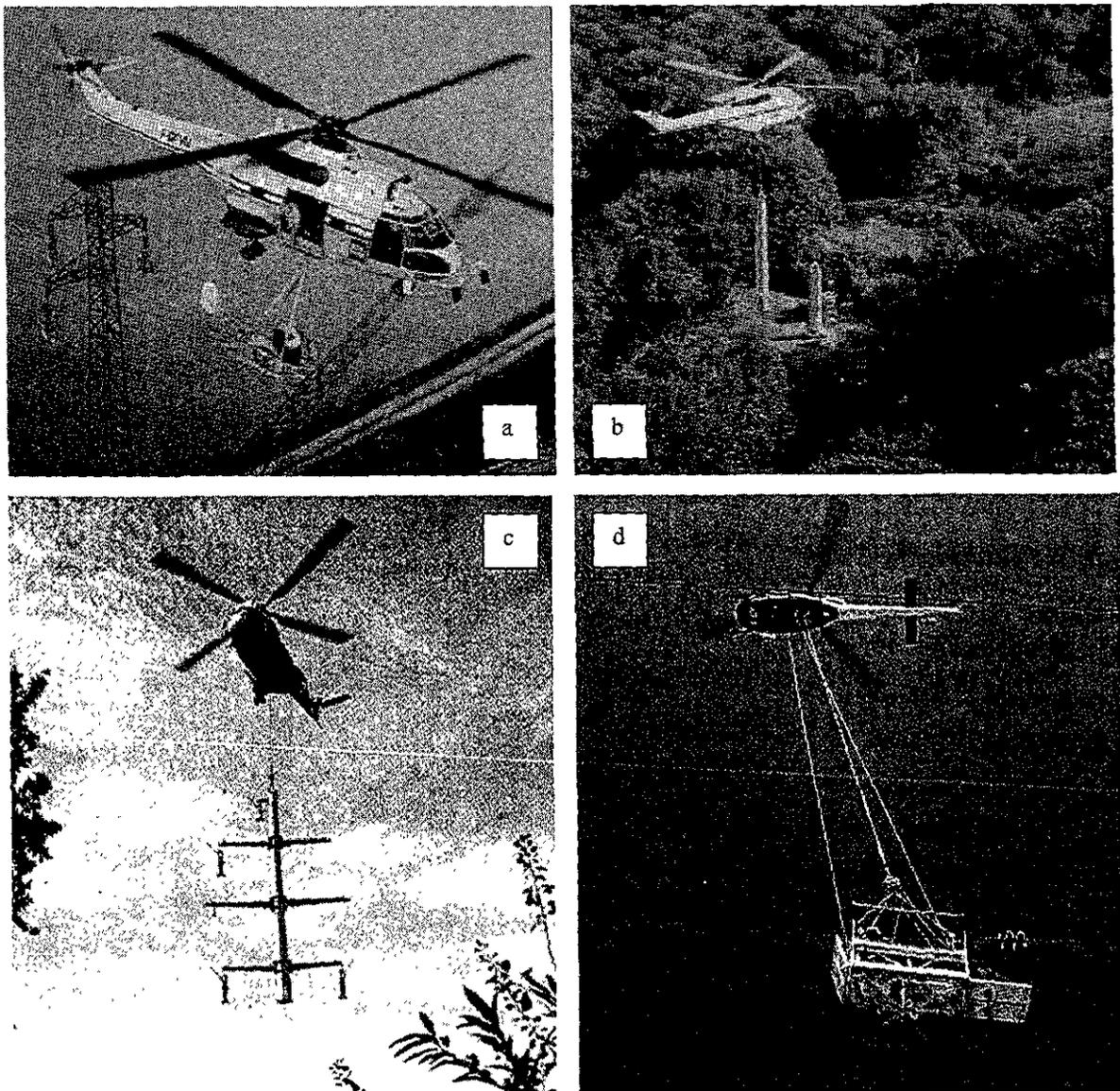


Figura 3.10 Utilización de helicóptero en líneas de transmisión. a) Tendido y tensado del cable conductor, b, c) Montado de un poste en zona inaccesible y d) Colocación de desviadores de aves en cables conductores, Electricité de France -Francia-[2].

---

## REFERENCIAS

- [1] S. Bartlett. Transmission line intersects rainforest. Transmission and distribution world, vol: 51, num: 4, abr. 1999, 5 p., sin refs.
- [2] P. Morel. Line maintenance reaches new heights. Transmission and distribution world, vol: 51, num: 8, ago, 1999, 6 p, sin refs.

"El genio es noventa y nueve por ciento de sudor y uno por ciento de inspiración"

*Thomas Alva Edison.*

## CAPITULO 4

### Impacto Social

Existen aspectos que coadyugan a la mera labor técnica del ingeniero, a la optimización de los recursos, a los tiempos y a los costos del proyecto.

La cuestión social se encarga de las relaciones civiles y gubernamentales con el fin de obtener los permisos de paso respectivos, en los terrenos propiedad de tipo ejidal o privada por donde se llevara a cabo la construcción del proyecto de la línea de transmisión respectiva, dentro de la normatividad existente.

#### 4.1 Indemnizaciones

Una de las partes primordiales para el éxito de concluir la construcción de una línea de transmisión dentro del plazo establecido, son las gestiones para la obtención de los permisos de paso a través de los diferentes predios que serán afectados al ejecutarse la obra y que se deben de realizar previamente al inicio de los trabajos.

Estas gestiones deberán planearse de una forma tal que simultáneamente se estén efectuando las negociaciones a todo lo largo de la línea. Esto es con el fin de reducir los plazos de los trámites para conseguir las anuencias respectivas ya que en algunas ocasiones es necesario esperar esta resolución, en virtud de que el otorgamiento del permiso se define a través de asambleas ejidales para los terrenos de este tipo de régimen, documento necesario para poder realizar una expropiación, una servidumbre de paso o para cubrir los daños a los bienes distintos a la tierra.

Para el caso de propiedad privada se pudiera complicar para conseguir dicho permiso cuando la propiedad se encuentra intestada, repartida entre dos o más propietarios que en ocasiones se encuentran fuera de nuestro país o en definitiva una negociación rotunda de otorgar anuencia. Por eso es que se debe de trabajar sobre estos trámites en varios frentes, para no ocasionar retraso en la construcción por no contar con las anuencias respectivas con la oportunidad requerida.

## 4.2 Tramites de Anuencia

OBRA LIT. LEON II-LEON IV  
 CLAVE 65WNI

BUENO POR \$ 195,940.00

RECIBI de la Comisión Federal de Electricidad la cantidad de \$ 195,940.00  
 (CINCO MILL NOVECIENTOS CUARENTA NUEVOS PESOS 00/100 M.N.)  
 por los daños que se ocasionaron con motivo de la construcción del  
 CAMINO DE ACCESO, EXCAVACION, PREARMADO Y MONTADO DE LA TORRE No. 15  
 que constan en el avalúo formulado con fecha 28 DE FEBRERO DE 1995  
 y que firmé de conformidad.  
 Hago constar que con esta cantidad se cubre el total y finiquito de los daños y declaro  
 que, en lo sucesivo, no haré ninguna reclamación a la Comisión Federal de Electricidad  
 por este concepto.

IRAPUATO, GTO., a 04 de MARZO de 1995

Nombre completo del afectado EJIDO SAN CARLOS  
 Domicilio CONOCIDO EJIDO SAN CARLOS (LEON, GTO.)

EL AFECTADO ADMINISTRADOR

*Ernando...*  
 EJIDO SAN CARLOS  
 Comisariado Ejido  
 Municipio de  
 SAN CARLOS  
 Municipio de León, Gto.

HRV/DSG/elva\*

C.P. SALVADOR PÉRALTA GARCÍA  
 RESIDENCIA

Figura 4.1 Recibo de pago de afectaciones por el derecho de paso para una línea de transmisión.

Normalmente la temática a seguir en la obtención de los permisos de paso es primeramente el investigar el nombre y dirección de cada propietario del terreno, donde cruzará la línea de transmisión ó donde quedará instalada una o algunas de las estructuras, ya sea preguntando a los habitantes más cercanos a estos lugares o bien solicitándolos directamente a las casas ejidales o apoyándose con la información que se obtenga de la Secretaría de la Reforma Agraria y catastro Municipal.

Al tener detectados a los afectados se procede a realizar una serie de entrevistas en las cuales primero se notifica el proyecto que se tiene contemplado realizar el órgano encargado del sector eléctrico, en los terrenos de su propiedad y que de cierta manera causará algunos daños durante la construcción, haciéndole entrega del escrito de solicitud de anuencia de paso donde solo se le establece que los daños causados a los bienes distintos de la tierra por la ejecución de las diferentes actividades de construcción se pagarán de acuerdo a los tabuladores que edita la Comisión de Avalúos de Bienes nacionales (CABIN) para los diferentes tipos de productos que se obtengan de la explotación del suelo y que de juzgarlo pertinente su aprobación estampe su

firma de conformidad en el mismo ó le de contestación indicando sus condiciones para conceder su aceptación.

| OBRA: L.T. LEON II-LEON IV  |                               | CLAVE: 69WNI                          |              |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
|---|-------------------------------|---------------------------------------|--------------|----------|----------|----------|-------|-----------------------------|-----------------------|---------|-------------|---------|--|--|-------------|
| IRAPUATO, GTO.,   |                               | A 28 DE FEBRERO DE 1995               |              |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| a) SUPERFICIE DEL TERRENO   | 16,500 M <sup>2</sup>         | NOMBRE DEL AFECTADO: EJIDO SAN CARLOS |              |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| b) SUPERFICIE AFECTADA  |                               | L.T. LEON II-LEON IV                  |              |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| c) SUPERFICIE RESTANTE  |                               | ORIGEN: S.E. LEON II                  |              |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| d) SUPERFICIE CONSTRUIDA  |                               | KM: 34 A KM: 36                       |              |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| e) SUPERFICIE SEMBRADA  |                               | TORRE: A TORRE: 36                    |              |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| f) PROPIEDAD EJIDAL: XXXXX PARTICULAR:  |                               | RESIDENCIA EN: IRAPUATO, GTO.         |              |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| PROCEDIS DE LA AFECTACION   |                               |                                       |              |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| S.E. LEON II  |                               | 30 M                                  | S.E. LEON IV |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
|   |                               | 550 M                                 |              |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| T-35  |                               |                                       |              |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>CONCEPTO</th> <th>CANTIDAD</th> <th>UNITARIO</th> <th>TOTAL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MAIZ TEMPORAL EN PRODUCCION</td> <td>16,500 M<sup>2</sup></td> <td>N\$0.36</td> <td>N\$5,940.00</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: right;">SUMA \$</td> <td>N\$5,940.00</td> </tr> </tbody> </table> |                               |                                       |              | CONCEPTO | CANTIDAD | UNITARIO | TOTAL | MAIZ TEMPORAL EN PRODUCCION | 16,500 M <sup>2</sup> | N\$0.36 | N\$5,940.00 | SUMA \$ |  |  | N\$5,940.00 |
| CONCEPTO  | CANTIDAD                      | UNITARIO                              | TOTAL        |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| MAIZ TEMPORAL EN PRODUCCION   | 16,500 M <sup>2</sup>         | N\$0.36                               | N\$5,940.00  |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| SUMA \$   |                               |                                       | N\$5,940.00  |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| VALUADOR DE AFECTACIONES  | EL SUPERINTENDENTE DE LA OBRA | EL AFECTADO                           |              |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |
| SR. DARIO BARAJAS GUTIERREZ<br>MRV/DBG/elva*  | ING. MARTIN RAMIREZ VENEGAS   | EJIDO SAN CARLOS<br><i>[Firma]</i>    |              |          |          |          |       |                             |                       |         |             |         |  |  |             |

NOTA: LOS TIPOS DE CONSTRUCCION Y LAS CARACTERISTICAS DE ESCRITURA O CONSTANCIA EJIDAL SE ANOTARAN AL REVERSO DE ESTE DOCUMENTO

Figura 4.2 Avalúo de afectaciones para el derecho de paso de una línea de transmisión

En caso de que se presenten dificultades para obtener la anuencia respectiva por que no aceptaron el importe que pagará el órgano pertinente en materia eléctrica al aplicar el tabulador CABIN o que se aferre el propietario en que se le pague cierto importe muy por encima de lo que nos marca el tabulador para poder dar su anuencia ó también por que en sus terrenos tiene programado realizar futuras construcciones, o que el tipo de cultivo afectar cuente con sistemas de riego sofisticados, nos quedan dos recursos más para lograr este derecho, el aplicar el pago de servidumbre de paso o a través de la expropiación.

### 4.3 Expropiación

Con la negativa de la indemnización es necesario recurrir a la expropiación; iniciando con la recopilación de la documentación pertinente, contemplando:

- Terrenos de régimen de propiedad privada.
  - Oficio solicitud de expropiación al Gobierno del Estado que le corresponda.
  - Plano de la afectación con la superficie objeto de la expropiación, orientación astronómica de una de las tangentes del polígono; croquis de localización donde se ubica la obra; se indicará en el plano el nombre del propietario, municipio y estado, así como la denominación de la obra y nombre, cargo y firma del encargado de la misma.
  - Copia de la escritura con registro público de la propiedad.
  - Avalúo catastral, el cual se obtendrá mediante solicitud.
  - Lucrocesante.



Figura 4.3 Invasión de los derechos de vía de líneas de transmisión, los Mochis, Sinaloa.

- Terrenos de régimen ejidal.
  - Oficio solicitando se instaure la expropiación ante la Secretaría de la Reforma Agraria, señalando el nombre completo del núcleo agrario por afectar la superficie requerida, causa de utilidad pública y partida presupuestal a la que se cargarán los gastos del procedimiento.
  - Cuatro juegos del plano topográfico (un cuadro de construcción y/o planilla de cálculo) de la superficie objeto de la expropiación; orientación astronómica en una tangente del polígono; croquis de localización en el que se ubique la obra, se señalará en el plano el nombre del ejido, Municipio y Estado, así como la extensión de terreno

a afectar y denominación de la obra, debiendo precisar el nombre, cargo y firma del responsable de la misma.

Para el trámite de servidumbre de paso en terreno de régimen ejidal o comunal:

- Oficio requiriendo se gestione la autorización del C. Director General para contratar la servidumbre de paso donde se indique:
  - Superficie afectada.
  - Destino que se dará a la misma.
  - Nombre del ejido o de los parceleros afectados.
  - Precios que se pretenda pagar.
  - Ubicación.
  - Datos de avalúo.
- Anexando además:
  - Croquis de localización.
  - Copias de avalúo, preferentemente de la CABIN ó de una sociedad nacional de crédito.
  - Certificado de derechos parcelarios (en caso de tierras parceladas).
  - Acta de asamblea ejidal en la que se autorice expresamente la celebración del convenio de servidumbre (en caso de tierras de uso común).

#### 4.4 Pago de afectaciones

Ya contando con la anuencia de paso por parte del afectado y dependiendo del acuerdo establecido con el mismo, para realizarse el pago de los daños, ya sea antes del inicio de los trabajos ó posteriormente al efectuar dicha afectación, se procede a realizar los certificados y avalúos de daños que deberá ser debidamente firmado de autorización, tanto por el residente de zona, como el administrador y por el encargado de indemnizaciones, quien es el que lo formula, respaldándolo con tres fotografías del predio afectado, para proceder a programar y solicitar los fondos respectivos para cubrir la indemnización, esto cuando se trata solo del pago de los daños a los bienes distintos a la tierra.

Para el caso de servidumbre de paso es necesario obtener la autorización de la dirección general de esta dependencia, para poder efectuar el pago por este derecho, debiéndose protocolizar mediante notario público del patrimonio del inmueble federal de la ciudad más cercana, donde se encuentre dicho funcionario, respecto a la ubicación del predio afectado.

Para el caso de la expropiación, el pago se realizara hasta que sea publicado el decreto respectivo en el diario oficial de la federación a favor del organismo encargado del sector eléctrico y se efectuará a través del Fideicomiso del Fondo Nacional de Fomento Ejidal (FIFONAFE).

#### 4.5 Brechas y Caminos

Con la adecuada anticipación se deben de obtener otra serie de permisos para la construcción de las líneas de transmisión ante dependencias gubernamentales que administran los recursos naturales y del medio ambiente y que con la instalación de las obras pueden causar algunas modificaciones a los ecosistemas e impacto ambiental.

En primera instancia es necesario la presentación del informe preventivo de la línea de transmisión a construir, ante la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, así como de la información adicional que se presenta a esa dependencia que surge de la revisión que realiza al informe preventivo.

Al contar con la resolución aprobatoria por la SEMARNAP a través del Instituto Nacional de Ecología, se procederá a realizar los trámites de solicitud del cambio de uso de suelo, para que pueda otorgar el permiso del derribo de árboles en las áreas donde sea necesario efectuar esta documentación que deberá presentarse a la SARH constará de:

- Autorización de construcción por parte de la SEMARNAP.
- Solicitud de cambio de uso de suelo por parte del afectado a petición del organismo encargado de la electrificación.
- Informe técnico justificativo que elaborará el responsable técnico forestal de la zona.
- Plano forestal.
- Oficio del municipio con el visto bueno del cambio de uso de suelo.
- Dictamen técnico de la subdelegación forestal.

#### 4.6 Costo social en materia de impacto ambiental

Es usual que algunos de los efectos ambientales de los proyectos eléctricos se reflejen en el precio que pagan los consumidores por la electricidad. Tal es el caso, por ejemplo, de los costos por usar combustibles más limpios o de lavar los gases de emisión de una termoeléctrica. Sin embargo, aun en ausencia de intensiones de subsidio, hay otros costos de los efectos ambientales que no se reflejan en el precio; por ejemplo, los posibles costos de un cambio climático global causado por la acumulación de bióxido de carbono en la atmósfera, o gran parte de los costos asociados a los efectos en la salud por la presencia de óxidos de azufre y de nitrógeno en el aire.

Por tanto, es válido afirmar que algunos de los costos sociales de los efectos de la industria eléctrica en el ambiente no han sido incorporados en el precio de la electricidad a los consumidores. Las empresas eléctricas tienden a transferir a sus clientes sólo los costos en que ellas mismas incurren, es decir, sus costos internos y comerciales. Los que ellas no tienen que sufragar, llamados costos externos o externalidades, son en cualquier caso tan objetivos como los costos internos; sin embargo, por no cuantificarse ni contabilizarse, no son pagados por los usuarios del servicio, sino por toda la sociedad sin advertirlo. Cuando las consecuencias ambientales son a muy largo plazo, esa transferencia de costos recae en las generaciones futuras.

Son principalmente los costos de los efectos regionales o globales y los diferidos los que suelen excluirse de los precios. Por supuesto, lo mismo ocurre en cualquier otro servicio o industria, y a causa de ello los costos de las opciones de más efecto ambiental siempre están subvaluados en comparación con las de sus alternativas de menor efecto, y tal subvaluación tiene

un monto generalmente desconocido. Lo anterior no hace que automáticamente sea preferible la opción de menor efecto ambiental, cualquiera que sean sus costos comerciales.

La única manera de aproximarse a la selección racional de proyectos de generación eléctrica es incorporar en la comparación de opciones todos los costos externos y adoptar como criterio de elección la minimización del costo social, esto es, del valor presente de la suma de todos los costos internos y externos. A la dificultad de cuantificar cualquier costo externo se agrega así la de incluirlos todos, o al menos todos los significativos, pues conceptualmente no basta con incluir los costos externos asociados directamente a la construcción y operación del proyecto.

Por otra parte, cabe aclarar que se habla aquí de costos por convención derivada de que la mayoría de los efectos sobre el ambiente producidos por un proyecto son detrimentales. En rigor costos aquí significa costos menos beneficios, pues lo que interesa es el costo neto (ó de beneficio neto) del proyecto. Es obvio que el enfoque de minimización de costos netos totales (ó maximización de beneficios netos totales) requiere superar serias dificultades para estimar correctamente todos los costos significativos. Existe el riesgo de estimar unos con mayor confiabilidad que otros, y la tentación de excluir aquellos de más difícil cuantificación. Empero, tales dificultades y riesgos son inherentes a cualquier método cuantitativo, y por lo tanto no justificarían el abandono de un enfoque racional. Además, el riesgo de que las decisiones sean inapropiadas es mayor si se omiten los análisis cuantitativos indicados o si éstos no se hacen de manera explícita.

Por ejemplo, si cierta opción se descarta o se soslaya por decisión unipersonal o por la presión de un grupo que no representa el interés general de la sociedad, ello equivale a asignar dicha opción un costo infinito y, en consecuencia, a adoptar un proyecto alternativo más costoso, con pérdidas de utilidad desconocidas. Las restricciones a la ubicación de proyectos derivadas de la declaratoria de reservas ecológicas equivalen también a la asignación de costo infinito a la perturbación de tales territorios, salvo que en estos casos, si las declaraciones respectivas están bien fundadas y legitimadas, este costo refleja una percepción social racionalmente válida.

Así pues, para asegurarse de la que la protección ambiental se incorpora de manera

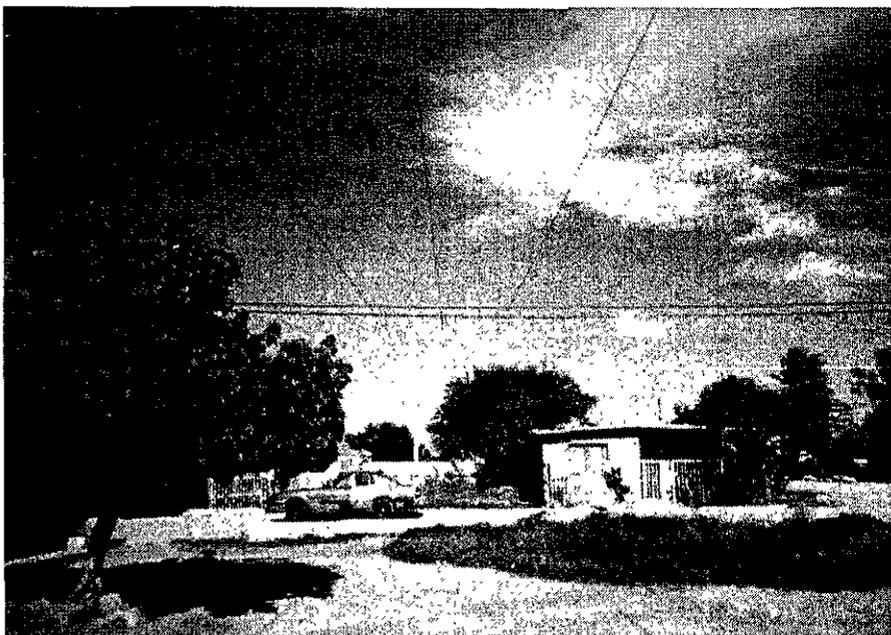


Figura 4.4 Invasión del derecho de vía, los Mochis, Sinaloa.

racional en la toma de decisiones del sector eléctrico, sin exceso ni insuficiencias, es indispensable dar el paso para incorporar los costos ambientales externos a la evaluación de los proyectos.

Después de esto todavía sería posible un paso adicional, en este caso hacia la racionalización de las decisiones de los usuarios; en efecto, la única manera de hacer que los mecanismos del mercado trabajen en favor de la protección ambiental es, también internalizar las externalidades, es decir, transformar la totalidad de los costos comerciales transferibles como precios al usuario final: hoy la contaminación y la depredación de los recursos naturales en todo el mundo siguen ocurriendo porque tales acciones están subsidiadas en gran escala. Esto se detendría si los precios reflejaran los verdaderos costos que para la sociedad tienen los bienes y servicios que cada quien usa, incluyendo los costos de la contaminación y del impacto ambiental.

La problemática social en las relaciones civiles trata de evitar:

- Contratiempos en la obtención de derechos de paso.
- Retrasos de la obra a causa de la obtención de la resolución en materia de impacto ambiental.
- La invasión de los derechos de vía.
- Inadecuadas selecciones de trayectoria para las líneas de transmisión.
- El paso de las líneas por zonas urbanas y semiurbana.

Esto con el fin de reducir el impacto ambiental y social, así como los costos internos y externos de la construcción de la línea.

## CONCLUSIONES

Los capítulos que conforman esta tesis son un preámbulo de la ingeniería eléctrica en México, involucran aspectos, entre los que destacan; factores sociales, ambientales, estéticos, económicos y de ingeniería, necesarios para la proyección de las líneas de transmisión.

Los factores técnicos o de ingeniería se encuentran en su más pleno desarrollo, eliminando así las fallas en la transmisión de la energía y con esto equilibrando el factor económico.

Los factores sociales, ambientales y estéticos son hoy en día el estereotipo de la nueva ingeniería, se crean técnicas, procedimientos, metodologías y concepciones que satisfagan a éstos. Más sin embargo es algo nuevo y de costos muy elevados.

El órgano encargado del sector eléctrico, en sus criterios para la planeación, el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de líneas de transmisión ha comenzado a hacer énfasis en todos estos aspectos por lo que convierte a la ingeniería en una profesión multidisciplinaria.

La conceptualización de las líneas de transmisión no es más que el panorama general desde el mismo momento en que surge la necesidad de transmitir la energía de un lugar a otro, hasta la misma operación de las líneas de transmisión. Esto implica definir las características esenciales de la línea (voltaje, subestaciones de origen y destino, longitud aproximada, estructuras, conductores, número de circuitos, posible trayectoria y la fecha de entrada en operación), tomando en cuenta la información básica de entrada (datos técnicos de carácter eléctrico y mecánico) y el procesamiento de dicha información de forma analítica o con la ayuda de software, la interpretación de los resultados por parte de un experto dan la pauta para la construcción, auxiliándose de maquinaria y técnicas para el armado y vestido de estructuras, para el tendido y tensado de los conductores y cable de guarda (sin o con fibra óptica) y de la colocación de todos los accesorios necesarios para el óptimo funcionamiento de las líneas.

La afectación al medio ambiente, principia desde la selección de las rutas para las líneas de transmisión que deben de ser trayectorias técnicamente adecuadas, ambientalmente compatibles y socialmente aceptadas. A través del análisis de esta información se puede afirmar que hoy en día los efectos causados por la construcción, operación y mantenimiento de líneas de transmisión, se pueden minimizar a través de técnicas de ingeniería y de la adecuada planeación de los sistemas eléctricos, cuyo objetivo final debe de incluir el producir un daño menor a las esferas con que interactúa la sociedad.

Las instalaciones eléctricas en operación se encuentran inmersas en un ambiente electromagnético, el cual puede considerarse para la frecuencia de operación integrado por campos eléctrico y magnético independientes uno del otro. Estos campos se caracterizan mediante su magnitud de intensidad. A la frecuencia fundamental del sistema, la intensidad del campo eléctrico es directamente proporcional a la tensión del sistema, y el campo magnético a la magnitud de la corriente que transporta la línea. Ambos dependen de forma compleja de la disposición geométrica de los conductores y su posición con respecto al suelo.

La intensidad de los campos eléctrico y magnético afectan a cualquier elemento que se encuentre en la cercanía de las líneas de transmisión. Los efectos más importantes son la presencia de fuerzas sobre las cargas eléctricas.

Las investigaciones realizadas hasta estas fechas acerca de los posibles efectos sobre la salud de los campos electromagnéticos generados por las líneas de transmisión se han convertido en una verdadera polémica, más sin embargo no existen bases teóricas y de laboratorio que aporten

una evidencia epidemiológica convincente de que éstos propicien cáncer, solo se puede afirmar que existe una asociación casual entre ambos.

El último de los efectos ambientales es el ruido audible producido por las descargas en la superficie de los conductores y que es un problema con solución sencilla pero técnicamente y económicamente muy costosa.

El impacto ambiental explica y documenta los conceptos y procedimientos para lograr el objetivo que se persigue en las diferentes etapas para la operación de las líneas de transmisión. Este tema exige el conocimiento de normas, leyes y reglamentos tanto de orden federal, estatal o local y de las políticas y preocupaciones ambientales de la época, tanto locales como globales. Aunque significativamente el impacto de las líneas de transmisión es de carácter estético, la solución es prácticamente técnica y económica.

Muy genéricamente la descripción de las actividades civiles en la compra o expropiación de los terrenos para el paso de las líneas de transmisión constituyen el tema de debate en materia de impacto social.

Esta tesis no agota la información sobre el tema y tal vez ¿por qué no?, sea parte del acervo de consulta tanto técnico como social.

Finalmente las obras y los grandes retos concluyen gracias a que los ingenieros hacen lo que deben de hacer:

“emplean la ciencia cuando  
es aplicable,  
la intuición cuando es útil,  
y el  
tanteo cuando es necesario”.\*

**Filiberto Zamora Sánchez.**

---

\* Charles L. Best. KRICK, E. V. Introducción a la ingeniería y al diseño en ingeniería, Limusa, Mexico 1986.

## BIBLIOGRAFÍA

GRAINGER, John J. & STEVENSON Jr. William D. Análisis de sistemas de potencia. Mc Graw-Hill. México, 1998.

ABB Power T&D Company inc. North Carolina. Electrical transmission and distribution reference book. Electrical systems technology institute. 5ª Edición. U.S.A. 1997.

MARSHALL, Stanley V., DUBROFF Richard E. & SKITEK Gabriel G., Electromagnetismo conceptos y aplicaciones. Prentice Hall. 4ª Edición, México, 1997.

GLOVER, Duncan J. & SARMA, Mulukutla, Power system analysis & design. PWS publishing company. 2ª Edición, U.S.A.

CANTER, Larry W. Manual de evaluación de impacto. Técnicas para la elaboración de estudios de impacto. Mc Graw-Hill. España, 1998.

VARAS, Juan Ignacio. Economía del medio ambiente en América Latina. Alfaomega. 2ª Edición, Colombia, 1998.

PEÑA, A., Benjamin. Topografía. Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Aragón, Coordinación de Arquitectura, Departamento de Ciencias de la Construcción. México, 1985.

MIRANDA, ADAME, Julián, AGUILAR, LOPEZ, Jorge Alberto, et al. El sector eléctrico de México. Comisión Federal de Electricidad Y Fondo de cultura económica. México, 1994.

BASILIO, HERNANDEZ, Oscar & NERI, BARRIO, Ernesto R. et al. Manual de diseño de obras civiles. Capítulo 3, Estructuras de transmisión de energía eléctrica. Instituto de Investigaciones Eléctricas. México.

Comisión Federal de Electricidad, Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación. Curso integral sobre líneas de transmisión. México, 1985.

Comisión Federal de Electricidad, Subdirección de Construcción, Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación. Instituto de Investigaciones Eléctricas, División de Sistemas Eléctricos, departamento de Transmisión y Distribución. Estudios de la afectación al medio ambiente por los sistemas de transmisión de alta tensión. México, 1993, 174 refs.

Comisión Federal de Electricidad, Subdirección de Construcción, Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación, Gerencia de Construcción, Departamento de Selección de Sitios. Reunión de trabajo sobre la problemática del cumplimiento a condicionantes y términos de los oficios resolutivos en la residencia general de construcción peninsular. México, 1997.

Comisión Federal de Electricidad, Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación. Subdirección de Construcción. **Normatividad ambiental aplicable a proyectos de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas.** México, 1999.

Comisión Federal de Electricidad. **Uso de maquinaria pesada y manejo de vegetación en la apertura de la brecha de maniobras y patrullaje así como para los caminos de acceso en líneas de transmisión.** México, 1999.

## HEMEROGRAFIA

J.M. Decicco et al. **Environmental Concerns Regarding Electric Power Transmission in North America.** Energy Policy, Vol: 20, num 1, (ene. 1992), pags. 30-39.

J. B. Kim et al. **Route selection and desing of 765 kV transmission line considering environmental constraints and public hearing.** International conference on high large voltage electric systems, París, Francia, 1996 [proceedings]. París Francia: CIGRE, 1996, vol: 22, (1996), pags. 5 p.

P. Clar et al. **Environmental Issues drive line desing.** Transmission and distribution World, vol: 48, num: 13, (dic 1996), pags. 51-55.

J. Boo Kim. **Line design lessens environmental impact.** Transmission and distribution world, vol: 50, num: 8, (ago. 1999), pags. 6p.

M. A. Al-Faraj et al. **Environmental effects on high voltage AC transmission lines audible noise.** Intersociety Energy conversion engineering conference, num: 30, Honolulu, Hi, 1997. [proceedings]. Piscataway, NJ: AICHE, 1997, vol: 3, pags 2082-2087.

P. D. Mixon. **Power line electromagnetics and the EMF issue: an update for 1998.** IEEE rural electric power conference, 42, 1998, st. Louis, MO, Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, 1998, pp. D3-1/D3-6, 27 ref.

S. Semple & J. W. Cherrie. **Factors influencing personal magnetic field exposure: Preliminary results for power utility and office workers.** Occupational hygiene, vol. 42, num: 3 (abr. 1998), pags 167-171, 16 ref.

## MANUALES

Condumex. **Manual de conductores eléctricos.** México, 1998.

Conelec. **Manual eléctrico.** 4ª Edición, México, 1989.

Cables Pirelli S. A. **Introducción al sistema OPGW de Pirelli.** España, 1996.

NOM-80-ECOL-1998

NOM-81-ECOL-1998

NOM-114-ECOL-1998

## SITIOS WEB

<http://www.cfe.gob.mx>

<http://www.ine.gob.mx>

<http://www.tdwrl.com>

<http://www.teraindustries.com>

<http://frwebgate3.access.gpo.gov/cgi-bin/...ocID=609367458+11+0+0&WAIAction=retrieve>

<http://www.geocities.com/SiliconValley/Monitor/8370/index.html>

<http://www.geocities.com/CollegePark/Classroom/1939/>

<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/8367/proy1t.html>

<http://www.ambiente-ecologico.com>

## ARCHIVO FOTOGRAFICO

Instituto de Investigaciones Eléctricas –México-, Unidad de Transmisión y Distribución,  
**Departamento de Líneas de Transmisión.** México 1998-1999.

De los Sitios Web citados.